5. ULUSLARARASI

AVRASYA

Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi

19-20 Eylül 2026

ANKARA



EDİTÖR:

Prof.Dr. Deilton RIBEIRO BREZİLYA

Prof.Dr.Mehmet Fırat BARAN

İKSAD Publishing House

KONGRE KİTABI

www.isarconference.org

INDEX

CONGRES ID		**II-V**
PROGRAM		**VI-XXII**
GALLERY		**XXIII-XXVI**
ACADEMIC INCENTIVE		**XXVII**
NOTIFICATIONS		**XXIII-XXXIV**

CONGRESS ID

CONGRESS TITLE

5th INTERNATIONAL AVRASYA SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION CONGRESS

DATE AND PLACE

19-20, SEPTEMBER 2026 ANKARA PRESENTATIONS

ORGANIZATION

ISARC INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

CONGRE COORDINATOR

Beyza KUŞKIRAN

EDITOR

Prof.Dr. Deilton RIBEIRO BREZİLYA
Prof.Dr.Mehmet Fırat BARAN

ORGANIZING COMMITTEE

Prof. Dr. Mukadder MOLLAOĞLU
Prof. Dr. Neslihan ŞAHİN
Prof. Dr. Sancar BULUT
Prof. Dr. Serpil ÜNVER SARAYDIN
Prof. Dr. Tolga ULUSOY
Prof. Dr. Yadigar GÜLSEVEN SIDIR
Assoc. Prof. Dr. Deniz KARATAŞ
Assoc. Prof. Dr. Malik YILMAZ
Assoc. Prof. Dr. Melih OKCU
Assoc. Prof. Dr. Nursen IŞIK
Assoc. Prof. Dr. Özlem ÜLGER DANACI
Assoc. Prof. Dr. Sahure YARİŞ
Assoc. Prof. Dr. Seda BENGİ
Assoc. Prof. Dr. Sema SAĞLIK
Assoc. Prof. Dr. Şükrü KALAYCI
Assoc. Prof. Dr. Zamıg TEHMEZOV
Assoc. Prof. Dr. Zeynep Deniz ŞAHİN İNAN
Assoc. Prof. Dr. Zühal OKCU
Assoc. Prof. Dr. Zulfiyya ISMAYIL
Dr. Aziz İLGAZİ
Dr. Laleş USLU AZARAK
Dr. Mine KIRKYOL
Dr. Sevil ÖZCAN
Dr. Sümeyye GÖKÇENOĞLU
Dr. Şengül ŞENTÜRK
Dr. Rana BAYTİN ALACI

ISBN: '978-625-378-728-8'

KİTAP YAYIN TARİHİ: 30.s09.2026

"COMPLIANCE WITH PUBLICATION ETHICS IS THE SOLE RESPONSIBILITY OF THE AUTHORS; ACCORDINGLY, THEY BEAR BOTH ETHICAL AND LEGAL ACCOUNTABILITY"

SCIENCE AND ADVISORY COMMITTEE

Prof.Dr.EMİNE NAS
Selçuk University

Prof. Dr. Jaın SADHNA
Unıversıty Of Delhı

Prof. Dr. Kübra KARAMAN
Yozgat Bozok University

Prof. Dr. Mehmet Fırat BARAN
Siirt University

Prof. Dr. Mehmet ŞAHIN
Gaziantep University

Prof. Dr. Morakeng Edward
Kenneth LEBAKA University Of Zululand

Prof. Dr. Mukadder MOLLAOĞLU
Cumhuriyet University

Prof. Dr. Manole COJOCARU
Titu Maiorescu University

Prof. Dr. Mustafa Fedai ÇAVUŞ
Osmaniye Korkut Ata University

Prof. Dr. Mustafa METE
Gaziantep University

Prof. Dr. Mustafa Onur ALADAĞ
Selçuk University

Prof. Dr. Neslihan ŞAHİN
Sivas Cumhuriyet University

Prof. Dr. Nurdan KALAYCI
Gazi University

Prof. Dr. Orhan ZEYBEK
Balıkesir University

Prof. Dr. Sancar BULUT
Kayseri University

Prof.Dr. Sedat İLHAN
Dicle University

Prof. Dr. Selahattin YAVUZ
Erzincan Binali Yıldırım University
Prof. Dr. Seyfi ŞEVİK
Hitit University

Prof. Dr. Songül ÇAKMAKÇI
Atatürk University

Prof.Dr.Vehbi GÜNEŞ
Selçuk University

Prof.Dr. Yadigar GÜLSEVEN SIDIR
Bitlis Eren University

Prof. Dr. Zharkynbıke SULEIMENOVA
Kazakh National Women's Pedagogical University

Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK
Fırat University

Assoc. Prof. Dr.Ahmet AYDIN
Ege University

Assoc. Prof. Dr. Armel MBON
Marien Ngouabi University

Assoc. Prof. Dr. Asuman SAVAŞCIHABEŞ
Nuh Naci Yazgan University

Assoc. Prof. Dr. Azimbaeva GULBAYRA
Kazakh National Women's Pedagogical University

Assoc. Prof. Dr. Betül GÜZELDİR
Atatürk University

Assoc. Prof. Dr. Çiğdem BOGENÇ
Karabük Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr.Elif Feyza TOPDAŞ
Atatürk University

Assoc. Prof. Dr.Gökhan UYANIK
Gazi University

Assoc. Prof. Dr. Hasan TELLİ
Mersin University

Assoc. Prof. Dr.Murat TOPAL
Fırat University
Assoc. Prof. Dr. Oqtay QULİYEV
Azerbaycan Devlet İktisat University

Assoc. Prof. Dr. Orhan TURAN
Batman University

Assoc. Prof. Dr. Ömer Faruk RENÇBER
Gaziantep University

Assoc. Prof. Dr. Onur ÇOMAKLI
Erzurum Teknik University

Assoc. Prof. Dr. Sahure YARİŞ
Dicle University

Assoc. Prof. Dr. Salman Bashir MEMON
Shah Abdul Latif University

Assoc. Prof. Soufiane Ziani
Mohammed 1st University

Assoc. Prof. Dr. Syed Ali
Raza NAQVI Government College University Faisalabad

Assoc. Prof. Dr. Victoria POSTOLACHE
Alecu Russo Balti State University

Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KÜÇÜK
Gazi University

Assoc. Prof. Dr. Yılmaz SEÇİM
Necmettin Erbakan University

Assoc. Prof. Dr. Zamıg TEHMEZOV
Azerbaycan Devlet Pedagoji University

Assoc. Prof. Dr. Zulfiyya ISMAYIL
Nahçıvan Dövlet Universiteti

Dr. Ali ARSHAD
University Utara

Dr. Aygün MEHERREMOVA
Bakü Devlet University

Dr. Aziz İLGAZİ
Harran University

Dr. Bhavtosh AWASTHİ
Jecrc University India

Dr. Chems Eddine BOUKHEDIMI
University of Tizi Ouzou

Dr.Duong To Quoc THAI
Dong Thap University

Dr.Huma IKRAM
University Of Karachi

Dr. Moses Adeolu AGOI
Lagos State University of Education

Dr. Muhammad IMRAN
Government College University

Dr.Muhammad Saleh FAISAL
Pmdc Registration

Dr. Nurhoca AKBULAYEV
Azerbaycan Devlet İktisat University

Dr. Rida ZULFİQAR
University of Szeged

Dr. Tatia DOLİDZE
European University

Scıentific Development and Innovative Approach

5th INTERNATIONAL EURASIAN SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION CONGRESS

19-20 SEPTEMBER 2026 ANKARA/TÜRKİYE

Congress Program

Participant Countries:

TÜRKİYE- AZERBAYCAN- ALBANIA – BRASIL – BELARUS- CAMBODIA-GEORGIA- INDIA – IRAN - JORDAN – KKTC - MACEDONIA – MOROCCO – MOLDOVA- PAKISTAN ROMANIA - SERBIA – VIETNAM

IMPORTANT, PLEASE READ CAREFULLY

To be able to make a meeting online, login via **https://zoom.us/join** site, enter ID instead of "Meeting ID or Personal Link Name" and solidify the session. The presentation will have **15 minutes** (including questions and answers). The Zoom application is free and no need to create an account. The Zoom application can be used without registration. The application works on tablets, phones and PCs. Speakers must be connected to the session **10 minutes before** the presentation time. All congress participants can connect live and listen to all sessions. During the session, your camera should be turned on at least %70 of session period. Moderator is responsible for the presentation and scientific discussion (question-answer) section of the session.

TECHNICAL INFORMATION

Make sure your computer has a microphone and is working. You should be able to use screen sharing feature in Zoom. Attendance certificates will be sent to you as pdf at the end of the congress. Moderator is responsible for the presentation and scientific discussion (question-answer) section of the session. **Before you login to Zoom please indicate your name surname and hall number, exp. Hall-1, Fatih KARİPOĞLU**

ÖNEMLİ, DİKKATLE OKUYUNUZ LÜTFEN

Kongremizde Yazım Kurallarına uygun gönderilmiş ve bilim kurulundan geçen bildiriler için online (video konferans sistemi üzerinden) sunum imkanı sağlanmıştır. Sunumlar için **15 dakika** (soru ve cevaplar dahil) süre ayrılmıştır. Online sunum yapabilmek için **https://zoom.us/join** sitesi üzerinden giriş yaparak "Meeting ID or Personal Link Name" yerine ID numarasını girerek oturuma katılabilirsiniz. Zoom uygulaması ücretsizdir ve hesap oluşturmaya gerek yoktur. Zoom uygulaması kaydolmadan kullanılabilir. Uygulama tablet, telefon ve PC'lerde çalışıyor. Her oturumdaki sunucular, sunum saatinden **10 dk öncesinde** oturuma bağlanmış olmaları gerekmektedir. Tüm kongre katılımcıları canlı bağlanarak tüm oturumları dinleyebilir. Moderatör – oturumdaki sunum ve bilimsel tartışma (soru-cevap) kısmından sorumludur.

TEKNİK BİLGİLER

Bilgisayarınızda mikrofon olduğuna ve çalıştığına emin olun. Zoom'da ekran paylaşma özelliğine kullanabilmelisiniz. Katılım belgeleri kongre sonunda tarafınıza pdf olarak gönderilecektir. Kongre programında yer ve saat değişikliği gibi talepler dikkate alınmayacaktır. **Zoom'a giriş yaparken önce lütfen adınızı, soyadınızı ve SALON numaranızı yazınız, Örnek: Hall-1, Fatih KARİPOĞLU**

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

https://us06web.zoom.us/j/86324744546?pwd=TkP9rw9lrRZd7V9Hvb77fbi9I9lkah.1

20.09.2026 / Hall-1, Session-1

ANKARA LOCAL TIME

10 00 : 12 00

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: **Assoc.Prof.Dr. Duygu AYDIN**

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
The Effects Of Food Insecurity On Dietary Quality, Eating Behaviors, And Health In Children And Adolescents	Assist.Prof.Dr.Şebnem ÖZGEN ÖZKAYA	Kütahya Health Sciences UniversityTÜRKİYE
Surgical Site Infection And Instrumentation Failure Following Posterior Cervical Decompression And Instrumentation: A Case Report	Assist.Prof.Dr.Ömer Faruk ŞAHİN Assist.Prof.Dr.Bekir TUNÇ Assist.Prof.Dr.Mağruf İlkay YAKAPÇI	Ordu University TÜRKİYE
Exploring Resistome Profiles In Healthy And Diseased Maize Rhizospheres Using Shotgun Metagenomic Data	Dr. Suzan ŞAHİN DOĞAN	Karamanoğlu Mehmetbey University TÜRKİYE
Molecular Docking And In Silico Adme Profiling Of Hqm, An 8- Hydroxyquinoline Schiff Base, Against Braf Kinase	Dr. Suzan ŞAHİN DOĞAN Assist.Prof.Dr.Mustafa ÇİÇEK Assoc.Prof.Dr. Duygu AYDIN Assist.Prof.Dr.Meliha KUTLUCA ALICI Assoc.Prof.Dr. Aytaç KOCABAŞ	Karamanoğlu Mehmetbey University TÜRKİYE Niğde Ömer Halisdemir University TÜRKİYE
Ultrasound-Assisted Aqueous Extraction Of Oleaster Fruit And Evaluation Of Its Antibacterial Activity	Assist.Prof.Dr.Abdulkadir GÜL	Gumushane University TÜRKİYE
Missed Nursing Care In Emergency Departments: Its Impact On Patient Safety And Preventive Strategies	Assist.Prof.Dr.Hamiyet KIZIL Halime TAMİNCE	Sağlık Bilimleri University TÜRKİYE
The Relationship Between Academic Self-Efficacy And Attitudes Toward Artificial Intelligence In Nursing Students	Assist.Prof.Dr.Hamiyet KIZIL Assist.Prof.Dr.Rabia EREN Halime TAMİNCE	Sağlık Bilimleri University TÜRKİYE
The Relationship Between Screen Addiction, Digital Burnout, And Exposure To Sexual Violence Among University Students: A Cross-Sectional Study	Res. Assist. Dr. Hilal BÜYÜKTOPAÇ ÇAKICI Lect.Dr. Simge ÖZTÜRK Lect. Hemş. Ezgi AVCI Öğr. Hemş. Züleyha BALCI Öğr. Hemş. Halime KAHRAMAN Öğr. Hemş. Sohbet PİRLİYAV	Bartin University TÜRKİYE

20.09.2026 / Hall-2, Session-1

ANKARA LOCAL TIME

10 00 : 12 00

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Assist.Prof.Dr.Turan Alp ARSLAN

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Hydrogen Production With Pem Water Electrolysis: Effects Of Iridium Catalyst Loading, Electricity Generation Mix, And System Lifetime On Carbon Footprint	Assist. Prof. Dr. Gizem Nur BULANIK DURMUŞ	Atilim University TÜRKİYE
Static Analysis Of A Critical Load-Bearing Component In A Pneumatic Manipulator Integrated With A Vacuum Handling System	Ömer ARAT Ahmet DURAN Barış ERMAN Prof. Dr. Ali KİBAR	Erha Mühendislik TÜRKİYE Kocaeli University TÜRKİYE
Proton Exchange Membrane Fuel Cell Research From 2000 To 2025: A Bibliometric Analysis	Assist.Prof.Dr.Turan Alp ARSLAN	Afyon Kocatepe University TÜRKİYE
Yolov8n-Seg-Based Dynamıc Object Maskıng Approach For Monocular Vısual Slam On Embedded Platforms Usıng Gazebo Sımulatıon	Selin COŞKUN Prof. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ	Gazi University TÜRKİYE
Aura: An Adaptive Cockpit Interface With Explainable Decision Support For Reducing Pilot Cognitive Workload	Burhan ŞAHİN Gamze ERKAN Fatma Miray ÖZTÜRK Sabiha Ecem YILMAZ	Maltepe University TÜRKİYE Sakarya University TÜRKİYE Akdeniz University TÜRKİYE
Bibliometric Profile Of Flowmeter Research: Trends, Authors, And Technological Clusters	Assoc.Prof.Dr. İbrahim PAZARKAYA	Afyon Kocatepe University TÜRKİYE
Prediction Of Total Cutting Force In Turning Operations Using Machine Learning: A Support Vector Regression (Svr) Model And Parametric Analysis	Assoc.Prof.Dr. İbrahim PAZARKAYA	Afyon Kocatepe University TÜRKİYE
Determination Of Opposite Groups In Social Networks Using Data Mining	Lect. Tuğba ALTINDAĞ	Baskent University TÜRKİYE

20.09.2026 / Hall-3, Session-2

ANKARA LOCAL TIME

10 30 : 12 00

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: **Assoc. Prof. Dr. Bayram BOZHÜYÜK**

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
The Reproduction Of 1980s Aesthetics In The Digital Age Through City Pop And Visual Nostalgia	Assoc. Prof. Dr. Bayram BOZHÜYÜK	Gaziantep University TÜRKİYE
The Concept In Landscape Design: Definition, Process, And Its Implications For Design	Şevval ÖZKAL Assist. Prof. Dr. Barış KAHVECİ Assist. Prof. Dr. Nuriye Ebru YILDIZ	Niğde Ömer Halisdemir University TÜRKİYE
Black Ceramics From Antiquity To Contemporary Art: Synthesis Of Volcanic Rock Addition And Reduction Firing Processes	Assoc. Prof. Dr. Serap ÜNAL	Süleyman Demirel University TÜRKİYE
The Impact Of Short- And Long-Term Borrowing On Firm Profitability: An Analysis Of The Textile, Clothing, And Leather Sector Using The Ccemg Approach	Lect. Hikmet Ubeyd BOYDAK Lect. Hamza YETİK	Karabuk University TÜRKİYE
Detection Of Boundary Encroachment In Common Areas Of Apartment Communities: A 3d Cadastral Modeling Approach	Assist.Prof.Dr.Gamze BEDİROĞLU	Kilis 7 Aralık University TÜRKİYE
Flood Risk Assessment Using Geographical Information Systems : A Case Study Of Gaziantep City Center	Assist.Prof.Dr.Gamze BEDİROĞLU	Kilis 7 Aralık University TÜRKİYE
Geographic Information Systems (Gis) Based Analysis Of Urban Development And Change: The Case Of Gaziantep	Assist.Prof.Dr.Şevket BEDİROĞLU	Gaziantep University TÜRKİYE
The Relationship Between Spatial Information Systems And Health Research: Future Directions From An Environmental Health Perspective	Assist.Prof.Dr.Şevket BEDİROĞLU	Gaziantep University TÜRKİYE

20.09.2026 / Hall-4, Session-2			
	ANKARA LOCAL TIME		MEETING ID: 863 2474 4546
	10 [30] : 11 [45]		PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Assist.Prof.Dr.Nilay İŞİTEZ

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Neuroleptic Malignant Syndrome: A Case Report	Assoc.Prof.Dr. Ahmet ATLAS	Harran University TÜRKİYE
Acute Calcium Pyrophosphate Crystal Arthritis Mimicking Infection In A Nonagenarian Patient: A Diagnostic Challenge	Uzm. Dr. Hasret DEMİREL	Suleyman Demirel University TÜRKİYE
Evaluation Of The Potential Effect Of Curcumin On Replicative Senescence In Mesenchymal Stem Cells	Assist.Prof.Dr.Nilay İŞİTEZ Assist.Prof.Dr.Hakan DARICI	Afyonkarahisar Health Sciences University TÜRKİYE Istinye University TÜRKİYE
Ergonomic Safety, Constrained Dynamic Scheduling, And Cost-Benefit Analysis In Human-Robot Collaboration (Hrc) Cells	Lect. Dr. Ömer Faruk ALACAHAN	Sivas Cumhuriyet University TÜRKİYE
The Role Of Adiponectin And Piicp İn The Relationship Between Metabolic Syndrome And Osteoarthritis	Ülker HACIYEVA Prof. Dr. Gülnare AZİZOVA Assistant Prof. Dr. Hikmet MEMMEDOV	Azerbaijan Medical University AZERBAIJAN Karabakh University AZERBAIJAN

20.09.2026 / Hall-5, Session-2

ANKARA LOCAL TIME	MEETING ID: 863 2474 4546
10 30 : 12 30	PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Prof. Dr. İbrahim GÖRÜCÜ

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Empirical Trends In Public Administration Research In Ankara: A Bibliometric Analysis Of Postgraduate Theses	Prof. Dr. Selma KARATEPE Assoc. Prof. Dr. A. Muhammet BANAZILI	İstanbul Nişantaşı University TÜRKİYE Tarsus University TÜRKİYE
Rethinking Weberian Bureaucracy: Theoretical Foundations And Contemporary Critiques	Prof. Dr. Selma KARATEPE Assoc. Prof. Dr. A. Muhammet BANAZILI	İstanbul Nişantaşı University TÜRKİYE Tarsus University TÜRKİYE
Trade Union Rights Under Employment Contracts Subject To A Probationary Period In Turkish Labour Law	Prof. Dr. İbrahim GÖRÜCÜ Res. Assist. Mehmet Emin BEKİK	Inonu University TÜRKİYE
Seniority And Employer Liability In The Transfer Of Employment Contracts Under Turkish Labour Law	Prof. Dr. İbrahim GÖRÜCÜ Res. Assist. Mehmet Emin BEKİK	Inonu University TÜRKİYE
The Role Of Innovative Research Methods In Evidence-Based Social Policy Design: The Case Of The London School Of Economics	Prof. Dr. Gözde KOSA	Kafkas University TÜRKİYE
Disciplinary Procedures For Local Administration Officers	Burcu KARA HEMEDOĞLU	Iğdır University TÜRKİYE
A Systematic Map Of Agenda-Setting Research In Türkiye: Level, Method, And Platform Distribution (2020-2026)	Assist.Prof.Dr.İnanç ALİKILIÇ	Muş Alparslan University TÜRKİYE
The Motivational Power Of Money: The Effect Of A Performance-Based Incentive System On Employee Behavior	Cansu CEYHAN Dr. Gökhan DEMİRAY	İstanbul Nişantaşı University TÜRKİYE

20.09.2026 / Hall-6, Session-3

ANKARA LOCAL TIME

11 00 : 13 00

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Assoc.Prof.Dr. Cihan DEMİR

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
A Digital Twin-Based Intrusion Detection System For Industrial Iot: An Autoencoder And Deep Neural Network Fusion Approach	Dr.Uras PANAHI	Artvin Çoruh University TÜRKİYE
Offline Optimization With Artificial Intelligence-Based Digital Twin Models For Erbium-Doped Fiber Amplifiers	Ulviyya ALİYEVA Prof. Dr. Murat YÜCEL	Gazi University TÜRKİYE
Predictors Of Creative And Innovative Work Behaviors In Technopark Firms: Organizational Readiness For Digital Transformation And Entrepreneurial Behavior	Assist.Prof.Dr.Ebru POLAT	Hatay Mustafa Kemal University TÜRKİYE
The Relationship Between Organic Matter And Soil Water Holding Capacity	Prof.Dr.Korkmaz BELLİTÜRK Assoc.Prof.Dr. Cihan DEMİR Prof.Dr.Mehmet Fırat BARAN	Tekirdağ Namık Kemal University TÜRKİYE Kırklareli University TÜRKİYE Siirt University TÜRKİYE
Clustering Of Purchasing Profiles In The Manufacturing Sector Using Unsupervised Learning Algorithms Based On Artificial Neural Networks	Ahmet GÜRGAŞİN	Astor Enerji A.Ş. AR-GE Merkezi TÜRKİYE
Time Series Selection For A Data-Driven Decision Support System: A Comparison Of Arima, Sarima, And Sarimax Models	Ahmet GÜRGAŞİN	Astor Enerji A.Ş. AR-GE Merkezi TÜRKİYE
Comparison Of Small Language Models On Turkish Crowdfunding Data: Language Alignment, Domain-Specific Training With Lora, And The Performance Gap To Large Language Models	Kağan Mert SÜRÜCÜ Kemal ALAYKIRAN	Necmettin Erbakan University TÜRKİYE
Numerical Analysis Of Drag And Wake Dynamics For Different Ahmed Body Rear-End Geometries	Bilge ÖZCAN Assist. Prof. Dr. Barış GÜNGÖRDÜ	Middle East Technical University KKTC

20.09.2026 / Hall-7, Session-3

ANKARA LOCAL TIME

11 00 : 13 00

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Assoc.Prof.Dr.Mevhibe KOBAK DEMİR

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Modeling Basic Origami Folds Using Graph Theory And Its Reflections In Mathematics Education	Assoc.Prof.Dr.Mevhibe KOBAK DEMİR	Balıkesir University TÜRKİYE
Feminine Representation In Visuals Of The 1978 And 1990 Social Studies Textbooks	Assoc.Prof.Dr. Ahmed Emin OSMANOĞLU Şule SÖYLER	Bingöl University TÜRKİYE Ormanardı İlkokulu TÜRKİYE
The Ijāzah Certificates Of The Ottoman ʿulamāʾ	Assoc. Prof. Dr. Esra YILDIZ	Yalova University TÜRKİYE
Key Terms In Ottoman Kadi Court Registers	Assoc. Prof. Dr. Esra YILDIZ	Yalova University TÜRKİYE
Learner Autonomy In 2024 Social Studies Curriculum: A Document Analysis	Dr. Gülşah KIYMIK Assist. Prof. Dr. Abdullah TANTA	Burdur Mehmet Akif Ersoy University TÜRKİYE
Evaluation Of Turkish And Western Historiography On The Legal System Of The Ottoman Empire In The Sixteenth Century	Farman HUSEYNOV	Ankara Yıldırım Beyazıt University TÜRKİYE
Exploring Scanning Electron Microscopy As A High-Resolution Approach For Melissopalynological Identification Of Bee Pollen From Anzer Plateau	Dr.Esra DEMİR KANBUR	Recep Tayyip Erdoğan University TÜRKİYE
Analysis Of The Differences In Shopping Habits Between The Old (Those Born In The 1950s) And New (Those Born After 1999) Generations	Öznur ALTINER Assist.Prof.Dr.Sefa CEYHAN	İstanbul Nişantaşı University TÜRKİYE

20.09.2026 / Hall-8, Session-3

ANKARA LOCAL TIME

11 [00] : 12 [15]

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Assist.Prof.Dr.Aysun Güler KANTER

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Lower-Extremity Muscle Architecture And Morphology In Athletes: A Systematic Review Of Sport-Specific Differences And Associations With Performance	Assist.Prof.Dr.Aysun Güler KANTER	Kilis 7 Aralık University TÜRKİYE
Investıgatıon Of The Relatıonshıp Between Self-Efficacy, Organızatıonal Justıce, And Professıonal Burnout Among Football Coaches	Assoc.Prof.Dr. Ünal SAKİ Arjin YILDIZ	Ağrı İbrahim Çeçen University TÜRKİYE Bitlis Eren University TÜRKİYE
Effects Of Structured Exercise Interventions On Dna Methylation- Based Epigenetic Aging Indicators In Adults	Şener MUTLU	Bursa Uludağ University TÜRKİYE
Bibliometric Analysis Of Global Research Trends On Sarcopenia, Exercise, And Older Adults: A Web Of Science And Vosviewer Study	Assoc.Prof.Dr. Yasemin KAVLAK	Eskisehir Osmangazi University TÜRKİYE
The Effect Of Intratesticular Administration Of Coumestrol And Boric Acid On Testis And Spermatological Quality In Rats	Can TOPALOĞLU Assist.Prof.Dr.Nurdan COŞKUN	Hatay Mustafa Kemal University TÜRKİYE

20.09.2026 / Hall-9, Session-3

ANKARA LOCAL TIME

11 00 : 13 45

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Emel GÖNENÇ GÜLER

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Consumer Attitudes Toward Geographical Indication Food Products: The Case Of Ahlat	Büşra Nur YORULMAZ GÜLER Assist.Prof.Dr.Erol GEÇGİN	Van Yüzüncü Yıl University TÜRKİYE
European Union Cross-Border Cooperation Projects' Contribution To Edirne's Tourism Sector: An Evaluation Through Calls For Proposals And Projects	Prof. Dr. Emel GÖNENÇ GÜLER	Trakya University TÜRKİYE
Economic, Socio-Cultural, And Environmental Contributions Of Turkey-Bulgaria Cross-Border Cooperation Projects To Edirne And Kirklareli Provinces	Prof. Dr. Emel GÖNENÇ GÜLER	Trakya University TÜRKİYE
Temporal Validation And Information Block Contributions In Machine Learning Classification Of Us Commercial Truck Crash Casualties	Lect. Dr. Seçil KULAÇ	Bursa Technical University TÜRKİYE

20.09.2026 / Hall-10, Session-4

ANKARA LOCAL TIME

11 30 : 13 30

MEETING ID: 863 2474 4546

PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Use Of Artificial Intelligence For Medication Adherence Assessment In Patients With Type 2 Diabetes: An Exploratory Study In Morocco Using Chatgpt And The Validated General Medication Adherence Scale	Maryem Arraji Mohamed Khalis Mohamed Chahboune	Mohammed VI University MOROCCO
Numerical Solver Impact On The Accuracy Of Five-Parameter Photovoltaic Single-Diode Model Identification	Ayoub LAHBOUB Fatima Ezzahrae SOUAIDI Imade CHOULLI Abdelfattah ELHAMMOUDY Ismail ABAZINE Brahim El FAHMI	Ibn Zohr University MOROCCO
Teaching And Learning Of Written Production In Grade 10 In Guinea: Practices And Challenges	Mahuton Géoffroy DJESSOU Saba ZOUMANIGUI	Institut Supérieur des Sciences de l'Education de Guinée (ISSEG), Guinée Conakry
From Transit Corridor To Ecological Corridor:Developing A Green Urban Spine Framework For Biodiversity Conservation And Climate-Responsive Urbanism In Lahore	Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti Ar. Usman Raza Kazmi Ar. Ar. Naveed ur Rehman Anwar Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran Ar. Rabia Shahbaz	Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning PAKISTAN
The Spatial Dynamics Of Social Capital: A Systematic Literature Review On Urban Form, Neighbourhood Design, And Community Cohesion	Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti Ar. Dr. Zulfiqar Ali Tariq Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran, Dr. Syed Hamid Arshad	Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning PAKISTAN
Governing Road Safety In Urban South Asia: Public Perceptions And Policy Strategies For Animal–Vehicle Collisions In Lahore, Pakistan.	Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran Ar. Fahad Khan Ar. Kabeer Ud Din Naseer	Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning PAKISTAN
Mitigating Urban Fragmentation: A Comparative Assessment Of Green Bridging For Peri-Urban Landscape Resilience.	Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran Ar. Rashid Ali Khan Ar. Naveed ur Rehman Anwar Ar. Alishpa Naveed	Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning PAKISTAN
The Role Of International Funding Sources İn Preserving Human Heritage: Jordan As A Case Study	Faisal Hussein Amani Kamal Kanani	Hashemite University JORDAN

20.09.2026 / Hall-11, Session-4			
	ANKARA LOCAL TIME		MEETING ID: 863 2474 4546
	11 30 : 13 30		PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Prof. Bledar KRAJA

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Synchronizing Human Factors In Digital Transformation At Universities In Vietnam:Perspectives From Lecturers And Students	MA. Tran Thi Thanh Hang	Thu Dau Mot University VIETNAM
The Banque De L'ndochina: The "Soul" Of French Financial Imperialism (1875 - 1945)	Dr. Duong To Quoc THAI	Dong Thap University VIETNAM
The Impact Of Banque De L'Indochine On The Development Of Port Cities In Vietnam (1875-1945)	Dr. Duong To Quoc THAI	Dong Thap University VIETNAM
Capital Flow From Banque De L'indochine To French Plantation Companies (1875-1945)	Dr. Duong To Quoc THAI	Dong Thap University VIETNAM
Military Posts And Garrison Settlements In The Hau River Borderland Under The Nguyen Dynasty (1802-1867)	Dr. Duong To Quoc THAI	Dong Thap University VIETNAM
The Role Of General Thoai Ngoc Hau (1761-1829) In Protecting The Southwestern Borderlands	Dr. Duong To Quoc THAI	Dong Thap University VIETNAM
"Rational Design, Synthesis And Biological Evaluation Of Functionalized Coumarin-3-Carboxamide Derivatives For Potential Therapeutic Applications"	Ummy Rubab Muhammad Ibrahim	Government College University PAKISTAN
Lifestyle And Environmental Factors In Pancreatic Cancer Risk: Current Epidemiological Evidence	Prof. Bledar KRAJA, MD, PhD	University of Medicine Tirana ALBANIA

20.09.2026 / Hall-12, Session-4			
	ANKARA LOCAL TIME		MEETING ID: 863 2474 4546
	11 30 : 13 30		PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Prof.Dr.Mohammed Waheeb

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
The Scientific Discussion Of Key Issue Features Of The Evolving And Transformative Role Of Pharmacists In Georgia: Career Pathways, Systemic Influences, Professional Development, Educational, Clinical, Leadership, Innovation And Multidisciplinary Challenges Perspectives	Nodar Sulashvili, Diego Rada Fernandez de Jauregui, Maia (Maka) Advadze , Nato Alavidze, Ketevani Gabunia , Lali Patsia Ada (Adel) Tadevosyan,Vira Kravchenko Lela Grigolia , Kakhaber Robakidze, Olga Shapoval,Marika Sulashvili, Igor Seniuk, Nino Abuladze,Marina Giorgobiani ,Giorgi Pkhakadze	BAU International University GEORGIA
Scientific Discourse On Learning Outcomes-Oriented Teaching In Higher Education Institutions And Universities: A Comprehensive Methodology For The Development, Alignment, And Assessment Of Learning Outcomes For The Enhancement Of Higher Educational Quality	Nodar Sulashvili, Maka Buleishvili, Mariam Darbaidze, Margarita Beglaryan, Nana Gorgaslidze, Irina Imerlishvili , Marina Giorgobiani, Nato Alavidze, Nino Abuladze,Ketevani Gabunia, Marika Sulashvili, Diego Rada Fernandez de Jauregui, Igor Seniuk, Vira Kravchenko , Olga Shapoval, Otar Gerzmava	BAU International University GEORGIA
Contemporary Scientific Frontiers And Innovative Translational Paradigms In Agriculture And Veterinary Sciences: Advancing Sustainable Agroecosystems, Precision Production, Animal Health And Welfare, Biotechnological Innovation, Food Security, Ecological Integrity, Climate Resilience, And One Health	Nodar Sulashvili , Irina Imerlishvili , Margarita Beglaryan, Diego Rada Fernandez de Jauregui, Maka Buleishvili, Mariam Darbaidze, Nato Alavidze, Lali Patsia,Ada (Adel) Tadevosyan, Vira Kravchenko, Zaza Khachiperadze, Olga Shapoval, Igor Seniuk , Marika Sulashvili, Nana Gorgaslidze, Marina Giorgobiani , Giorgi Pkhakadze, Nino Abuladze, Ketevani Gabunia , Otar Gerzmava	BAU International University GEORGIA
The Role Of Official And Private Governmental Institutions In The Arab And Islamic Worlds In Supporting Azerbaijan's Efforts To Protect The Heritage Of The Western Azerbaijan Community	Prof.Dr.Mohammed Waheeb	The Hashemite University JORDAN
"Indole-3-Butyric Acid-Based Hydrazones As Emerging Antibacterial And Antioxidant Agents: A Combined Experimental And In Silico Approach"	Ummy Rubab Dr.Muhammad Ibrahim Irfa Sakandar	Government College University PAKISTAN
Enhancing Social Safety Nets in Pakistan A Quasi-Experimental Impact Assessment of BISP Dynamic Registry Reforms and Productive Asset Graduation Models	DR. MUHAMMAD FAISAL	Allama Iqbal Open University PAKISTAN
AI-Native Digital Public Infrastructure And The National Government AI Platform	DR. MUHAMMAD FAISAL	Allama Iqbal Open University PAKISTAN
Iot Based Solar Power Smart Irrigation System	Joshna Sherlyn p Dr.Nixon Samuel Vijayakumar	R.M.K. Engineering College
AI-Driven Adaptive Modulation And Coding For Dynamic Wireless Channels	Suji S Praveen Kumar S	R.M.K. Engineering College INDIA

20.09.2026 / Hall-13, Session-4			
	ANKARA LOCAL TIME		MEETING ID: 863 2474 4546
	11 30 : 13 30		PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Prof.Dr. Deilton RIBEIRO BRASIL

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Effect Of Co-Digestion Of Cow Dung With Cassava Wastewater On Biogas Production	ITUA UYIOSENOBUA BUSAYO OYEBOLA OREOLUWA ELIZABETH ALONGE-NIYI OREOLUWA	College of Environmental Resources Management Osun state University
Structure–Property Correlations In Eu 3+ -Doped Strontium Phosphate Glasses For Photonic And Photovoltaic Applications	El Mahdi Bouabdalli Mohamed El Jouad Samira Touhtouh Ilyass El kadmiri Nathalie Gaumer Mostapha Siniti Abdelowahed Hajjaji	Sidi Mohamed Ben Abdellah University MOROCCO Chouaib Doukkali University MOROCCO University Mohamed First Oujda MOROCCO
Multiphysics–Judd–Ofelt Engineering Of High-Efficiency Red Luminescence In Eu 3+ -Doped Silicophosphate Sol–Gel Glasses	El Mahdi Bouabdalli Mohamed El Jouad Samira Touhtouh Fouad Belhora Nathalie Gaumer El Kebir Hlil Abdelowahed Hajjaji	Sidi Mohamed Ben Abdellah University MOROCCO Chouaib Doukkali University MOROCCO University Mohamed First Oujda MOROCCO
Artificial Intelligence-Driven Educational Management: Transforming Institutional Leadership, Decision-Making And Educational Outcomes	Oluwakemi Racheal OSHINOWO Moses Adeolu AGOI Benjamin Oghomena OMOROJOR Oluwanifemi Opeyemi AGOI	Obafemi Awolowo University NIGERIA
Computational Evaluation Of Ruthenium Complexes As Sensitizers For Solar Cells	Said Kerraj Mohamed elmamouni Mohamed Moussaoui	Ben M'Sik, Hassan II University MOROCCO Mohammed VI Polytechnic University MOROCCO
Arene Ligand Engineering in Chromium Half-Sandwich Complexes toward Enhanced Dye-Sensitized Solar Cell Performance	Said Kerraj Mohamed elmamouni Mohamed Moussaoui	Ben M'Sik, Hassan II University MOROCCO Mohammed VI Polytechnic University MOROCCO
Artificial Intelligence And Machine Learning In Pharmaceutical Quality Assurance: Applications, Challenges And Future Perspectives	Bornare Ashwini	JES's SND College of Pharmacy INDIA
Climate Stability As An Essential Dimension Of The Autonomous Human Right To A Healthy Climate: An Analysis Of Advisory Opinion Oc-32/25 Of The Inter-American Court Of Human Rights	Prof.Dr. Deilton RIBEIRO BRASIL	University of Itaúna (UIT)

20.09.2026 / Hall-14, Session-5			
	ANKARA LOCAL TIME		MEETING ID: 863 2474 4546
	12 00 : 14 00		PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Prof Dr Ivan PAVLOVIĆ

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Fiscal Federalism And School Education: A Comparative Study Of Educational Infrastructure And Spending Capacities In Northern And Southern India	Abhay Goel Anisha Tigga Ashwajit Gaikwad Dorshita Phukan Kashvi Bareja Md. Shahanur Hosen Pushkar Sharma Shreya Sikdar Vanshika Jindal	Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University
Climate Change And The Ageing Mind: A Review Of Eco-Anxiety And Environmental Distress Among Older Adults	Dr. Priya Choudhary Dr Pallavi Sachdeva	University of Jammu INDIA
Iportance Of Trichostrongylus Axei In Cattle Pathology	Prof Dr Ivan PAVLOVIĆ Prof Dr Jovan BOJKOVSKI MSc Ivanka HADŽIĆ Prof Dr Vesna KARAPETKOVSKA HRISTOVA	Medicine of SERBIA University "St. Kliment Ohridski" MACEDONIA
Mobility Transitions, Diaspora Return And Circulatory Living Between Albania, Greece And North Macedonia	MARCELA MELE HERMIS MELE	University Aleksandër Moisiu of Durrës ALBANIA
Optimizing Nitrogen Fertilization To Balance Agricultural Productivity And Environmental Protection	ELABBARI Chaimaa Pr. Labjar Najoua Pr.EL Hajjaji souad	Mohammed V University MOROCCO
Therapeutic Importance Of Camel Milk In Enhancing White Blood Cell Levels And Immune Function	Dr.Tasawar Iqbal Sidra Altaf	University of Agriculture PAKISTAN
Plant-Derived Bioactive Compounds For Testosterone Regulation: Mechanisms And Potential Benefits	Tasawar Iqbal	University of Agriculture PAKISTAN
Image-Informed In Silico Modeling Of Glioblastoma Multiforme:Coupling Brats2020 Mri Segmentation With Compucell3d Cellular Potts-Based Vascular Tumor Growth Dynamics	By Richard Shinkut Prof. Awojoyogbe O. Bamidele Dr. Dada O. Michael Prof. Olarinoye I. Oyeleke Saba I. David	Federal university of technology NIGERIA
Biosynthesis of nanoparticles from green waste and their application in wastewater treatment	HAFID Mohammed SAUFI Hamid EL HERRADI El Hassania	Faculté des Sciences de Rabat

20.09.2026 / Hall-15, Session-5			
	ANKARA LOCAL TIME		MEETING ID: 863 2474 4546
	12 ^{00} : 14 ^{00}		PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Prof. Bledar KRAJA, MD, PhD

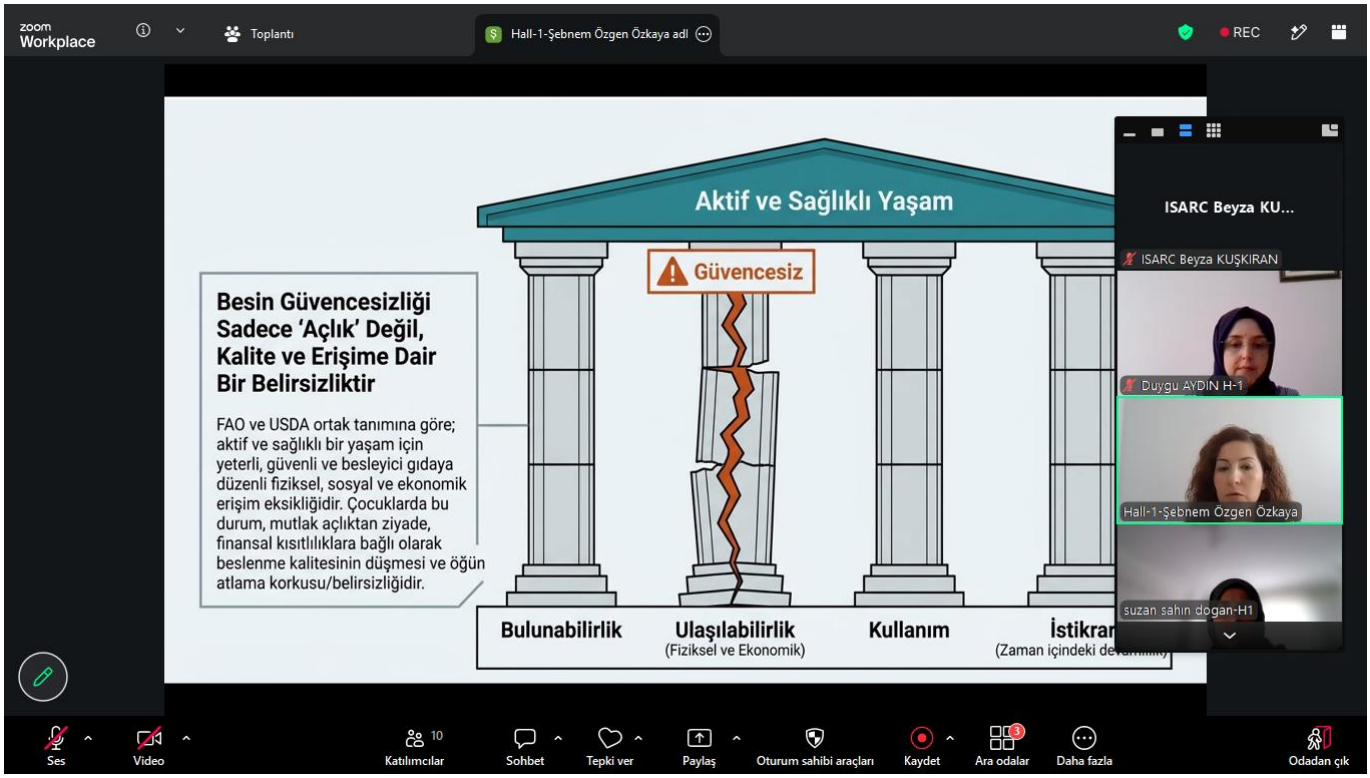
TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Phenotype-Specific Association Between Circulating ANGPTL3 and Body Mass Index in Women with Polycystic Ovary Syndrome	Rahman Mohammadi Akram Vatannejad Asma Kheirollahi	University of Tehran IRAN
Assessment Of L-Serine And S-Adenosylmethionine Co-Supplementation On Hepatic Oxidative Status In A Streptozotocin-Induced Diabetic Rat Model	Rahman Mohammadi Akram Vatannejad Asma Kheirollahi	University of Tehran IRAN
Unconditional Cash Transfers To Women By States: Impact On The Fiscal Health Of The Country	BHUVI ARYA MR. MOHIUDDIN SIDDIQUI	SHARDA UNIVERSITY INDIA
On A New Class Of Neutrosophic Nano Closed Sets In Eutrophication Nano Topological Spaces	K. MARUTHAMUTHU C. INBAM CHANDRASEKAR	Sri Meenakshi Government Arts College for Women INDIA
Assessment Of The Impact Of Agricultural Development Strategies In Nigeria: A Socio-Spartial Appraisal	OLUDIPE B B ODULATE L.O OPEIFA D	-
Practical Experience Of Other States In Preventing And Combating Illicit Enrichment	Banescu-Sufana CORNEL NICOLAE Vatamanita MARIANA	University of European Studies of MOLDOVA
The Essence Of Unjustified Enrichment And Forms Of Legal Liability In Europe. Legal Regulation Of Illicit Enrichment Under The Legislation Of The Republic Of Moldova. Competences Of Law Enforcement Bodies	Banescu-Sufana CORNEL NICOLAE Vatamanita MARIANA	University of European Studies of MOLDOVA
Ai Rules In A Globalized World	Roxana Mihaela Moisoiu	Prof Colegiul German Goethe București, ROMÂNIA
Dietary Fiber In Gastrointestinal Disorders: A Systematic Review Of Physiological Mechanisms, Clinical Applications, And Emerging Evidence	Prof. Bledar KRAJA, MD, PhD	University Hospital Center “Mother Teresa” ALBANIA

20.09.2026 / Hall-16, Session-5			
	ANKARA LOCAL TIME		MEETING ID: 863 2474 4546
	12 00 : 14 00		PASSCODE: 327875

HEAD OF SESSION: Dr. Rajkumar Dewani

TOPIC TITLE	AUTHORS	AFFILIATION
Extraction Of Protein From Leather Wastes And Its Reutilization For Value-Added Applications In Pakistan	Dr.Beena Zehra Dr. Hafiz Rub Nawaz Tahira Ayaz Dr. Rajkumar Dewani	South Avenue, Karachi PAKISTAN
Features Of Renal And Lumbar Hemodynamics During Muscle Contraction And After Coffee Intake In Students	Ruslan SHEVERDIN Victor KAZAKEVICH	Belarusian State University BELARUS
The Problem Of Microplastics In Environmental Medicine	Mariami Managadze	Tbilisi State Medical University GEORGIA
Breast Cancer Metastasis: Molecular Mechanisms And Emerging Therapeutic Strategies	Maroua RIAD Ahmad AL-SHAMI Jamal MABROUKI	Mohammed V University MOROCCO
Collection And Assessment Of Electronic Evidence In Vietnamese Civil Proceedings: A Comparative Study With Chinese Law And Recommendations For Legal Improvement	PHAN THỊ CHÁNH LÝ	Tra Vinh University VIETNAM
New Challenge In The Education System Using Machine Learning Algorithms	Inga Abuladze Irakli Megrelishvili	Business and Technology University GEORGIA Georgian Technical University GEORGIA
Temporal Variations In Sleep Quality, Somnolence, And Cognitive Performance During Ramadan: A Prospective Longitudinal Study	Dr Sarah Shahid	Khyber Girls Medical College PAKSITAN
Effects Of Cymbopogon Citratus (Lemongrass) Methanol Extract On Liver Function And Lactate Dehydrogenase Activity In Albino Rats	Okechukwu, C. O. Tawariowei, M. A.	Department of Science Laboratory Technology NIGERIA
Evaluation Of The In Vitro Antioxidant Parameters Of Cymbopogon Citratus (Lemongrass) Methanol Extract	Okechukwu, C. O. Okocha, B. I.	Department of Science Laboratory Technology NIGERIA
Digital Twin Technology In Pharmaceutical Manufacturing	Meenatchi.S , Devadharshini.R, Swathi.R , Keerthana. V, Kishore. R	Bharath Institute Of Higher Education And Research INDIA
Quantum Charging, Ergotropy, And Correlations In A Double-Quantum-Dot Battery Under 1/F Charge Noise	KHALIL LOUKHSSAMI	-
Integrated Geoelectrical Characterization And Evaluation Of Subsurface Resistivity Distribution Using Vertical Electrical Sounding In A Tropical Basement Complex Terrain: A Case Study Of Igem City, Alakia–Adegbayi, Ibadan, Southwestern Nigeria	Owoyemi, S. I.	Adeyemi Federal University NIGERIA

PHOTO GALLERY



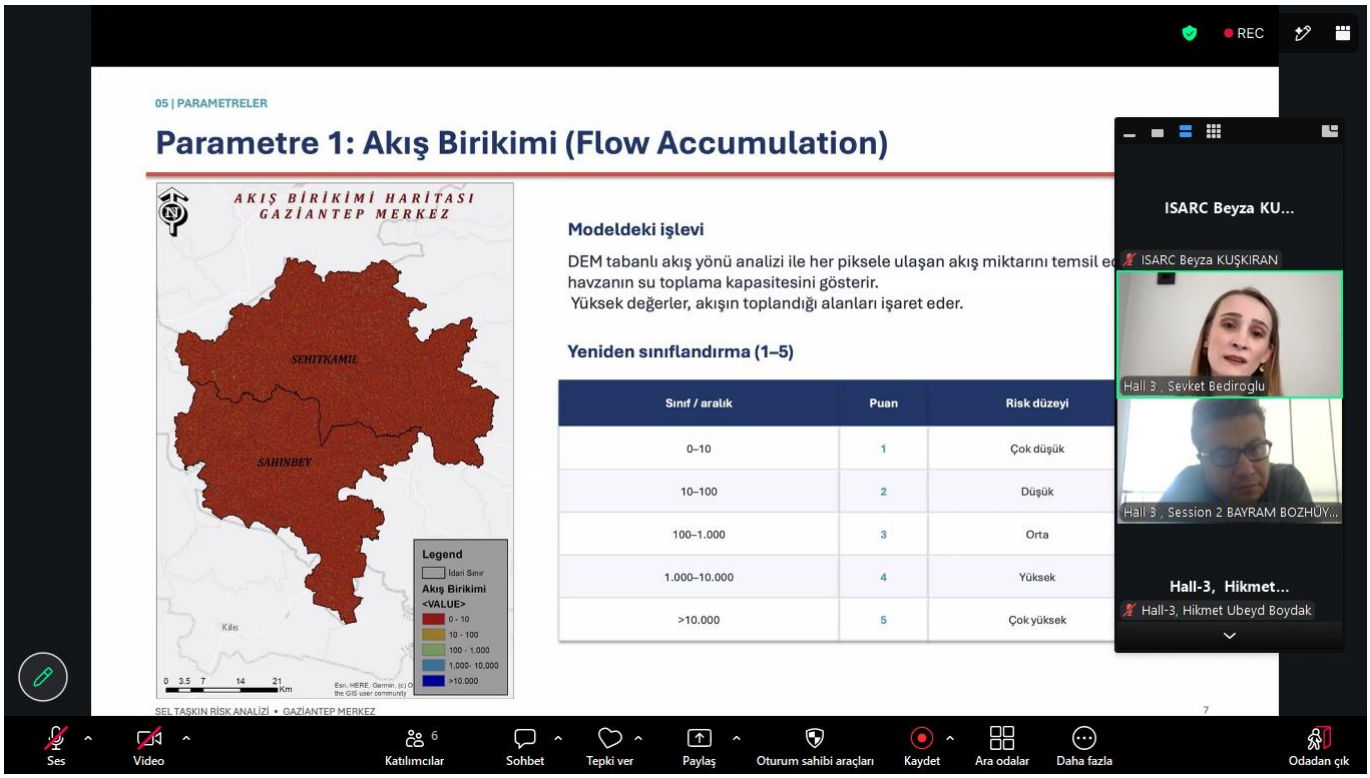
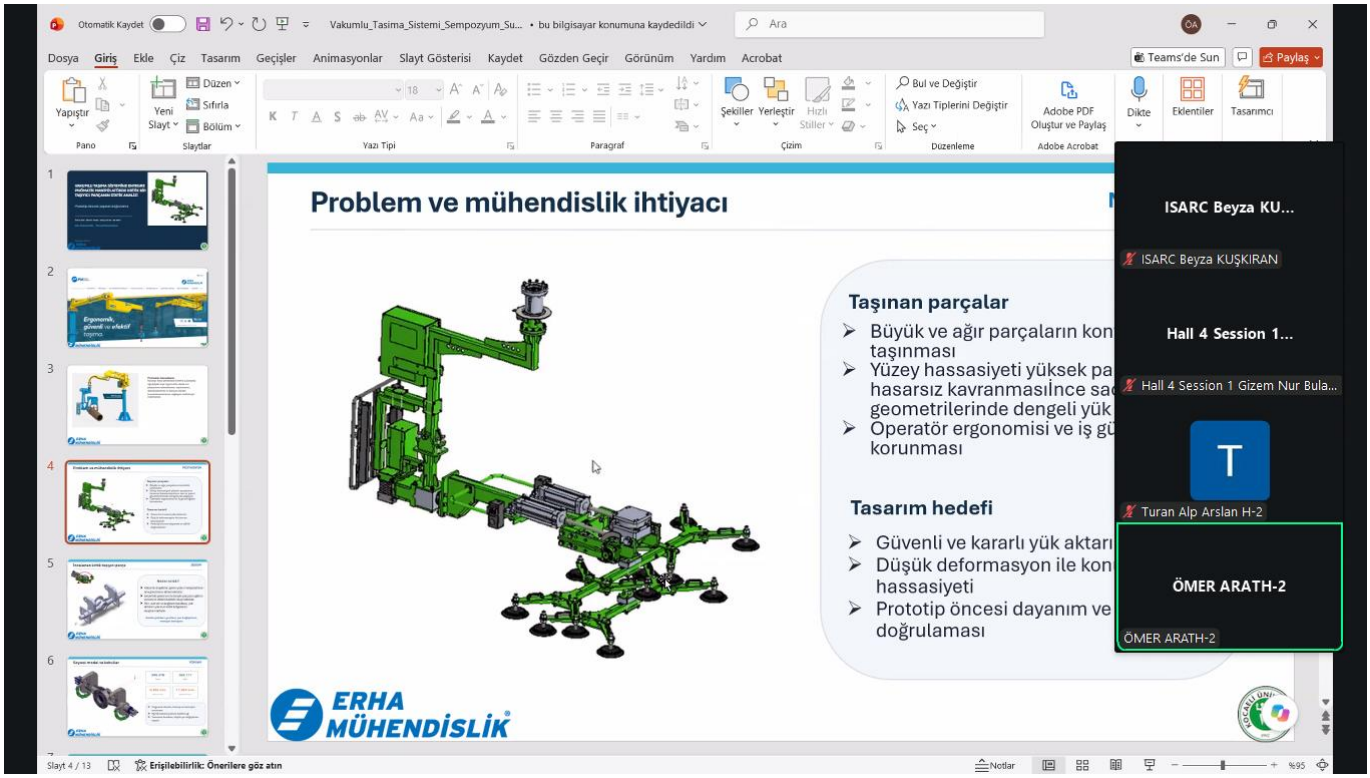


PHOTO GALLERY



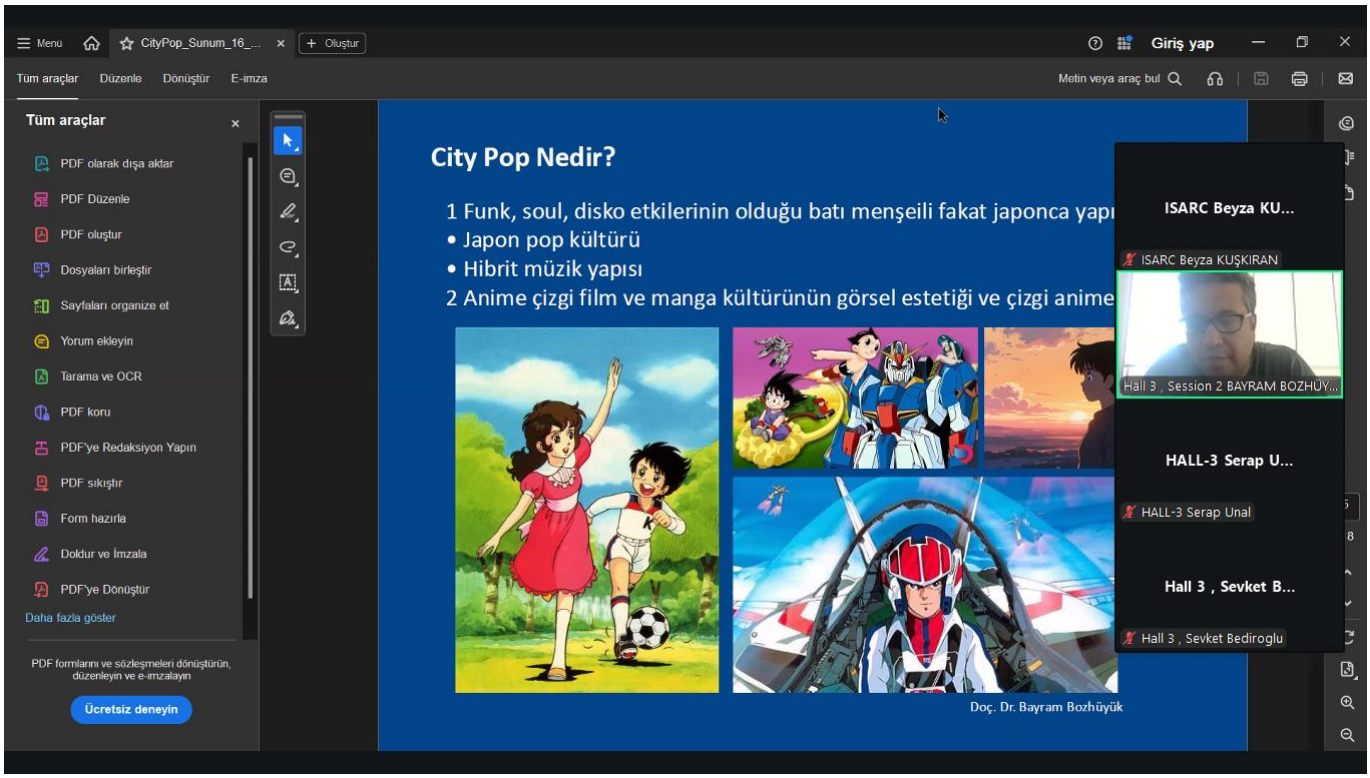
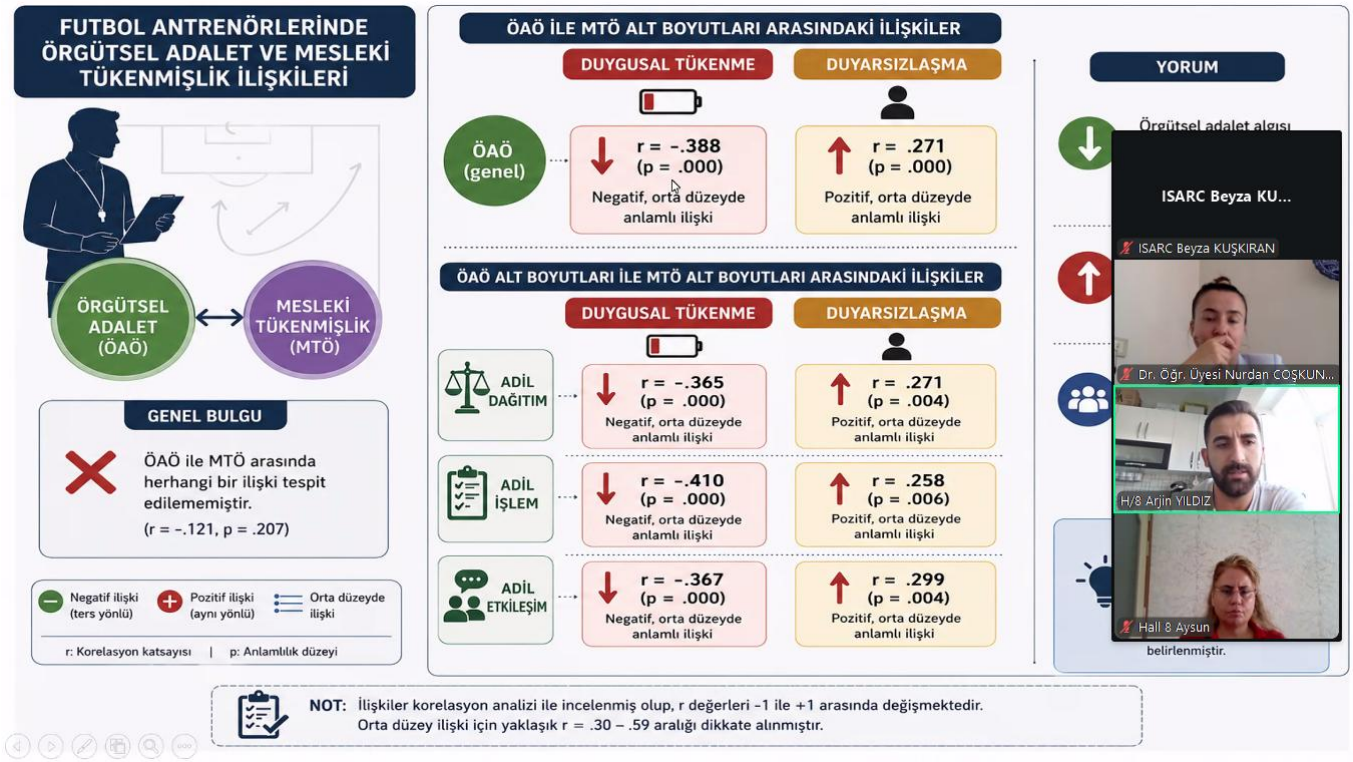


PHOTO GALLERY



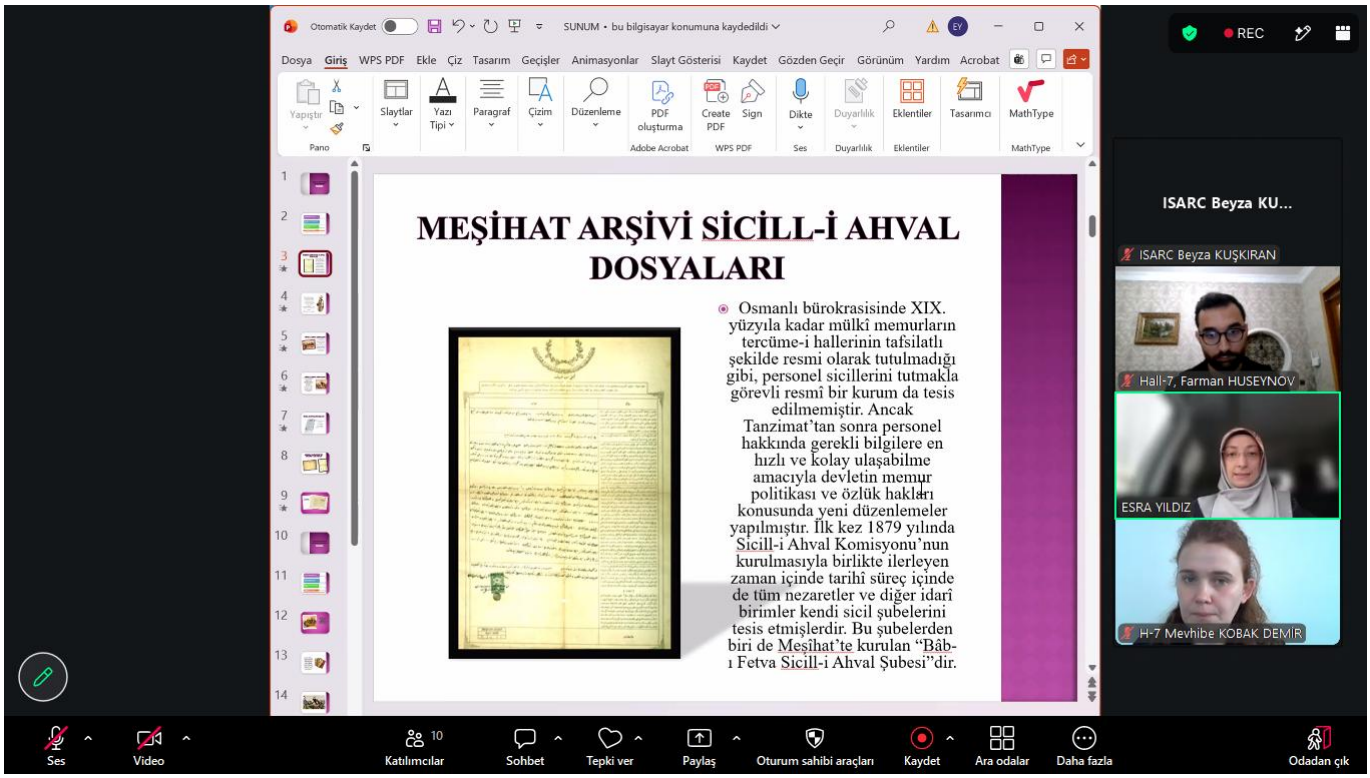
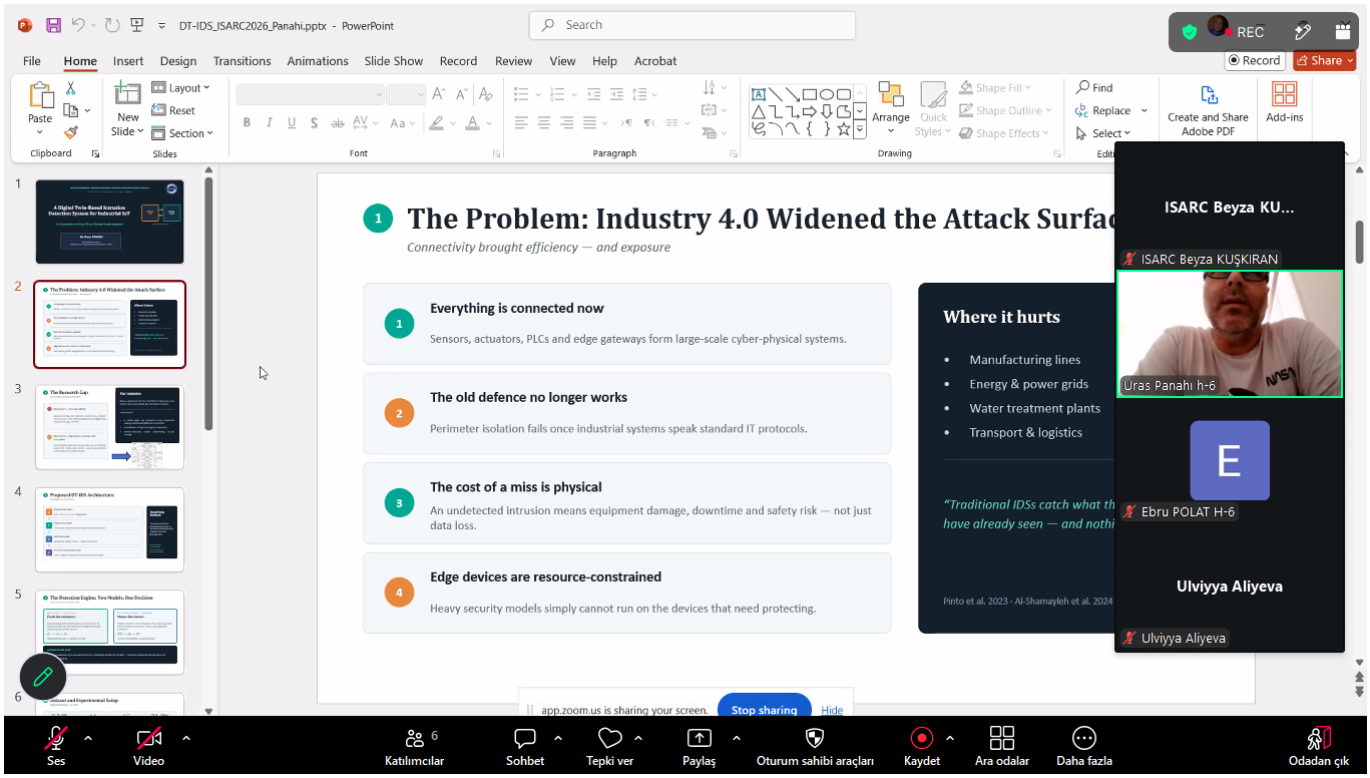


PHOTO GALLERY





INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

KONU:KONGRE KATILIMCI BİLGİSİ **30.09.2026**

İLGİLİ MAKAMA

5. ULUSLARARASI AVRASYA BİLİMSELARAŞTIRMALAR VE İNOVASYON KONGRESİ 19-20 EYLÜL 2026 tarihleri arasında ANKARA'da ve online olarak 17 farklı ülkeden (Türkiye:60 ve diğer Ülkeler:65; Toplam:125 akademisyen/araştırmacıların katılımı ile gerçekleşmiştir. Kongre, 16 Ocak 2020 Akademik Teşvik Ödeneği Yönetmeliğine getirilen '' Tebliğlerin sunulduğu yurt içinde veya yurtdışındaki etkinliğin uluslararası olarak nitelendirilebilmesi için Türkiye dışından en az 5 ülkeden farklı tebliğ sunan konuşmacının katılım sağlaması ve tebliğlerin yarıdan fazlasının Türkiye dışından katılımcılar tarafından sunulması esastır. '' Değişikliğine ve doçentlik kriterlerine uygun olarak düzenlenmiştir uygun düzenlenmiştir. Bilgilerinize arz edilir.

Saygılarımla

Sefa Salih BİLDİRİCİ
HEAD OF İSARC

NOTIFICATIONS

AUTHOR	TITLE	No
Burcu KARA HEMEDOĞLU	DISCIPLINARY PROCEDURES FOR LOCAL ADMINISTRATION OFFICERS	1-8
Ahmed Emin OSMANOĞLU Şule SÖYLER	FEMININE REPRESENTATION IN VISUALS OF THE 1978 AND 1990 SOCIAL STUDIES TEXTBOOKS	9-22
Gülşah KIYMIK Abdullah TANTA	LEARNER AUTONOMY IN 2024 SOCIAL STUDIES CURRICULUM: A DOCUMENT ANALYSIS	23-34
Şevval ÖZKAL Barış KAHVECİ Nuriye Ebru YILDIZ	THE CONCEPT IN LANDSCAPE DESIGN: DEFINITION, PROCESS, AND ITS IMPLICATIONS FOR DESIGN	35-57
Mevhibe KOBAK DEMİR	MODELING BASIC ORIGAMI FOLDS USING GRAPH THEORY AND ITS REFLECTIONS IN MATHEMATICS EDUCATION	58-67
Ensar Baki Farman HUSEYNOV	AN EVALUATION OF TURKISH AND WESTERN HISTORIOGRAPHY REGARDING THE LEGAL SYSTEM OF THE OTTOMAN EMPIRE IN THE 16TH CENTURY	68-77
Gamze BEDİROĞLU	FLOOD RISK ASSESSMENT USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS: A CASE STUDY OF GAZIANTEP CITY CENTER	78-87
Suzan ŞAHİN DOĞAN	EXPLORING RESISTOME PROFILES IN HEALTHY AND DISEASED MAIZE RHIZOSPHERES USING SHOTGUN METAGENOMIC DATA	88-94
Suzan ŞAHİN DOĞAN Mustafa ÇİÇEK Duygu AYDIN Meliha Kutluca Alıcı Aytaç KOCABAŞ	MOLECULAR DOCKING AND IN SILICO ADME PROFILING OF HQM, AN 8-HYDROXYQUINOLINE SCHIFF BASE, AGAINST BRAF KINASE	95-106
Büşra Nur YORULMAZ GÜLER Erol GEÇGİN	CONSUMER ATTITUDES TOWARD GEOGRAPHICAL INDICATION FOOD PRODUCTS: THE CASE OF AHLAT	107-132
Burhan Şahin Gamze Erkan Fatma Miray Öztürk Sabiha Ecem Yılmaz	AURA: AN ADAPTIVE COCKPIT INTERFACE DESIGNED TO REDUCE PILOT COGNITIVE WORKLOAD THROUGH EXPLAINABLE DECISION SUPPORT	133-149
Bilge ÖZCAN Barış GÜNGÖRDÜ	NUMERICAL ANALYSIS OF DRAG AND WAKE DYNAMICS FOR DIFFERENT AHMED BODY REAR-END GEOMETRIES	150-158
Tuğba ALTINDAĞ	DETERMINATION OF OPPOSITE GROUPS IN SOCIAL NETWORKS USING DATA MINING	159-165
Ahmet GÜRGAŞİN	CLUSTERING OF PURCHASING PROFILES IN THE MANUFACTURING SECTOR USING UNSUPERVISED LEARNING ALGORITHMS BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS	166-171
Ahmet GÜRGAŞİN	TIME SERIES SELECTION FOR A DATA-DRIVEN DECISION SUPPORT SYSTEM: A COMPARISON OF ARIMA, SARIMA AND SARIMAX MODELS	172-177
Aysun GÜLER KANTER	LOWER-EXTREMITY MUSCLE ARCHITECTURE AND MORPHOLOGY IN ATHLETES: A SYSTEMATIC REVIEW OF SPORT-SPECIFIC DIFFERENCES AND ASSOCIATIONS WITH PERFORMANCE	178-198
Şevket BEDİROĞLU	GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) BASED ANALYSIS OF URBAN DEVELOPMENT AND CHANGE: THE CASE OF GAZİANTEP	199-208
Ulviyya ALİYEVA Murat YÜCEL	OFFLINE OPTIMIZATION WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED DIGITAL TWIN MODELS FOR ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIERS	209-214
Ahmet ATLAS	NEUROLEPTIC MALIGNANT SYNDROME: A CASE REPORT	215-220
İbrahim PAZARKAYA	BIBLIOMETRIC PROFILE OF FLOWMETER RESEARCH: TRENDS, AUTHORS, AND TECHNOLOGICAL CLUSTERS	221-231
İbrahim PAZARKAYA	PREDICTION OF TOTAL CUTTING FORCE IN TURNING OPERATIONS USING MACHINE LEARNING: A SUPPORT VECTOR REGRESSION (SVR) MODEL AND PARAMETRIC ANALYSIS	232-240
Esra YILDIZ	THE IJĀZAH CERTİFİCATES OF THE OTTOMAN ʿULAMĀʾ	241-251
Esra YILDIZ	KEY TERMS IN OTTOMAN KADI COURT REGISTERS	252-260
Serap ÜNAL	BLACK CERAMICS FROM ANTIQUITY TO CONTEMPORARY ART: SYNTHESIS OF VOLCANIC ROCK ADDITION AND REDUCTION FIRING PROCESSES	261-272
Turan Alp ARSLAN	PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL RESEARCH FROM 2000 TO 2025: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS	273-286

Selin COŞKUN Tuğba Selcen NAVRUZ	YOLOV8N-SEG-BASED DYNAMIC OBJECT MASKING APPROACH FOR MONOCULAR VISUAL SLAM ON EMBEDDED PLATFORMS USING GAZEBO SIMULATION	287-296
İbrahim GÖRÜCÜ Mehmet Emin BEKİK	SENIORITY AND EMPLOYER LIABILITY IN THE TRANSFER OF EMPLOYMENT CONTRACTS UNDER TURKISH LABOUR LAW	297-301
İbrahim GÖRÜCÜ Mehmet Emin BEKİK	TRADE UNION RIGHTS UNDER EMPLOYMENT CONTRACTS SUBJECT TO A PROBATIONARY PERIOD IN TURKISH LABOUR LAW	302-306
Uras PANAHI	A DIGITAL TWIN-BASED INTRUSION DETECTION SYSTEM FOR INDUSTRIAL IOT: AN AUTOENCODER AND DEEP NEURAL NETWORK FUSION APPROACH	307-315
Ebru POLAT	PREDICTORS OF CREATIVE AND INNOVATIVE WORK BEHAVIORS IN TECHNOPARK FIRMS: ORGANIZATIONAL READINESS FOR DIGITAL TRANSFORMATION AND ENTREPRENEURIAL BEHAVIOR	316-326
Hamiyet KIZIL Halime TAMİNCE	MISSED NURSING CARE IN EMERGENCY DEPARTMENTS: ITS IMPACT ON PATIENT SAFETY AND PREVENTIVE STRATEGIES	327-334
Hikmet Ubeyd BOYDAK Hamza YETİK	THE IMPACT OF SHORT- AND LONG-TERM BORROWING ON FIRM PROFITABILITY: AN ANALYSIS OF THE TEXTILE, CLOTHING, AND LEATHER SECTOR USING THE CCEMG APPROACH	335-346
Emel GÖNENÇ GÜLER	ECONOMIC, SOCIO-CULTURAL, AND ENVIRONMENTAL CONTRIBUTIONS OF TURKEY-BULGARIA CROSS-BORDER COOPERATION PROJECTS TO EDIRNE AND KIRKLARELI PROVINCES	347-351
Emel GÖNENÇ GÜLER	EUROPEAN UNION CROSS-BORDER COOPERATION PROJECTS' CONTRIBUTION TO EDIRNE'S TOURISM SECTOR: AN EVALUATION THROUGH CALLS FOR PROPOSALS AND PROJECTS	352-358
Ömer ARAT Ahmet DURAN Barış ERMAN Ali KİBAR	STATIC ANALYSIS OF A CRITICAL LOAD-BEARING COMPONENT IN A PNEUMATIC MANIPULATOR INTEGRATED WITH A VACUUM HANDLING SYSTEM	359-369
Seçil KULAÇ	TEMPORAL VALIDATION AND INFORMATION-BLOCK CONTRIBUTIONS IN MACHINE LEARNING CLASSIFICATION OF CASUALTY OUTCOMES IN UNITED STATES COMMERCIAL TRUCK CRASHES	370-379
Ömer Faruk ALACAHAN	ERGONOMIC SAFETY, CONSTRAINED DYNAMIC SCHEDULING, AND COST-BENEFIT ANALYSIS IN HUMAN-ROBOT COLLABORATION (HRC) CELLS	380-388
Selma KARATEPE A. Muhammet BANAZILI	EMPIRICAL TRENDS IN PUBLIC ADMINISTRATION RESEARCH IN ANKARA: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF POSTGRADUATE THESES	389-406
Selma KARATEPE A. Muhammet BANAZILI	RETHINKING WEBERIAN BUREAUCRACY: THEORETICAL FOUNDATIONS AND CONTEMPORARY CRITIQUES	407-418
Bayram BOZHÜYÜK	THE REPRODUCTION OF 1980S AESTHETICS IN THE DIGITAL AGE THROUGH CITY POP AND VISUAL NOSTALGIA	419-431
Şener Mutlu	EFFECTS OF STRUCTURED EXERCISE INTERVENTIONS ON DNA METHYLATION-BASED EPIGENETIC AGING IN ADULTS	432-442
Korkmaz BELLİTÜRK Cihan DEMİR Mehmet Fırat BARAN	THE RELATIONSHIP BETWEEN ORGANIC MATTER AND SOIL WATER HOLDING CAPACITY	443-447
Hamiyet KIZIL Rabia EREN Halime TAMİNCE	THE RELATIONSHIP BETWEEN ACADEMIC SELF-EFFICACY AND ATTITUDES TOWARD ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NURSING STUDENTS	448-449
Hilal BÜYÜKTOPAÇ ÇAKICI Simge ÖZTÜRK Ezgi AVCI Züleyha BALCI Halime KAHRAMAN Sohbet PİRLİYAV	THE RELATIONSHIP BETWEEN SCREEN ADDICTION, DIGITAL BURNOUT, AND EXPOSURE TO SEXUAL VIOLENCE AMONG UNIVERSITY STUDENTS: A CROSS-SECTIONAL STUDY	450-451
Abdulkadir GÜL	ULTRASOUND-ASSISTED AQUEOUS EXTRACTION OF OLEASTER FRUIT AND EVALUATION OF ITS ANTIBACTERIAL ACTIVITY	452-453
Ömer Faruk ŞAHİN Bekir TUNÇ Mağruf İlkay Yapakçı	SURGICAL SITE INFECTION AND INSTRUMENTATION FAILURE FOLLOWING POSTERIOR CERVICAL DECOMPRESSION AND INSTRUMENTATION: A CASE REPORT	454-455

Şebnem ÖZGEN ÖZKAYA	THE EFFECTS OF FOOD INSECURITY ON DIETARY QUALITY, EATING BEHAVIORS, AND HEALTH IN CHILDREN AND ADOLESCENT	456-457
Ünal SAKİ Arjin YILDIZ	INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SELF-EFFICACY, ORGANIZATIONAL JUSTICE, AND PROFESSIONAL BURNOUT AMONG FOOTBALL COACHES	458-459
Can TOPALOĞLU Nurdan COŞKUN	THE EFFECT OF INTRATESTICULAR ADMINISTRATION OF COUMESTROL AND BORIC ACID ON TESTIS AND SPERMATOLOGICAL QUALITY IN RATS	460-461
Yasemin KAVLAK	BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF GLOBAL RESEARCH TRENDS ON SARCOPENIA, EXERCISE, AND OLDER ADULTS: A WEB OF SCIENCE AND VOSviewer STUDY	462-463
Öznur ALTINER Sefa CEYHAN	ANALYSIS OF THE DIFFERENCES IN SHOPPING HABITS BETWEEN THE OLD (THOSE BORN IN THE 1950s) AND NEW (THOSE BORN AFTER 1999) GENERATIONS	464-466
Esra DEMİR KANBUR	EXPLORING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY AS A HIGH-RESOLUTION APPROACH FOR MELISSOPALYNOLOGICAL IDENTIFICATION OF BEE POLLEN FROM ANZER PLATEAU	467-468
Kağan Mert SÜRÜCÜ Kemal Alaykıran	COMPARISON OF SMALL LANGUAGE MODELS ON TURKISH CROWDFUNDING DATA: LANGUAGE ALIGNMENT, DOMAIN-SPECIFIC TRAINING WITH LoRA, AND THE PERFORMANCE GAP TO LARGE LANGUAGE MODELS	469-470
Cansu CEYHAN Gökhan DEMİRAY	THE MOTIVATIONAL POWER OF MONEY: THE EFFECT OF A PERFORMANCE-BASED INCENTIVE SYSTEM ON EMPLOYEE BEHAVIOR	471-472
İnanç Alikılıç	A SYSTEMATIC MAP OF AGENDA-SETTING RESEARCH IN TÜRKİYE: LEVEL, METHOD, AND PLATFORM DISTRIBUTION (2020-2026)	473-474
Gözde KOSA	THE ROLE OF INNOVATIVE RESEARCH METHODS IN EVIDENCE-BASED SOCIAL POLICY DESIGN: THE CASE OF THE LONDON SCHOOL OF ECONOMICS	475-476
Ülker HACIYEVA Gülnare AZİZOVA Hikmet MEMMEDOV	THE ROLE OF ADIPONECTIN AND PIICP IN THE RELATIONSHIP BETWEEN METABOLIC SYNDROME AND OSTEOARTHRITIS	477-478
Nilay İŞİTEZ Hakan DARICI	EVALUATION OF THE POTENTIAL EFFECT OF CURCUMIN ON REPLICATIVE SENESCENCE IN MESENCHYMAL STEM CELLS	479-480
Hasret DEMİREL	ACUTE CALCIUM PYROPHOSPHATE CRYSTAL ARTHRITIS MIMICKING INFECTION IN A NONAGENARIAN PATIENT: A DIAGNOSTIC CHALLENGE	481-482
Şevket BEDİROĞLU	THE RELATIONSHIP BETWEEN SPATIAL INFORMATION SYSTEMS AND HEALTH RESEARCH: FUTURE DIRECTIONS FROM AN ENVIRONMENTAL HEALTH PERSPECTIVE	483-484
Gamze BEDİROĞLU	FLOOD RISK ASSESSMENT USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS : A CASE STUDY OF GAZIANTEP CITY CENTER	485-486
Gizem Nur BULANIK DURMUŞ	HYDROGEN PRODUCTION WITH PEM WATER ELECTROLYSIS: EFFECTS OF IRIDIUM CATALYST LOADING, ELECTRICITY GENERATION MIX, AND SYSTEM LIFETIME ON CARBON FOOTPRINT	487-488
HAFID Mohammed SAUFI Hamid EL HERRADI El Hassania	BIOSYNTHESIS OF NANOPARTICLES FROM GREEN WASTE AND THEIR APPLICATION IN WASTEWATER TREATMENT	489-490
Bledar KRAJA	DIETARY FIBER IN GASTROINTESTINAL DISORDERS: A SYSTEMATIC REVIEW OF PHYSIOLOGICAL MECHANISMS, CLINICAL APPLICATIONS, AND EMERGING EVIDENCE	491
Owoyemi, S. I	INTEGRATED GEOELECTRICAL CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF SUBSURFACE RESISTIVITY DISTRIBUTION USING VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING IN A TROPICAL BASEMENT COMPLEX TERRAIN: A CASE STUDY OF IGEM CITY, ALAKIA–ADEGBAYI, IBADAN, SOUTHWESTERN NIGERIA	492
Khalil Loukhssam	QUANTUM CHARGING, ERGOTROPY, AND CORRELATIONS IN A DOUBLE-QUANTUM-DOT BATTERY UNDER 1/F CHARGE NOISE	493

Nodar Sulashvili Irina Imerlishvili Margarita Beglaryan Diego Rada Fernandez de Jauregui Maka Buleishvili Mariam Darbaidze Nato Alavidze Lali Patsia Ada (Adel) Tadevosyan Vira Kravchenko Zaza Khachiperadze Olga Shapoval Igor Seniuk Marika Sulashvili Nana Gorgaslidze Marina Giorgobiani Giorgi Pkhakadze Nino Abuladze Ketevani Gabunia Otar Gerzmava	CONTEMPORARY SCIENTIFIC FRONTIERS AND INNOVATIVE TRANSLATIONAL PARADIGMS IN AGRICULTURE AND VETERINARY SCIENCES: ADVANCING SUSTAINABLE AGROECOSYSTEMS, PRECISION PRODUCTION, ANIMAL HEALTH AND WELFARE, BIOTECHNOLOGICAL INNOVATION, FOOD SECURITY, ECOLOGICAL INTEGRITY, CLIMATE RESILIENCE, AND ONE HEALTH	494-562
Meenatchi.S Devadharshini.R Swathi.R Keerthana. V Kishore. R Hari Nandhini. A	DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN PHARMACEUTICAL MANUFACTURING	563
Okechukwu, C. O. Okocha, B. I.	EVALUATION OF THE IN VITRO ANTIOXIDANT PARAMETERS OF Cymbopogon citratus (LEMONGRASS) METHANOL EXTRACT	564-568
Okechukwu, C. O. Tawariowei, M. A.	EFFECTS OF CYMBOPOGON CITRATUS (LEMONGRASS) METHANOL EXTRACT ON LIVER FUNCTION AND LACTATE DEHYDROGENASE ACTIVITY IN ALBINO RATS	569-573
Sarah Shahid	TEMPORAL VARIATIONS IN SLEEP QUALITY, SOMNOLENCE, AND COGNITIVE PERFORMANCE DURING RAMADAN: A PROSPECTIVE LONGITUDINAL STUDY	574
Inga Abuladze Irakli Megrelishvili	NEW CHALLENGE IN THE EDUCATION SYSTEM USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS	575-583
PHAN THỊ CHÁNH LÝ	COLLECTION AND ASSESSMENT OF ELECTRONIC EVIDENCE IN VIETNAMESE CIVIL PROCEEDINGS: A COMPARATIVE STUDY WITH CHINESE LAW AND RECOMMENDATIONS FOR LEGAL IMPROVEMENT	584
Maroua RIAD Ahmad AL-SHAMI Jamal MABROUKI	BREAST CANCER METASTASIS: MOLECULAR MECHANISMS AND EMERGING THERAPEUTIC STRATEGIES	585
Mariami Managadze	THE PROBLEM OF MICROPLASTICS IN ENVIRONMENTAL MEDICINE	586
MUHAMMAD FAISAL	AI-NATIVE DIGITAL PUBLIC INFRASTRUCTURE AND THE NATIONAL GOVERNMENT AI PLATFORM	587-588
MUHAMMAD FAISAL SENATOR RUBINA KHALID ASIM IJAZ	ENHANCING SOCIAL SAFETY NETS IN PAKISTAN A QUASI-EXPERIMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF BISP DYNAMIC REGISTRY REFORMS AND PRODUCTIVE ASSET GRADUATION MODELS	589-592
Said Kerraj Mohamed elmamouni Mohamed Moussaoui	ARENE LIGAND ENGINEERING IN CHROMIUM HALF-SANDWICH COMPLEXES TOWARD ENHANCED DYE-SENSITIZED SOLAR CELL PERFORMANCE	593
Nodar Sulashvili Maka Buleishvili Mariam Darbaidze Margarita Beglaryan Nana Gorgaslidze Irina Imerlishvili Marina Giorgobiani Nato Alavidze Nino Abuladze Ketevani Gabunia Marika Sulashvili Diego Rada Fernandez de Jauregui Igor Seniuk Vira Kravchenko Olga Shapoval Otar Gerzmava	THE SCIENTIFIC DISCOURSE ON TRANSLATIONAL EPIGENETICS, ONCOGENETICS, PRECISION MEDICINE, TRANSLATIONAL MEDICINE, PHARMACOLOGY, PHARMACOVIGILANCE, CLINICAL PHARMACOLOGY, PHARMACOTHERAPY AND EVIDENCE-BASED MEDICINE: INTEGRATING MOLECULAR INSIGHTS INTO PERSONALIZED CANCER PREVENTION DIAGNOSIS AND THERAPEUTIC CARE	594-646

Nodar Sulashvili Maka Buleishvili Mariam Darbaidze Margarita Beglaryan Nana Gorgaslidze Irina Imerlishvili Marina Giorgobiani Nato Alavidze Nino Abuladze Ketevani Gabunia Marika Sulashvili Diego Rada Fernandez de Jauregui Igor Seniuk Vira Kravchenko Olga Shapoval Otar Gerzmava	SCIENTIFIC DISCOURSE ON LEARNING OUTCOMES-ORIENTED TEACHING IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS AND UNIVERSITIES: A COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT, ALIGNMENT, AND ASSESSMENT OF LEARNING OUTCOMES FOR THE ENHANCEMENT OF HIGHER EDUCATIONAL QUALITY	647-685
Banescu-Sufana CORNEL NICOLAE Vatamanita MARIANA	THE ESSENCE OF UNJUSTIFIED ENRICHMENT AND FORMS OF LEGAL LIABILITY IN EUROPE. LEGAL REGULATION OF ILLICIT ENRICHMENT UNDER THE LEGISLATION OF THE REPUBLIC OF MOLDOVA. COMPETENCES OF LAW ENFORCEMENT BODIES	686-699
Banescu-Sufana CORNEL NICOLAE Vatamanita MARIANA	PRACTICAL EXPERIENCE OF OTHER STATES IN PREVENTING AND COMBATING ILLICIT ENRICHMENT	700-715
OLUDIPE B B ODULATE L.O OPEIFA D	ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AGRICULTURAL DEVELOPMENT STRATEGIES IN NIGERIA: A SOCIO-SPARTIAL APPRAISAL	716-723
K. MARUTHAMUTHU C. INBAM CHANDRASEKAR	ON A NEW CLASS OF NEUTROSOPHIC NANO CLOSED SETS IN EUTROPHICATION NANO TOPOLOGICAL SPACES	724
BHUVI ARYA	UNCONDITIONAL CASH TRANSFERS TO WOMEN BY STATES: IMPACT ON THE FISCAL HEALTH OF THE COUNTRY	725-735
By Richard Shinkut Prof. Awojoyogbe O. Bamidele Dr. Dada O. Michael Prof. Olarinoye I. Oyeleke Saba I. David	IMAGE-INFORMED IN SILICO MODELING OF GLIOBLASTOMA MULTIFORME: COUPLING BRATS2020 MRI SEGMENTATION WITH COMPUCELL3D CELLULAR POTTS-BASED VASCULAR TUMOR GROWTH DYNAMICS	736-737
Rahman Mohammadi Akram Vatannejad Asma Kheirollahi	PHENOTYPE-SPECIFIC ASSOCIATION BETWEEN CIRCULATING ANGPTL3 AND BODY MASS INDEX IN WOMEN WITH POLYCYSTIC OVARY SYNDROME	738-743
Rahman Mohammadi Akram Vatannejad Asma Kheirollahi	ASSESSMENT OF L-SERINE AND S-ADENOSYLMETHIONINE CO-SUPPLEMENTATION ON HEPATIC OXIDATIVE STATUS IN A STREPTOZOTOCIN-INDUCED DIABETIC RAT MODEL	744-752
Duong The HIEN	THE ROLE OF GENERAL THOAI NGOC HAU (1761-1829) IN PROTECTING THE SOUTHWESTERN BORDERLANDS	753
Duong The HIEN	MILITARY POSTS AND GARRISON SETTLEMENTS IN THE HAU RIVER BORDERLAND UNDER THE NGUYEN DYNASTY (1802-1867)	754
Duong The HIEN	THE IMPACT OF BANQUE DE L'INDOCHINE ON THE DEVELOPMENT OF PORT CITIES IN VIETNAM (1875-1945)	755-759
Duong The HIEN	CAPITAL FLOW FROM BANQUE DE L'INDOCHINE TO FRENCH PLANTATION COMPANIES (1875-1945)	760-764
Duong The HIEN	THE BANQUE DE L'INDOCHINE: THE "SOUL" OF FRENCH FINANCIAL IMPERIALISM (1875 - 1945)	765-769
Dr. Priya Choudhary Dr Pallavi Sachdeva	CLIMATE CHANGE AND THE AGEING MIND: A REVIEW OF ECO-ANXIETY AND ENVIRONMENTAL DISTRESS AMONG OLDER ADULTS	770
Abhay Goel Anisha Tigga Ashwajit Gaikwad Dorshita Phukan Kashvi Bareja Md. Shahanur Hosen Pushkar Sharma Shreya Sikdar Vanshika Jindal	FISCAL FEDERALISM AND SCHOOL EDUCATION: A COMPARATIVE STUDY OF EDUCATIONAL INFRASTRUCTURE AND SPENDING CAPACITIES IN NORTHERN AND SOUTHERN INDIA	771
Deilton RIBEIRO BRASIL	CLIMATE STABILITY AS AN ESSENTIAL DIMENSION OF THE AUTONOMOUS HUMAN RIGHT TO A HEALTHY CLIMATE: AN ANALYSIS OF ADVISORY OPINION OC-32/25 OF THE INTER-AMERICAN COURT OF HUMAN RIGHTS	772-785

Bornare Ashwini	ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING IN PHARMACEUTICAL QUALITY ASSURANCE: APPLICATIONS, CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES	786
Said Kerraj Mohamed elmamouni Mohamed Moussaoui	COMPUTATIONAL EVALUATION OF RUTHENIUM COMPLEXES AS SENSITIZERS FOR SOLAR CELLS	787
Oluwakemi Racheal OSHINOWO Moses Adeolu AGOI Benjamin Oghomena OMOROJOR Oluwanifemi Opeyemi AGOI	ARTIFICIAL INTELLIGENCE-DRIVEN EDUCATIONAL MANAGEMENT: TRANSFORMING INSTITUTIONAL LEADERSHIP, DECISION-MAKING AND EDUCATIONAL OUTCOMES	788-800
El Mahdi Bouabdalli Mohamed El Jouad Samira Touhtouh Fouad Belhora Nathalie Gaumer El Kebir Hlil Abdelowahed Hajjaji	MULTIPHYSICS–JUDD–OFELT ENGINEERING OF HIGH-EFFICIENCY RED LUMINESCENCE IN EU^{3+}-DOPED SILICOPHOSPHATE SOL–GEL GLASSES	801-802
El Mahdi Bouabdalli Mohamed El Jouad Samira Touhtouh Ilyass El kadmiri Nathalie Gaumer Mostapha Siniti Abdelowahed Hajjaji	STRUCTURE–PROPERTY CORRELATIONS IN EU3+-DOPED STRONTIUM PHOSPHATE GLASSES FOR PHOTONIC AND PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS	803-804
ITUA UYIOSENOBUA BUSAYO OLUTAYO ELIZABETH ONAOPEMIPO OYEBOLA OREOLUWA ELIZABETH ALONGE-NIYI OREOLUWA	EFFECT OF CO-DIGESTION OF COW DUNG WITH CASSAVA WASTEWATER ON BIOGAS PRODUCTION ITUA UYIOSENOBUA BUSAYO	805-811
Ivan PAVLOVIĆ Jovan BOJKOVSKI Ivanka HADŽIĆ Vesna KARAPETKOVSKA HRISTOVA	IPORTANCE OF TRICHOSTRONGYLUS AXEI IN CATTLE PATHOLOGY	812
Dr.Beena Zehra Dr. Hafiz Rub Nawaz Tahira Ayaz Dr. Rajkumar Dewani	EXTRACTION OF PROTEIN FROM LEATHER WASTES AND ITS REUTILIZATION FOR VALUE-ADDED APPLICATIONS IN PAKISTAN	813
Suji S Praveen Kumar S	AI-DRIVEN ADAPTIVE MODULATION AND CODING FOR DYNAMIC WIRELESS CHANNELS	814
Joshna Sherlyn p Dr.Nixon Samuel Vijayakumar	IOT BASED SOLAR POWER SMART IRRIGATION SYSTEM	815
Tasawar Iqbal	PLANT-DERIVED BIOACTIVE COMPOUNDS FOR TESTOSTERONE REGULATION: MECHANISMS AND POTENTIAL BENEFITS	816
Tasawar Iqbal Sidra Altaf	THERAPEUTIC IMPORTANCE OF CAMEL MILK IN ENHANCING WHITE BLOOD CELL LEVELS AND IMMUNE FUNCTION	817
Ummy Rubab Muhammad Ibrahim Irfa Sakandar	INDOLE-3-BUTYRIC ACID-BASED HYDRAZONES AS EMERGING ANTIBACTERIAL AND ANTIOXIDANT AGENTS: A COMBINED EXPERIMENTAL AND IN SILICO APPROACH	818
Ruslan SHEVERDIN Victor KAZAKEVICH	FEATURES OF RENAL AND LUMBAR HEMODYNAMICS DURING MUSCLE CONTRACTION AND AFTER COFFEE INTAKE IN STUDENTS	819
Ummy Rubab Muhammad Ibrahim	RATIONAL DESIGN, SYNTHESIS AND BIOLOGICAL EVALUATION OF FUNCTIONALIZED COUMARIN-3-CARBOXAMIDE DERIVATIVES FOR POTENTIAL THERAPEUTIC APPLICATIONS	820
Omer Shujat Bhatti Muhammad Asad Ghufran Rashid Ali Khan Naveed ur Rehman Anwar Alishpa Naveed	MITIGATING URBAN FRAGMENTATION: A COMPARATIVE ASSESSMENT OF GREEN BRIDGING FOR PERI-URBAN LANDSCAPE RESILIENCE	821
Omer Shujat Bhatti Muhammad Asad Ghufran Meharunisa Butt Fahad Khan Kabeer Ud Din Naseer	GOVERNING ROAD SAFETY IN URBAN SOUTH ASIA: PUBLIC PERCEPTIONS AND POLICY STRATEGIES FOR ANIMAL–VEHICLE COLLISIONS IN LAHORE, PAKISTAN	822

Omer Shujat Bhatti Zulfiqar Ali Tariq Muhammad Asad Ghufran Syed Hamid Arshad	THE SPATIAL DYNAMICS OF SOCIAL CAPITAL: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW ON URBAN FORM, NEIGHBOURHOOD DESIGN, AND COMMUNITY COHESION	823
Omer Shujat Bhatti Usman Raza Kazmi Naveed ur Rehman Anwar Muhammad Asad Ghufran Rabia Shahbaz	FROM TRANSIT CORRIDOR TO ECOLOGICAL CORRIDOR: DEVELOPING A GREEN URBAN SPINE FRAMEWORK FOR BIODIVERSITY CONSERVATION AND CLIMATE-RESPONSIVE URBANISM IN LAHORE	824
MARCELA MELE HERMIS MELE	MOBILITY TRANSITIONS, DIASPORA RETURN AND CIRCULATORY LIVING BETWEEN ALBANIA, GREECE AND NORTH MACEDONIA	825
ELABBARI Chaimaa Pr. Labjar Najoua Pr.EL Hajjaji souad	OPTIMIZING NITROGEN FERTILIZATION TO BALANCE AGRICULTURAL PRODUCTIVITY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION	826
Faisal Hussein Amani Kamal Kanani	THE ROLE OF INTERNATIONAL FUNDING SOURCES IN PRESERVING HUMAN HERITAGE: JORDAN AS A CASE STUDY	827-829
Mahuton Géoffroy DJESSOU Saba ZOUMANIGUI	TEACHING AND LEARNING OF WRITTEN PRODUCTION IN GRADE 10 IN GUINEA: PRACTICES AND CHALLENGES	830
Ayoub LAHBOUB Fatima Ezzahrae SOUAIDI Imade CHOULLI Abdelfattah ELHAMMOUDY Ismail ABAZINE Brahim El FAHMI	NUMERICAL SOLVER IMPACT ON THE ACCURACY OF FIVE-PARAMETER PHOTOVOLTAIC SINGLE-DIODE MODEL IDENTIFICATION	831
Tran Thi Thanh Hang	SYNCHRONIZING HUMAN FACTORS IN DIGITAL TRANSFORMATION AT UNIVERSITIES IN VIETNAM: PERSPECTIVES FROM LECTURERS AND STUDENTS	832-839
Maryem Arraji Mohamed Khalis Mohamed Chahboune	USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR MEDICATION ADHERENCE ASSESSMENT IN PATIENTS WITH TYPE 2 DIABETES: AN EXPLORATORY STUDY IN MOROCCO USING CHATGPT AND THE VALIDATED GENERAL MEDICATION ADHERENCE SCALE	840
Mohammed Waheeb	THE ROLE OF OFFICIAL AND PRIVATE GOVERNMENTAL INSTITUTIONS IN THE ARAB AND ISLAMIC WORLDS IN SUPPORTING AZERBAIJAN'S EFFORTS TO PROTECT THE HERITAGE OF THE WESTERN AZERBAIJAN COMMUNITY	841-842

MAHALLİ İDARE MEMURLARINA YÖNELİK DİSİPLİN İŞLEMLERİNİN HUKUKİ ÇERÇEVESİ VE UYGULAMADA KARŞILAŞILAN USUL SORUNLARI

Burcu KARA HEMEDOĞLU
Iğdır Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Anabilim Dalı

ÖZET
Mahalli idareler bünyesinde 657 sayılı kanuna tabi memur, sözleşmeli personel, 4857 sayılı kanuna tabi işçi , 657 sayılı kanun 4/ D kapsamında geçici ve kadrolu işçi ve ayrıca seçimle gelen kamu görevlileri bulunmaktadır. Farklı hukuki rejimlere tabi bu personelin bir arada çalışması uygulamada karışıklığa neden olmakta ve disiplin /özlük işlemleri büyük oranda hatasız sürdürülememektedir. Bu sebeple 657 sayılı kanuna tabi memurlara ilişkin disiplin rejimi ve uygulanacak cezalara dair münhasır bir inceleme yapmak suretiyle doktrine katkı sunmak amaçlanmaktadır.
Ülkemizde son süreçte çokça pratiğini gördüğümüz üzere iktidar olma arzusu taşıyan parti ve liderler, bu görev için yeterli olduklarını gösterme aracı olarak, özünde bir çeşit rüştünü ispatlama yöntemi olarak yerel yönetimde belediye başkanlığı yapmakla sürece başlamaktadır. Bu durumda göstermektedir ki yerel yönetimler sanıldığından daha önemli kurumlar olmakla birlikte ve faaliyet gösterme, yönetim tecrübesi kazanma, seçmen nezdinde tanınırlık ve sair birçok hususta gerçek bir rüşt ispatlama alanıdır. Ayrıca Mahalli idareler İller Bankası A.Ş den aldıkları pay ile ciddi bir gelir kaynağına sahip olmanın dışında özel gelirleri de olan yani genel bütçeden bağımsız bir bütçesi de olan kurumlardır. O halde geniş bir hareket alanı olan mahalli idareler nezdinde görevli personellere, başta memurlar olmak üzere etkin bir denetim yapılması gerekliliği açıktır. Aksi halde kamu kaynakları mevzuata aykırı biçimde kullanılabilir, yerel yönetimler ahali halkına hizmet etmekten çıkıp keyfi tutumlar sergileyebileceklerdir. Mahalli idareler nezdinde memurları etkin biçimde kontrol etmenin yasal tek yöntemi ise disiplin işlemlerinin titizlikle uygulanmasıdır demek iddialı olsa da yanlış olmayacaktır. Kaldı ki Mahalli idare seçimleri akabinde yönetimler değişmekte olup bu sebeple Merkezi İdarelerde olduğu gibi kurumsallığın ve yeknesaklığın olduğu bir idarecilik Yerel Yönetimler bünyesinde çoğu zaman bulunmamaktadır. Mahalli İdareler bünyesinde farklı hukuki rejimlere tabi çok sayıda personel olduğu için disiplin işlemleri de karışık bir hal almaktadır. Gerek personellerin tabi oldukları hukuki rejimleri ayırmak, gerek memur disiplin cezalarının doğru ve hakkaniyete uygun biçimde ele alınmasını sağlamak bakımından tezin önem arz edeceği düşünülmektedir.
Anahtar kelimeler: Hukuk, Disiplin, Yerel yönetim, Memur

DISCIPLINARY PROCEDURES FOR LOCAL ADMINISTRATION OFFICERS

ABSTRACT
Local administrations employ civil servants subject to Law No. 657, contracted personnel, workers subject to Labour Law No. 4857, temporary and permanent workers employed within the scope of Article 4(D) of Law No. 657, as well as elected public officials. The fact that these personnel, who are subject to different legal regimes, work within the same administrative structure causes confusion in practice; consequently, disciplinary and personnel-related procedures cannot, to a considerable extent, be conducted without error. Therefore, this thesis aims to contribute to the relevant body of legal scholarship by conducting a specific and comprehensive examination of the disciplinary regime applicable to civil servants subject to Law No. 657 and the disciplinary penalties that may be imposed upon them.

As frequently observed in Türkiye in recent years, political parties and their leaders aspiring to assume national office often begin their political careers in local government by serving as mayors, regarding such office as a means of demonstrating their competence and, in essence, proving their political maturity. This demonstrates that local administrations are more significant institutions than is commonly assumed. They provide a genuine arena in which political actors may conduct public affairs, acquire administrative experience, gain recognition among the electorate, and demonstrate their competence in numerous other respects. Furthermore, in addition to the shares they receive through İller Bankası Anonim Şirketi (İLBANK A.Ş.), which constitute a substantial source of revenue, local administrations also generate their own revenues and therefore possess budgets that are distinct from the central government budget. Accordingly, it is evident that personnel employed by local administrations, particularly civil servants, must be subject to effective oversight, given the broad sphere of administrative and financial autonomy enjoyed by these authorities. Otherwise, public resources may be used in contravention of the applicable legislation, and local administrations may cease to serve the local population and instead engage in arbitrary practices.

Although it may appear somewhat assertive, it would not be inaccurate to state that the only legal mechanism available for the effective supervision of civil servants employed by local administrations is the meticulous implementation of disciplinary procedures. Moreover, the governing bodies of local administrations may change following local elections. Consequently, unlike central government authorities, local administrations often lack the same degree of institutional continuity and uniformity in administrative practice. Since local administrations employ a large number of personnel subject to different legal regimes, disciplinary procedures may also become highly complex. It is therefore considered that this thesis will be significant both in distinguishing among the legal regimes applicable to different categories of personnel and in ensuring that disciplinary penalties imposed upon civil servants are addressed correctly, fairly, and equitably.

Keywords: Law, Discipline, Local government, Officer

1. GİRİŞ

Mahallî idareler, Anayasa'nın 127. maddesinde il, belediye veya köy halkının mahallî müşterek ihtiyaçlarını karşılamak üzere kurulan, kuruluş esasları kanunla belirlenen ve karar organları seçmenler tarafından oluşturulan kamu tüzel kişileri olarak tanımlanmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Anayasası, 1982, m. 127). Yerel halkın günlük yaşamını doğrudan etkileyen su, kanalizasyon, ulaşım, temizlik, çevre, park, sosyal yardım ve benzeri hizmetlerin önemli bir bölümü belediyeler eliyle yürütülmektedir. Bu nedenle belediye teşkilatının hukuka uygun ve düzenli işlemesi, yalnızca kurum içi çalışma düzeniyle değil, kamu hizmetinin sürekliliği ve kamu kaynaklarının korunmasıyla da ilgilidir.

Belediyeler bünyesinde memurların yanı sıra sözleşmeli personel, 4857 sayılı İş Kanunu'na tabi işçiler ve seçilmiş kamu görevlileri görev yapmaktadır. Aynı teşkilat içinde farklı personel rejimlerinin bulunması, özellikle disiplin işlemlerinde hangi mevzuatın uygulanacağı ve hangi makamın yetkili olduğu konusunda hataya elverişli bir alan oluşturmaktadır. Bu çalışma, kapsamını 657 sayılı Devlet Memurları Kanunu'na tabi belediye ve diğer mahallî idare memurlarıyla sınırlamaktadır. İşçiler, sözleşmeli personel ve seçilmiş kamu görevlileri çalışmanın doğrudan inceleme alanı dışındadır.

Disiplin yaptırımları kamu hizmetinin gereği gibi yürütülmesini sağlamak amacı taşımakla birlikte, ilgili memurun mesleki statüsü, mali hakları ve kamu görevlisi olarak itibarı üzerinde sonuç doğurur. Bu nedenle disiplin yetkisi yalnızca kurumsal düzeni koruyan idari bir araç

olarak değil, kanunilik, ölçülülük, tarafsızlık, savunma hakkı ve hukuki güvenlik ilkeleriyle sınırlandırılmış bir kamu gücü yetkisi olarak ele alınmalıdır. Çalışmanın temel sorusu, mahallî idare memurlarına yönelik disiplin işlemlerinde maddi gerçeğin araştırılması ile memurun usule ilişkin güvenceleri arasında nasıl hukuka uygun bir denge kurulabileceğidir.

Çalışmada normatif ve içtihadi incelemeye dayanan doktrinel hukuk araştırması yöntemi kullanılmıştır. Anayasa, 657 sayılı Kanun, 5393 sayılı Belediye Kanunu, Devlet Memurları Disiplin Yönetmeliği ve seminer çalışmasında yer verilen seçilmiş Danıştay ve bölge idare mahkemesi kararları birlikte incelenmiştir. Kararlardan hareketle belediye disiplin uygulamasında tekrar eden hata alanları belirlenmiş; bu hataların önlenmesine yönelik öneriler geliştirilmiştir.

2. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

2.1. Mahallî İdarelerin Hukuki Konumu ve Personel Yapısı

Mahallî idarelerin anayasal varlığı yerinden yönetim ilkesine dayanır. 5393 sayılı Belediye Kanunu belediyeyi, belde sakinlerinin mahallî müşterek nitelikteki ihtiyaçlarını karşılamak üzere kurulan ve karar organı seçmenler tarafından seçilerek oluşturulan, idari ve mali özerkliğe sahip kamu tüzel kişisi olarak düzenlemektedir (Belediye Kanunu, 2005, m. 3). İdari ve mali özerklik, belediyelerin kanunla verilen görevleri kendi organları ve personeli aracılığıyla yerine getirmesini mümkün kılar; ancak bu özerklik hukuk düzeninin dışında veya denetimsiz bir alan yaratmaz.

Belediyelerin hizmet kapasitesi, sahip oldukları insan kaynağı ve mali imkânlarla yakından bağlantılıdır. 5779 sayılı Kanun uyarınca genel bütçe vergi gelirleri tahsilatı toplamı üzerinden belediyelere pay ayrılması ve bu payın belirli ölçütlerle dağıtılması, belediye personelinin önemli kamu kaynaklarının hazırlanması, kullanılması, denetlenmesi ve raporlanması süreçlerinde görev aldığını göstermektedir (İl Özel İdarelerine ve Belediyelere Genel Bütçe Vergi Gelirlerinden Pay Verilmesi Hakkında Kanun, 2008, m. 2 ve 5). Kamu kaynağı kullanan görevlilerin hesap verebilirliği, disiplin hukukunun yerel yönetimler bakımından taşıdığı önemi artırmaktadır.

Belediye ve bağlı kuruluşlarının norm kadro yapısı, Belediye ve Bağlı Kuruluşları ile Mahallî İdare Birlikleri Norm Kadro İlke ve Standartlarına Dair Yönetmelik kapsamında nüfus, hizmet niteliği ve teşkilat yapısı gibi ölçütlere göre belirlenmektedir. Müdürlük ve daire başkanlığı gibi yönetim kademelerinde bulunan memurlar, idari ve mali karar süreçlerinde doğrudan rol üstlenmektedir. Bununla birlikte disiplin sorumluluğu yalnızca yönetici memurlarla sınırlı değildir; 657 sayılı Kanun'a tabi bütün belediye memurları, görevleriyle ilgili ödev ve yasaklar bakımından aynı temel disiplin rejiminin içindedir.

Personel statülerinin birbirinden ayrılması ilk adımdır. İş sözleşmesiyle çalışan işçiler hakkında iş hukuku ve toplu iş sözleşmesi hükümleri, sözleşmeli personel hakkında ilgili özel düzenlemeler, seçilmiş organlar hakkında ise kendi statülerine özgü hükümler uygulanabilir. Buna karşılık kadrolu belediye memurlarının disiplin işlemlerinde 657 sayılı Kanun ile Devlet Memurları Disiplin Yönetmeliği esas alınır. Yanlış personel rejimine göre işlem kurulması, sürecin daha başlangıçta yetki ve usul yönünden sakatlanmasına neden olabilir.

2.2. Disiplin Rejiminin Amacı ve Kanuni Dayanakları

657 sayılı Kanun'un 124. maddesine göre disiplin yaptırımları, kamu hizmetlerinin gereği gibi yürütülmesini sağlamak amacıyla memurların yerine getirmek zorunda oldukları ödevlere aykırı davranmaları, zorunlu hususları yapmamaları veya yasaklanan işleri yapmaları hâlinde uygulanır (Devlet Memurları Kanunu, 1965, m. 124). Disiplin hukukunun amacı cezalandırmayı kendi başına bir hedef hâline getirmek değil; kamu hizmetinin düzenini, güvenilirliğini ve devamlılığını korumaktır.

Kanun'un 125. maddesi disiplin cezalarını uyarma, kınama, aylıktan kesme, kademe ilerlemesinin durdurulması ve devlet memurluğundan çıkarma şeklinde sıralamıştır. Yaptırımların ağırlığı arttıkça yetkili makam ve usul güvenceleri de farklılaşmaktadır. Uyarma, memura görev ve davranışlarında daha dikkatli olması gerektiğinin; kınama ise kusurlu olduğunun yazıyla bildirilmesidir. Aylıktan kesme cezası brüt aylıktan belirli oranda kesinti yapılması, kademe ilerlemesinin durdurulması memurun bulunduğu kademede ilerlemesinin bir ila üç yıl durdurulması, devlet memurluğundan çıkarma ise bir daha devlet memurluğuna atanmamak üzere memurluktan çıkarılması sonucunu doğurur (Devlet Memurları Kanunu, 1965, m. 125).

Disiplin cezası gerektiren fiillerin değerlendirilmesinde tipiklik ve hukuki nitelendirme önemlidir. İsnat edilen somut eylem, dayanak alınan alt bentteki fiilin unsurlarıyla örtüşmelidir. İdarenin soyut kanaati, kişinin tutumuna ilişkin öznel nitelemeler veya eylemle bağlantısı kurulamayan genel ifadeler tek başına yeterli olmamalıdır. Danıştay Onikinci Dairesinin E. 2023/5099, K. 2023/4691 sayılı kararına konu uyuşmazlık, memurun söz ve davranışlarının hangi somut bağlamda 'Devlet memuru vakarına yakışmayan tutum ve davranış' olarak değerlendirildiğinin açıkça ortaya konulması gerektiğini göstermektedir (Danıştay Onikinci Dairesi, 2023). Karardaki yargılama süreci, aynı olgunun farklı derecelerde farklı değerlendirilebilmesinin gerekçeli ve somut delile dayalı karar zorunluluğunu daha da önemli kıldığını ortaya koymaktadır.

Alt ceza uygulanması da otomatik bir hak veya sınırsız bir takdir yetkisi değildir. 657 sayılı Kanun'un 125. maddesindeki koşullar gerçekleştiğinde geçmiş hizmetlerin olumlu olması, ödül veya başarı belgesi gibi hususlar değerlendirilir. İdare, alt ceza uygulayıp uygulamadığını ve takdirinin dayanaklarını kararında gösterebilmelidir. Böylece yargısal denetim, yalnızca sonuç üzerinden değil, takdir yetkisinin hukuka uygun kullanılıp kullanılmadığı üzerinden de gerçekleştirilebilir.

2.3. Disiplin Soruşturmasının Başlatılması ve Muhakkikin Konumu

Disiplin sürecinin sağlıklı yürütülmesi, soruşturmanın konusunu, ilgili personeli ve görevlendirmenin kapsamını açıkça gösteren bir onayla başlamasına bağlıdır. Soruşturma onayı, muhakkikin inceleyebileceği maddi ve kişisel alanın sınırını belirler. Belirsiz veya aşırı geniş görevlendirmeler, hem delil toplama faaliyetinin denetlenmesini güçleştirir hem de ilgilinin hangi isnatla karşı karşıya olduğunu anlamasını engelleyebilir.

Devlet Memurları Disiplin Yönetmeliği'nin 28. maddesine göre muhakkik, hakkında soruşturma yapacağı memurdan hiyerarşik olarak alt seviyede olamaz (Devlet Memurları Disiplin Yönetmeliği, 2021, m. 28). Bu kural soruşturmanın kurumsal ciddiyeti, tarafsız görünümü ve muhakkikin görevini etkili biçimde yerine getirebilmesi bakımından önemlidir. Hiyerarşik şartın yalnızca kadro unvanına bakılarak değil, somut teşkilat yapısı ve görev ilişkisi dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekir.

Yönetmeliğin 29. maddesi muhakkike soruşturma konusuyla sınırlı olarak evrak inceleme, hakkında inceleme yapılan memurun ifadesini alma, bilgi sahibi kişileri dinleme ve gerekli bilgi ve belgeleri toplama yetkileri vermiştir. Aynı hüküm muhakkikin savunma isteme ve disiplin cezası verme yetkisinin bulunmadığını açıkça belirtmektedir (Devlet Memurları Disiplin Yönetmeliği, 2021, m. 29). Bu sınır, soruşturmayı yürüten kişi ile yaptırıma karar veren makamın fonksiyonlarını birbirinden ayırır.

Soruşturma sırasında onayda yer almayan yeni bir disiplin fiilinin ortaya çıkması hâlinde ek soruşturma onayı alınması gerekir. İzmir Bölge İdare Mahkemesi İkinci İdari Dava Dairesi, E. 2022/1767, K. 2023/70 sayılı kararında, tek bir sosyal medya paylaşımı hakkında verilen soruşturma oluru kapsamında, soruşturma sırasında elde edilen ikinci paylaşımın da değerlendirilerek ceza verilmesini hukuka aykırı bulmuştur. Daireye göre yeni fiil için ek onay

alınmalı veya ayrı bir soruşturma yürütülmelidir (İzmir Bölge İdare Mahkemesi İkinci İdari Dava Dairesi, 2023). Bu yaklaşım, soruşturma onayının şekli bir belge olmadığını; soruşturmanın konu bakımından yetki sınırını belirlediğini göstermektedir.

Muhakkik yalnızca aleyhe delilleri toplamakla yetinmemelidir. Memurun gösterdiği tanıkların dinlenmesi, ileri sürdüğü belgelerin incelenmesi ve sonucu etkileyebilecek lehe olguların araştırılması maddi gerçeğe ulaşmanın gereğidir. Her tanığın mutlaka dinlenmesi zorunlu kabul edilmese bile talebin uyuşmazlıkla ilgisi değerlendirilmeden reddedilmesi, soruşturmanın eksik yürütüldüğü iddiasına yol açabilir. Dinlenmeyen tanık veya toplanmayan delil bakımından somut ve denetlenebilir bir gerekçe oluşturulmalıdır.

2.4. İfade Alma ile Savunma Hakkının Ayrılması

Uygulamadaki en önemli sorunlardan biri, muhakkik tarafından alınan ifadenin 657 sayılı Kanun'un 130. maddesinde güvence altına alınan savunma yerine geçtiğinin kabul edilmesidir. Oysa ifade alma, soruşturma aşamasında olayın ve delillerin belirlenmesine yönelik bir araştırma işlemidir. Savunma ise isnat edilen fiil, hukuki nitelendirme ve dayanak deliller somutlaştıktan sonra, ceza vermeye yetkili makam veya kurul önünde kullanılan temel bir haktır.

657 sayılı Kanun'un 130. maddesi, devlet memuru hakkında savunması alınmadan disiplin cezası verilemeyeceğini ve savunma için yedi günden az olmamak üzere süre tanınması gerektiğini düzenlemektedir (Devlet Memurları Kanunu, 1965, m. 130). Savunma istem yazısında isnat edilen fiilin yeri, zamanı, oluş biçimi ve memurun hangi disiplin hükmü kapsamında sorumlu tutulduğunun anlaşılır biçimde gösterilmesi gerekir. Yalnızca genel ifadelerle veya madde numarası belirtilerek savunma istenmesi, ilgilinin etkili bir karşı açıklama ve delil sunma imkânını sınırlar.

Bursa Bölge İdare Mahkemesi Dördüncü İdari Dava Dairesinin E. 2022/399, K. 2022/478 sayılı kararında, soruşturma onayı verilmeden önce belediye başkanı tarafından alınan beyan savunma olarak kabul edilmemiştir. Kararda, savunmanın bütün deliller toplandıktan ve disipline aykırı fiil somut olarak belirlendikten sonra istenmesi gerektiği; soruşturma öncesindeki beyanın ancak ifade niteliğinde değerlendirilebileceği belirtilmiştir (Bursa Bölge İdare Mahkemesi Dördüncü İdari Dava Dairesi, 2022). Bu karar kronolojik sıranın savunma hakkının özüyle bağlantılı olduğunu göstermektedir.

Savunma hakkının etkili kullanılabilmesi için soruşturma raporunun veya en azından isnadın dayandığı maddi olguların ve esaslı delillerin ilgiliye bildirilmesi gerekir. Savunma alındıktan sonra isnadı ağırlaştıran veya farklılaştıran yeni bir delil ortaya çıkarsa, bu delile karşı ek savunma imkânı tanınması hukuki güvenliğin gereğidir. Savunma süresinin hesabı, tebliğin usulüne uygun yapılması ve savunma verilmemesi hâlinde bunun tutanak altına alınması da dosyada açıkça gösterilmelidir.

2.5. Zamanaşımı ve Soruşturmaya Başlama İradesi

Disiplin hukukundaki zamanaşımı süreleri, idarenin yaptırım yetkisini belirli bir zamanla sınırlandırarak memurun süresiz bir soruşturma tehdidi altında kalmasını önler. 657 sayılı Kanun'un 127. maddesinde, uyarma, kınama, aylıktan kesme ve kademe ilerlemesinin durdurulması cezaları bakımından fiilin öğrenildiği tarihten itibaren bir ay içinde disiplin soruşturmasına başlanmaması hâlinde ceza verme yetkisinin zamanaşımına uğrayacağı; devlet memurluğundan çıkarma cezası bakımından ise altı aylık süre bulunduğu düzenlenmiştir. Ayrıca fiilin işlendiği tarihten itibaren iki yıl içinde ceza verilmemesi hâlinde ceza verme yetkisi zamanaşımına uğrar (Devlet Memurları Kanunu, 1965, m. 127).

Burada 'öğrenme tarihi', yetkili disiplin amirinin fiilin disiplin soruşturmasını gerektirebilecek mahiyetini yeterli açıklıkta öğrendiği tarih olarak somutlaştırılmalıdır. Evrakın kuruma girdiği tarih, başka bir birime havale tarihi, denetim raporunun tebliği veya disiplin amirinin fiilden

haberdar olduğu tarih her olayda aynı olmayabilir. Bu nedenle dosyada öğrenme tarihini gösteren kayıtların korunması ve sürenin hangi tarihten başlatıldığının gerekçelendirilmesi gerekir.

Gaziantep Bölge İdare Mahkemesi Sekizinci İdari Dava Dairesinin E. 2023/97, K. 2023/199 sayılı kararında, soruşturmaya başlamanın her durumda yalnızca şekli soruşturma oluru ile sınırlı olmadığı; idarenin süresi içinde ortaya koyduğu ilk soruşturma iradesinin de dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir (Gaziantep Bölge İdare Mahkemesi Sekizinci İdari Dava Dairesi, 2023). Özellikle ihbar veya denetim bulgularının önce araştırılmasının gerektiği durumlarda bu yaklaşım önemlidir. Bununla birlikte ön araştırma işlemlerinin belirsiz biçimde uzatılması, kanuni süreleri etkisiz hâle getirmemelidir. İlk iradenin belirli bir fiil ve kişiyle ilişkilendirilebilmesi, tarihinin belgeyle saptanabilmesi ve araştırmanın makul hızla sürdürülmesi gerekir.

Aynı olay hakkında eksik yürütülen ilk soruşturmanın sonradan yenilenmesi de zamanaşımı yönünden dikkatle değerlendirilmelidir. İlk onayın kapsamı, idarenin o tarihte hangi fiilleri bildiği ve ikinci işlemin yeni bir fiile mi yoksa daha önce bilinen fiilin eksik incelenmesine mi ilişkin olduğu belirlenmeden sağlıklı bir sonuca ulaşılamaz. Belediyelerin her dosyanın başında öğrenme tarihi, ilk işlem tarihi, soruşturma onayı tarihi ve nihai karar tarihini içeren bir süre çizelgesi oluşturması uygulama hatalarını önemli ölçüde azaltabilir.

2.6. Delillerin Değerlendirilmesi, Hukuki Nitelendirme ve Ölçülülük

Disiplin cezası verilebilmesi için isnat edilen eylemin memur tarafından işlendiği, hukuken kabul edilebilir ve denetlenebilir delillerle ortaya konulmalıdır. Tutanak, tanık anlatımı, resmi kayıt, yazışma, görüntü, elektronik veri veya denetim raporu gibi delillerin kaynağı ve güvenilirliği araştırılmalıdır. Delillerin yalnızca listelenmesi yeterli değildir; hangi delilin hangi maddi olguyu ispatladığı ve çelişkilerin nasıl giderildiği soruşturma raporunda açıklanmalıdır.

Elektronik ve sosyal medya delillerinde içeriğin hangi hesaptan, hangi tarihte ve ne şekilde elde edildiği; hesabın ilgiliye aidiyeti; içeriğin bütünlüğünün korunup korunmadığı ve paylaşımın bağlamı önem taşır. İzmir Bölge İdare Mahkemesinin yukarıda anılan kararı, elektronik içeriğin esasından önce soruşturma yetkisinin sınırlarının da incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Hukuka uygun elde edilmemiş veya aidiyeti güvenilir biçimde gösterilmemiş kayıtlar üzerinden ceza kurulması işlemin sebep unsurunu sakatlayabilir.

Fiilin sübuta ermesi ile bu fiile uygulanacak disiplin normunun belirlenmesi iki ayrı değerlendirmedir. Konya Bölge İdare Mahkemesi Birinci İdari Dava Dairesinin E. 2020/1179, K. 2020/1840 sayılı kararında, kamu kaynağının belediye hesabına aktarılmayıp memurun kişisel hesabında tutulması olgusu üzerinden ceza yargılaması ile disiplin sorumluluğu arasındaki ilişki tartışılmıştır. Daire, ceza yargılaması ile disiplin hukukunun amaç ve ölçütlerinin farklı olduğunu; beraat kararının her durumda disiplin cezasına engel oluşturmayacağını, ancak beraat gerekçesinin ve disiplin isnadının aynı fiil ve hukuki nitelik bakımından ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir (Konya Bölge İdare Mahkemesi Birinci İdari Dava Dairesi, 2020).

Ceza soruşturması veya yargılamasının bulunması idarenin disiplin yönünden hiçbir inceleme yapmadan ceza mahkemesi sonucunu aktarmasını haklı kılmaz. İdare, disiplin hukukuna özgü görev, sadakat, güven ve hizmet düzeni ölçütleri bakımından bağımsız bir değerlendirme yapmalıdır. Buna karşılık ceza mahkemesinin maddi olayın gerçekleşmediğini veya fiilin kişi tarafından işlenmediğini kesin olarak saptadığı durumlarda bu tespitin disiplin dosyasındaki etkisi göz ardı edilemez.

Ölçülülük, fiilin ağırlığı ile yaptırım arasındaki dengenin kurulmasını gerektirir. Eylemin meydana geliş biçimi, kamu hizmetine etkisi, kast veya ihmal derecesi, tekrar durumu ve memurun geçmiş hizmetleri birlikte değerlendirilmelidir. Aynı nitelikteki olaylarda farklı

yaptırımlar uygulanması eşitlik ve hukuki güvenlik sorunları doğurabilir. Bu nedenle karar gerekçesi, yalnızca fiilin ilgili alt bende uyduğunu değil, seçilen yaptırımın neden gerekli ve orantılı olduğunu da açıklamalıdır.

2.7. Uygulamada Belirlenen Başlıca Sorunlar

İncelenen mevzuat ve yargı kararları birlikte değerlendirildiğinde belediye disiplin süreçlerindeki sorunların çoğunun maddi olaydan çok yetki ve usul hataları etrafında toplandığı görülmektedir. İlk sorun, personelin hukuki statüsü veya disiplin amirinin yanlış belirlenmesidir. İkinci sorun, muhakkikin hiyerarşik şartı taşımaması yahut görevlendirme sınırlarını aşmasıdır. Üçüncü sorun, soruşturma sırasında ortaya çıkan yeni fiiller için ek onay alınmamasıdır.

Dördüncü ve uygulamada özellikle önemli sorun, muhakkikin aldığı ifadenin son savunma sayılması veya savunmanın deliller toplanmadan önce alınmasıdır. Beşinci sorun, soruşturma ve ceza verme zamanaşımı sürelerinin öğrenme tarihi açıkça tespit edilmeden hesaplanmasıdır. Altıncı sorun ise fiilin yer, zaman, oluş biçimi ve delilleri somutlaştırılmadan genel ve öznel ifadelerle ceza teklif edilmesidir. Bunlara soruşturma raporunun yetkili makamca yeterince tartışılmaması ve kararların kalıp ifadelerle gerekçelendirilmesi de eklenebilir.

Bu bulgular, disiplin sürecinin yalnızca bir soruşturma raporu hazırlanmasından ibaret olmadığını göstermektedir. Hukuka uygun bir süreç; doğru hukuki statünün ve yetkili makamın belirlenmesi, sürelerin kayda alınması, sınırları açık bir soruşturma onayı, tarafsız ve hiyerarşik yönden uygun muhakkik, lehe ve aleyhe delillerin toplanması, gerekirse ek onay, rapor sonrasında usulüne uygun savunma ve gerekçeli nihai karar aşamalarından oluşur. Zincirin herhangi bir halkasındaki ağır hata, maddi fiil gerçekleşmiş olsa bile işlemin iptaline yol açabilir.

Belediyelerde disiplin dosyalarının standartlaştırılması bu riskleri azaltabilir. Soruşturma onayına eklenecek konu ve kişi çizelgesi, süre takip formu, delil listesi, tanık taleplerine ilişkin gerekçe bölümü, savunma kontrolü ve yetkili makam tablosu kullanılabilir. Hukuk birimi veya insan kaynakları biriminin nihai karardan önce yalnızca şekli değil, yetki ve temel usul güvenceleri bakımından ön kontrol yapması da yararlı olacaktır. Ancak bu kontrol muhakkikin veya karar makamının bağımsız değerlendirmesinin yerine geçmemelidir.

3. SONUÇ

Mahallî idare memurlarının disiplin sorumluluğu, belediye hizmetlerinin düzenli yürütülmesi ve kamu kaynaklarının korunması bakımından zorunlu bir idari araçtır. Bununla birlikte disiplin yetkisi, memurun statüsü ve hakları üzerinde doğrudan sonuç doğurduğundan, kanunda ve yönetmelikte belirlenen usul güvencelerine sıkı biçimde bağlıdır. Etkin disiplin yönetimi, hızlı biçimde ceza verilmesiyle değil; maddi gerçeğin tarafsız bir soruşturmayla ortaya çıkarılması ve kararın hukuken denetlenebilir olmasıyla sağlanır.

Çalışmada incelenen kararlar, belediye disiplin işlemlerinde dört temel ekseni öne çıkarmaktadır. Birincisi, soruşturmanın yetkili makamın açık onayına ve hiyerarşik yönden uygun bir muhakkike dayanmasıdır. İkincisi, onay kapsamı dışında yeni bir fiil ortaya çıktığında ek soruşturma onayı alınmasıdır. Üçüncüsü, soruşturma ifadesi ile nihai savunmanın ayrılması ve savunmanın isnat ile deliller somutlaştıktan sonra yetkili makamca istenmesidir. Dördüncüsü, öğrenme ve karar tarihleri esas alınarak zamanaşımı sürelerinin belgeye dayalı biçimde izlenmesidir.

Disiplin cezasının hukuka uygunluğu yalnızca fiilin gerçekleşip gerçekleşmediğine indirgenemez. Fiilin doğru hukuk normu altında nitelendirilmesi, delillerin hukuka uygun ve yeterli olması, lehe iddiaların araştırılması, cezanın ölçülü belirlenmesi ve kararın somut gerekçe içermesi gerekir. Ceza yargılamasıyla disiplin süreci arasındaki ilişki de beraat

kararının gerekçesi ve disiplin isnadının niteliği dikkate alınarak her olayda ayrıca değerlendirilmelidir.

Uygulamadaki hataların azaltılması için belediyelerde disiplin amirleri ve muhakkiklere düzenli eğitim verilmesi, güncel mevzuat ve içtihat izleme mekanizması kurulması, soruşturma dosyalarında yetki-süre-delil-savunma kontrol listelerinin kullanılması ve nihai işlem öncesinde hukuki ön inceleme yapılması önerilmektedir. Böyle bir sistem, bir yandan kamu hizmetinin düzenini korurken diğer yandan memurun savunma hakkı ve hukuki güvenlik beklentisini güçlendirecektir.

4. KAYNAKÇA

Belediye Kanunu. (2005). Kanun No. 5393, Resmî Gazete, 25874, 13 Temmuz 2005.

Belediye ve Bağlı Kuruluşları ile Mahallî İdare Birlikleri Norm Kadro İlke ve Standartlarına Dair Yönetmelik. (2007). Resmî Gazete, 26442, 22 Şubat 2007.

Bursa Bölge İdare Mahkemesi Dördüncü İdari Dava Dairesi. (2022). E. 2022/399, K. 2022/478, 24 Kasım 2022.

Danıştay Onikinci Dairesi. (2023). E. 2023/5099, K. 2023/4691, 9 Ekim 2023.

Devlet Memurları Disiplin Yönetmeliği. (2021). Cumhurbaşkanı Kararı No. 3935, Resmî Gazete, 31470, 30 Nisan 2021.

Devlet Memurları Kanunu. (1965). Kanun No. 657, Resmî Gazete, 12056, 23 Temmuz 1965.

Gaziantep Bölge İdare Mahkemesi Sekizinci İdari Dava Dairesi. (2023). E. 2023/97, K. 2023/199, 1 Kasım 2023.

İl Özel İdarelerine ve Belediyelere Genel Bütçe Vergi Gelirlerinden Pay Verilmesi Hakkında Kanun. (2008). Kanun No. 5779, Resmî Gazete, 26937, 15 Temmuz 2008.

İzmir Bölge İdare Mahkemesi İkinci İdari Dava Dairesi. (2023). E. 2022/1767, K. 2023/70, 17 Ocak 2023.

Konya Bölge İdare Mahkemesi Birinci İdari Dava Dairesi. (2020). E. 2020/1179, K. 2020/1840, 10 Aralık 2020.

Türkiye Cumhuriyeti Anayasası. (1982). Kanun No. 2709, Resmî Gazete, 17863 (Mükerrer), 9 Kasım 1982.

Yapay Zeka Kullanım Beyanı: Bu bildirinin hazırlanması sırasında İngilizce çeviri ve Düzenleme konusunda yapay zekadan destek alınmıştır

1978 VE 1990 SOSYAL BİLGİLER DERS KİTAPLARI GÖRSELLERİNDE DİŞİL TEMSİL

Doç. Dr. Ahmed Emin OSMANOĞLU
Bingöl Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Sosyoloji Bölümü, Bingöl
ORCID ID: 0000-0002-9212-1437
Şule SÖYLER
Ormanardı İlkokulu, Bingöl
ORCID ID: 0009-0009-3911-3620

ÖZET

Bu araştırmanın amacı, 1978 ve 1990 yıllarına ait 5. sınıf Sosyal Bilgiler ders kitapları görsellerinde yer alan dişil temsili karşılaştırmalı olarak incelemektir. Araştırmanın örneklemini, amaçlı örnekleme yöntemlerinden ölçüt örnekleme tekniğiyle seçilen 1978 ve 1990 tarihli iki 5. sınıf Sosyal Bilgiler ders kitabı oluşturmaktadır. Doküman inceleme yoluyla veri toplanmıştır. Veri toplama sürecinde her iki ders kitabındaki görsellerin tamamı taranmış ve toplam 352 görsel arasından dişil figür içeren 22 görsel belirlenmiştir. Bu görsellerde yer alan 61 dişil figür araştırmanın temel analiz birimini oluşturmuştur. Veriler sistematik görsel içerik analiziyle çözümlenmiştir. Dişil görünürlük görsel düzeyde; yaş, mekân, faaliyet, birliktelik, kıyafet, duygu durumu ve meslek değişkenleri ise figür düzeyinde incelenmiştir. Bulgular, dişil figür içeren görsel oranının iki kitap arasında sınırlı olduğunu göstermiştir. Dişil figürlerin temsil edilme biçimleri farklılaşmıştır. 1978 kitabında yetişkin figürler kırsal mekânlar, geleneksel kıyafetler ve iş/meslekî faaliyetlerde öne çıkarken 1990 kitabında yaş grupları, mekânlar ve faaliyetler bakımından daha çeşitli bir dağılım görülmüştür. Ancak bu çeşitlenmede, meslekî temsil belirginleşmemektedir. 1990 kitabında mesleğin belirsiz olduğu figür oranı artmıştır. Sonuç olarak, incelenen iki ders kitabı arasındaki temel farklılık temsil kapsamının farklı boyutlarda yeniden düzenlenmesidir.

Anahtar Kelimeler: Sosyal Bilgiler, ders kitapları, dişil temsil, toplumsal cinsiyet, görsel içerik analizi

FEMININE REPRESENTATION IN VISUALS OF THE 1978 AND 1990 SOCIAL STUDIES TEXTBOOKS

ABSTRACT

The aim of this study is to comparatively examine female representation in the visuals of fifth-grade Social Studies textbooks published in 1978 and 1990. The sample consisted of two fifth-grade Social Studies textbooks published in 1978 and 1990, selected through criterion sampling, a purposive sampling technique. Data were collected through document analysis. During the data collection process, all visuals in both textbooks were screened, and 22 visuals containing female figures were identified among a total of 352 visuals. The 61 female figures appearing in these visuals constituted the primary unit of analysis. The data were analyzed using systematic visual content analysis. Female visibility was examined at the visual level, whereas age, setting, activity, co-presence, clothing, emotional state, and occupation were examined at the figure level. The findings showed that the proportion of visuals containing female figures was limited in both textbooks. However, the ways in which female figures were represented differed between the two textbooks. In the 1978 textbook, adult figures were more prominent in rural settings, traditional clothing, and work/occupational activities, whereas the 1990 textbook displayed greater diversity in terms of age groups, settings, and activities. However, this diversification was not accompanied by greater occupational representation. In the 1990

textbook, the proportion of figures whose occupation could not be identified increased. Overall, the main difference between the two textbooks lies in the reconfiguration of the scope of female representation across different dimensions.
Keywords: Social Studies, textbooks, feminine representation, gender, visual content analysis

1. GİRİŞ

Ders kitapları, öğretim programlarında yer alan bilgi ve değerlerin öğrencilere aktarılmasında kullanılan temel eğitim materyallerinden biridir. Toplumsal gerçekliğin temsiline ilişkin ders kitabı yazarlarının belirli seçimlerini içerir. Seçimler sonucunda belirli kişi ve gruplar kitaplarda görünür kılınır. Bunların rolleri ve toplumsal ilişki tarzları yeni nesle aktarılır. Bu aktarım öğrencilerin zihninde toplumsal anlamlandırmanın bir parçasını oluşturur. Bu nedenle ders kitapları içerdiği bilgiler yanında, toplumsal grupları ve rolleri temsil etme biçimleri bakımından da incelenmektedir (Apple, 1992). Söz konusu aktarım metnin yanında görseller aracılığıyla da yapılır. Bu noktada, ders kitaplarının görsel boyutu, toplumsal temsillerin incelenmesi açısından önemli, hale gelir.

Görseller bir tezyin aracı olmadığı gibi yalnızca metni destekleyen öğeler de değildir. Kişiler, eylemler ve toplumsal ilişkiler hakkında anlam üreten temsil araçlarıdır (Kress ve van Leeuwen, 2021). Görsellerde yer alan figürlerin hayat döngüsündeki yaş/olgunluk evreleri, gösterildikleri mekân, yaptıkları faaliyet, birlikte sunuldukları kişi ya da kişiler, üzerlerindeki kıyafet, mesleklerle ilişkilendirilme ya da ilişkilendirilmeme durumları ve yüzlerine yansıyan duygular onların toplumsal konumuna ve rolüne ilişkin farklı anlamlar taşıyabilir. Bu noktadan hareketle, ders kitabı görsellerinin, toplumsal cinsiyet rollerinin temsil edilişine inceleyen araştırmalar için önemli bir veri kaynağı oluşturabileceği ortaya çıkmaktadır (Jehle vd., 2024).

Ders kitabı araştırmalarında, kitaplarda sunulan temsillerin bir örüntü bağlamında değerlendirilmesinin önemli olduğu belirtilmektedir. Alkış Küçükaydın (2026) ders kitabı görsellerindeki toplumsal cinsiyet temsilinin niceliksel ve anlamsal boyutlarının birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Buna paralel olarak, Işık Demirhan (2021), araştırmalarında, kadınların görünürlüğü ile onlara atfedilen toplumsal ve mesleki rolleri birlikte değerlendirmektedir. Kadın figürlerin erkeklere göre daha az görünür olduğunu ve daha sınırlı bir meslek çeşitliliği içerisinde temsil edildiklerini belirlemiştir. Türkiye'de ders kitaplarında kadın temsiline ilişkin araştırmalar, temsil örüntülerinin farklı dönem ve dersler arasında değişebildiğini göstermektedir. Sosyal Bilgiler alanında Demircioğlu ve Özalp (2023), ders kitaplarında kadın bilim insanlarının temsilini incelemişlerdir. Kadınların bilimsel ve meslekî roller içerisindeki görünürlüğüne dikkat çekmişlerdir. Diğer çalışmalar da kadın figürlerin görünürlüğünü, toplumsal ve meslekî rollerini, eylemlerini, mekânsal konumlarını ve diğer figürlerle birliktelik biçimlerini farklı boyutlarıyla ele almıştır (Karaboğa, 2020; Erbuyurucu ve Deniz, 2024; Temur, 2025). Geniş bir tarihsel çerçevede Gümüşoğlu (2016), Türkiye'de farklı dönemlerde yayımlanan ders kitaplarında kadın ve erkeklere atfedilen rollerin zaman içerisinde değiştiğini ortaya koymuştur. Süreç içerisinde farklılaşan öğretim programları ve ders kitapları toplumsal cinsiyete yönelik konuların farklı dönemlerde karşılaştırılmasını anlamlı hâle getirmektedir.

Türkiye'de Sosyal Bilgiler öğretim programları, 1970'lerin sonlarından 1990'lara uzanan dönemde çeşitli değişikliklere konu olmuştur. Ortaokul Sosyal Bilgiler dersi 1985–1986 öğretim yılından itibaren Millî Tarih, Millî Coğrafya ve Vatandaşlık Bilgileri derslerine ayrılırken, ilkokul düzeyinde Sosyal Bilgiler öğretimi devam etmiş ve 4. ve 5. sınıflar için yeni Sosyal Bilgiler öğretim programı 1990 yılında kabul edilmiştir (Dere ve Kıral, 2022). Bu araştırmada 1978 ve 1990 yıllarına ait 5. sınıf Sosyal Bilgiler ders kitaplarının karşılaştırılması, iki kitabın farklı tarihsel ve eğitsel bağlamlarda kullanıma sunulmuş olmasına dayanmaktadır.

Bununla birlikte karşılaştırma, dişil temsilde gözlemlenen farklılıkları söz konusu dönemler arasındaki siyasal veya programatik değişimlerin nedeni olarak açıklama iddiasında değildir. Sadece, temsil örüntülerinin iki farklı tarihsel kesitte nasıl bir görünüm sergilediğini belirlemeyi amaçlamaktadır.

Literatürdeki çalışmaların büyük bölümü güncel ya da yakın dönem ders kitaplarına odaklanmaktadır. 1970'lerin sonu ile 1990'ı kapsayan 5. sınıf Sosyal Bilgiler ders kitabı görsellerindeki dişil temsili görünürlük, yaş/olgunluk, mekân, faaliyet, birliktelik, kıyafet, duygu durumu ve meslek boyutlarını birlikte kullanarak karşılaştırmalı olarak inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum, dişil temsilin söz konusu boyutlar üzerinden farklı tarihsel kesitlerde karşılaştırmalı olarak incelenmesine yönelik bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki sorulara cevap aranmıştır: 1978 ve 1990 tarihli 5. sınıf Sosyal Bilgiler ders kitaplarında;

1. Dişil figür içeren görsellerin toplam görseller içerisindeki dağılımı nasıldır?
2. Dişil figürler çocuk, yetişkin ve yaşlı kategorilerine göre nasıl dağılmaktadır?
3. Dişil figürler hangi mekânlarda temsil edilmektedir?
4. Dişil figürler hangi faaliyetler içerisinde gösterilmektedir?
5. Dişil figürler kimlerle birlikte temsil edilmektedir?
6. Dişil figürlerin kıyafet özellikleri nelerdir?
7. Dişil figürler hangi duygu durumlarıyla betimlenmektedir?
8. Dişil figürler hangi mesleklerle ilişkilendirilmektedir?

2. ARAŞTIRMANIN KURAMSAL ÇERÇEVESİ: DERS KİTABI GÖRSELLERİNDE DİŞİL TEMSİL

Ders kitabı görselleri, belirli seçimler aracılığıyla anlam üreten temsil biçimleridir. Görsel toplumsal göstergebilim açıdan figürlerin eyleyen ya da edilgen konumda bulunmaları, başka kişilerle kurdukları ilişkiler, yer aldıkları ortam ve görsel kompozisyon içerisindeki konumları bu anlamın oluşmasında etkilidir (Kress ve van Leeuwen, 2021). Bu nedenle ders kitabı görsellerindeki toplumsal cinsiyet temsili, kadın ve erkek figürlerin yalnızca ne sıklıkla yer aldıklarıyla değil, hangi toplumsal konumlarda görünür kılındıkları, hangi eylemlerle ilişkilendirildikleri ve diğer kişilerle nasıl bir ilişki içerisinde sunulduklarıyla da ilgilidir (Temur, 2025). Güncel ders kitabı araştırmaları da görsellerin toplumsal cinsiyete ilişkin anlamları yalnızca açık biçimde değil, rol ve ilişki örüntüleri aracılığıyla örtük olarak da taşıyabildiğini göstermektedir (Işık Demirhan, 2021; Karaboğa, 2020). Bu yaklaşım, görünürlük ile temsilin niteliği arasında analitik bir ayrım yapılmasını gerektirir. Görünürlük, dişil figürlerin ders kitabının görsel evrenine dâhil edilme miktarını gösterir. Temsilin niteliği ise bu figürlere hangi toplumsal konumların, faaliyetlerin ve ilişki alanlarının tanındığıyla ilgilidir. Dolayısıyla bir kadın figürün görselde bulunması, onun kamusal, meslekî ya da etkin bir özne olarak sunulduğunu kendiliğinden göstermez (Benattabou, 2021). Kadınların sayısal görünürlüğündeki artış, aynı figürlerin sınırlı faaliyetler, belirli meslekler veya geleneksel toplumsal roller içinde sunulması durumunda temsil repertuvarının genişlediği anlamına gelmez. Güncel çalışmalar, kadınların sayısal varlığı ile onlara tanınan rol ve konumların çeşitliliğinin orantısal değişmediğini göstermektedir (Jehle vd., 2024; Alkış Küçükaydın, 2026).

Dişil temsilin değerlendirilmesinde kadınların hangi toplumsal alanlara yerleştirildiği önemlidir. Mekânsal konum, kadınların özel, kamusal, kurumsal ya da diğer toplumsal alanlara nasıl dağıtıldığı, onların hangi toplumsal pratik ve rollerle ilişkilendirildiğinin belirlenmesine imkân verir (Wang vd., 2023). Dişil figürlerin faaliyetleri, figürün ne yaptığına ilişkin bilgi sağlar. Eğitim alan, çalışan, hareket eden, kamusal bir etkinliğe katılan ya da mesleki bir görev yerine getiren bir figür ile izleyen, bekleyen veya poz veren bir figür aynı temsil konumunda

değildir. Bu nedenle, figürlerin içinde bulundukları mekânlar ile gerçekleştirdikleri faaliyetlerin birlikte değerlendirilmesi yoluyla daha kapsamlı çözümlemeler yapılabilmektedir (Huang ve Liu, 2024). Görsel toplumsal göstergebilim açısından da figürlerin faaliyetleri, eyleyen ya da eylenen konumunda olmaları, onların görsel anlatı içerisindeki konumlandırılmasının temel unsurlarından biridir (Kress ve van Leeuwen, 2021; Yang ve Zhou, 2023).

Figürlerin görsellerdeki meslekî temsil durumları da önemlidir. Meslekî temsil, ekonomik faaliyeti değil, uzmanlık, statü, otorite ve kamusal katılımla ilişkili toplumsal konumları görünür hâle getirir (Fabbian vd., 2019). Figürlerin meslek sahibi olarak gösterilip gösterilmemesi kadar, hangi mesleklerle ilişkilendirildikleri de mühimdir. Araştırmalar, kadınların ders kitabı görsellerinde bulunmalarına rağmen profesyonel veya uzman rollerindeki görünürlüklerinin daha sınırlı kaldığını göstermektedir (Becker ve Nilsson, 2021; Jehle vd., 2024). Bazı araştırmalarda, kadınların görsellerdeki genel görünürlükleri ile uzman ve profesyoneller arasındaki görünürlükleri arasında belirgin fark saptanmıştır (Benattabou, 2021; Yang ve Zhou, 2023). Türkiye'deki Sosyal Bilgiler ders kitapları üzerine yapılan çalışmalarda kadınların bilimsel/yönetsel rollerde geri planda bırakıldıklarını belirlenmiştir (Demircioğlu ve Özalp, 2023; Gümüşoğlu, 2016; Karaboğa, 2020; Temur, 2025)

Dişil temsil, figürün kimlerle birlikte gösterildiğiyle de anlam kazanır. Görsellerdeki, kadın ve erkek figürlerin sosyal ilişkiler içerisindeki konumları, toplumsal cinsiyet temsilinin ilişkisel boyutunu billurlaştırır (Huang ve Liu, 2024; Nurlu, 2021). Bir figürün aile üyeleriyle, hemcinsleriyle, karşı cinsle veya karma bir topluluk içinde sunulması, onun toplumsal ilişki alanına ilişkin farklı anlamlar üretir. Aile içindeki gösterim, akrabalık ve bakım ilişkilerini öne çıkarabilirken, aile dışındaki karma gruplar daha geniş toplumsal katılımı sembolize eder (Ismiyati vd., 2026). Tek başına gösterilme ise bağlama göre bireysel faallik veya meslekî bağımsızlık gibi farklı anlamlar taşıyabilir. Bu nedenle figürdeki birliktelik durumu, tek başına olumlu ya da olumsuz olarak değerlendirilmemelidir. Yaptığı faaliyeti ve bulunduğu mekânla birlikte değerlendirilmelidir. Böyle bir yaklaşım, temsilin tek bir görsel göstergeden değil, göstergeler arasındaki ilişkiye göre değerlendirilmesini sağlar.

Yaş/olgunluk durumu da bu temsil sisteminin belirlenmesi gereken bir boyutudur. Kadın temsilinin yalnızca yetişkin kadınlara indirgenmesi, dişil kimliğin yaşamın farklı evrelerinde nasıl kurulduğunu görünmezleştirir. Çocuk, yetişkin ve yaşlı figürlerin dağılımının belirlenmesi, eğitim, çalışma, aile yaşamı, bakım ve kamusal katılım gibi rollerin hangi yaşam evreleriyle ilişkilendirildiğinin anlaşılmasını sağlar (Adukia vd., 2023; Caldwell ve Wilbraham, 2018; Hungwe vd., 2023). Dişil figürlerin farklı yaş grupları üzerinden kodlanması, dişil temsilin yalnızca yetişkinlik üzerinden değerlendirilmemesini sağlar. Bu araştırmada kadın yerine daha kapsayıcı biçimde dişil figür kavramının kullanılması da çocuk, yetişkin ve yaşlı figürleri kapsama amaçlıdır.

Kıyafet ve duygu durumu ise dişil temsilin daha ince göstergelerini oluşturur. Kıyafet, figürün gündelik yaşam, gelenek, meslek, resmiyet, spor ya da kurumsal aidiyetle ilişkilendirilmesine imkân verir. Geleneksel kıyafetten gündelik veya meslekî kıyafete doğru bir farklılaşma figürün yerleştirildiği toplumsal bağlamla birlikte anlam kazanır (Azad, 2020; Yang, 2016). Benzer biçimde yüz ifadesi, figürlerin ciddi, neşeli, kaygılı, üzgün gibi duygusal konumlarda betimlenmesini sağlar (Ismiyati vd., 2026; Pownall ve Heflick, 2023). Ancak bu göstergeler yalnızca görsel olarak sunulan duygu repertuvarını değerlendirmek içindir. Kıyafet ve duygu, diğer temsil değişkenlerini tamamlar.

Toplumsal cinsiyet temsilindeki tarihsel süreç, geleneksel temsillerin yerini daha eşitlikçi temsillere bıraktığı doğrusal bir süreç değildir. Ders kitaplarının farklı dönemlerini karşılaştıran çalışmalar, bazı temsil boyutlarında değişim görülürken diğerlerinde görülmediğini, sınırlı değişim veya gerileme yaşanabildiğini göstermektedir (Goyal ve Rose, 2020; Yang vd., 2025).

Bu nedenle kadınların sayısal görünürlüğündeki artış ile kendilerine tanınan rol, faaliyet ve toplumsal konumların çeşitliliği aynı yönde artmayabilmektedir. Sınırlı sayısal görünürlük de temsilin tek başına dar çerçevede gerçekleştiği anlamına gelmez (Hernández-Flórez vd., 2025; Tabatadze ve Gorgadze, 2023). Tarihsel karşılaştırmalarda belirleyici olan, farklı temsil boyutlarının zaman içinde nasıl bir araya geldiği ve temsildeki çeşitliliğin nasıl yeniden düzenlendiğidir. Bu araştırmada dişil temsil, görünürlük ile toplumsal konumlandırmanın birlikte oluşturduğu çok boyutlu bir çerçevede ele alınmaktadır.

3. YÖNTEM

Bu araştırmada, nitel araştırma yaklaşımı takip edilmiştir. Ders kitaplarının yalnızca görsel unsurları incelenmiştir. İki farklı tarihsel kesitte dişil temsilin görünürlük ve temsil özellikleri bakımından dağılımı karşılaştırılmıştır. Ders kitaplarının belirlenmesinde amaçlı örnekleme yönteminin ölçüt örnekleme tekniği kullanılmıştır. Kitapların Millî Eğitim Bakanlığı tarafından ders kitabı olarak kabul edilmiş olması, karşılaştırmayı mümkün kılacak farklı tarihsel kesitleri temsil etmesi ve kitapların yayımlandığı tarihler arasında en az 10 yıllık bir zaman aralığının bulunması ölçüt olarak belirlenmiştir. Seçilen iki ders kitabında yer alan görsellerin tamamı taranmıştır. 1978 tarihli ders kitabında 161 ve 1990 tarihli ders kitabında 191 olmak üzere toplam 352 görsel bulunmaktadır. 1978 kitabında en az bir dişil figür içeren 9, 1990 kitabında 13 görsel belirlenmiştir. 22 görsel analize tabi tutulmuştur. Bu görsellerde, 1978 kitabında 21, 1990 kitabında 40, toplamda 61 dişil figür (N = 61) bulunmaktadır. Dişil görünürlüğün belirlenmesi için en az bir dişil figür içeren görsel sayısı ilgili kitaptaki toplam görsel sayısına oranlanmıştır.

Araştırmada içerik analizi uygulanmıştır. İçerik analizi, görsel ve diğer anlam taşıyan materyallerin sistematik biçimde birimleştirilmesine ve kodlanmasına imkân sağlamaktadır. Materyalin uygun birimlere ayrılması ve kodlama kararlarının bu birimler üzerinden sistematik biçimde yürütülmesi içerik analizinin temel aşamalarındandır (Krippendorff, 2019). Önceden belirlenmiş kategorilere göre çalışılmıştır. Temel analiz birimi, görsellerde yer alan her bir dişil figürdür. Her bir dişil figür yaş/olgunluk, mekân, faaliyet, birliktelik durumu, kıyafet durumu, duygu durumu ve meslek olmak üzere yedi değişken bakımından ayrı ayrı kodlanmıştır.

Figürler yaş/olgunluk bakımından çocuk, yetişkin, yaşlı ve belirsiz olarak kodlanmıştır. Mekân bakımından kamusal/açık, kurumsal mekân, özel alan, kültürel/rekreatif, çatışma/savaş, kırsal, mekân yok ve belirsiz kategorilerinde kodlanmıştır. Görselde figürün ilişkilendirilebileceği herhangi bir mekânsal arka plan bulunmadığında mekân yok kategorisi, figürün bulunduğu mekânı sınıflandırma için yeterli veri bulunmadığında belirsiz kategorisi kullanılmıştır. Faaliyet değişkeni eğitim ve bilim, serbest zaman/sosyal yaşam, sanatsal ve kültürel topluluk, durgun, ev/aile içi, çalışma veya meslekî, tüketim, doğa/çevre, ulaşım/hareketlilik, vatandaşlık, kamusal/sembolik, dinî/manevî pratikler, siyasal/kamusal, askerî/güvenlik ve belirsiz kategorilerinden oluşmuştur. Durgun kategorisi belirli bir etkinlik içerisinde bulunmaksızın pasif biçimde yer alma, izleme, bekleme veya poz verme durumlarını kapsamaktadır. Kamusal/sembolik kategori ulusal, tarihsel veya kolektif anlam taşıyan törensel ve sembolik kamusal eylemleri içermektedir. Vatandaşlık kategorisinde hak kullanımı, kamusal katılım ve yurttaş-kamu ilişkisini içeren eylemler bulunmaktadır. Siyasal/kamusal kategorisinde siyasal aktörlerin yönetim, karar alma ve siyasal temsil faaliyetleri, askerî/güvenlik kategorisinde ise askerî görev, savunma, savaş veya güvenlik faaliyetinin fiilen icra edilmesi esas alınmıştır.

Birliktelik durumu; karma grup, karşı cins, hemcins, aile içi, yalnız ve belirsiz kategorilerinden oluşmaktadır. Aileden olmayan kadın ve erkek figürlerle birlikte olunduğunda karma grup; yalnızca erkek figür veya figürlerle gerçekleşen aile dışı birliktelikler karşı cins; yalnızca kadın figür veya figürlerle gerçekleşen aile dışı birliktelikler hemcins olarak değerlendirilmiştir. Aile üyeleriyle birliktelik aile içi, diğer kişilerin olmadığı veya olup da anlamlı bir sosyal etkileşimin

bulunmadığı durumlarda figür yalnız kategorisine yerleştirilmiştir. Kıyafet durumu gündelik, üniforma/meslekî, meslekî, geleneksel, resmî, temsili/kostüm, spor ve belirsiz kategorilerinde sınıflandırılmıştır. Duygu durumunun belirlenmesinde figürün görsel olarak gözlenebilir yüz ifadesi ve bedensel göstergeleri esas alınmıştır. Neşeli/mütebessim, ciddi/nötr, üzgün/dalgın/yorgun, korkmuş/endişeli, öfkeli/sert, şaşkın/hayret, acı/fiziksel rahatsızlık ve belirsiz kategorileri yer almıştır.

Meslek değişkeninde eğitim ve bilim, sağlık ve bakım, ekonomi ve hizmet, kültür/sanat/spor, güvenlik/kamu düzeni, dinî/ruhanî ve kamu yönetimi/devlet hizmeti kategorileri vardır. Figürün meslekî rolü açık olduğunda ilgili kategoriye atanmıştır. Figür herhangi bir meslekî bağlam içerisinde sunulmadığında mesleki bağlam yok olarak kodlanmıştır. Meslekî bir bağlam bulunmasına rağmen, mesleğin güvenilir biçimde ayırt edilemediği durumlarda belirsiz kodlanmıştır.

Elde edilen kategorik verilerin frekans ve yüzde değerleri 1978 ve 1990 tarihli ders kitapları için ayrı ayrı hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Kodlama sürecinin güvenirliğini değerlendirmek amacıyla 61 dişil figürün tamamı aynı kodlama yönergesi kullanılarak iki kodlayıcı tarafından kodlanmıştır. Kodlama tamamlandıktan sonra yapılan görüşmelerde kodlamalar üzerinde tam mutabakat sağlanmıştır.

4. BULGULAR

4.1. Görsellerde Dişil Figürlerin Görünürlüğü

Araştırmanın ilk sorusunu cevaplamak için 1978 ve 1990 yıllarına ait ders kitaplarında dişil figür içeren görsellerin sayısı belirlenmiş ve bu sayı ilgili kitaptaki toplam görsel sayısına oranlanmıştır. Elde edilen dağılım Tablo 1'de sunulmuştur:

Tablo 1. Dişil figür içeren görsellerin yıllara göre dağılımı

Yıl	Toplam görsel (n)	Dişil figür içeren görsel (n)	Dişil figür içeren görsel (%)
1978	161	9	5,6
1990	191	13	6,8
Toplam	**352**	**22**	**6,3**

Tablo 1'e göre, 1978 tarihli ders kitabında yer alan 161 görselin 9'unda (%5,6), 1990 tarihli ders kitabındaki 191 görselin ise 13'ünde (%6,8) dişil figür bulunmaktadır. Buna göre dişil figür içeren görsellerin toplam görseller içerisindeki payı 1990 kitabında 1978 kitabına göre % 1,2 puan daha yüksektir. İki kitap arasındaki fark sınırlıdır. Her iki kitap birlikte değerlendirildiğinde, incelenen 352 görselin 22'sinde (%6,3) dişil figür yer almaktadır.

4.2. Dişil Figürlerin Yaş/Olgunluk Gruplarına Göre Temsil Durumu

Araştırmanın ikinci sorusunu cevaplamak için, dişil figürlerin (N = 61) çocuk, yetişkin ve yaşlı kategorilerine göre dağılımı incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Dişil figürlerin yaş gruplarına göre dağılımı

Yaş grubu	**1978** n	**1978 %**	**1990 n**	**1990 %**	**Toplam n**
Çocuk	2	9,5	14	35,0	16
Yetişkin	18	85,7	22	55,0	40
Yaşlı	1	4,8	4	10,0	5
Toplam	**21**	**100,0**	**40**	**100,0**	**61**

Tablo 2'ye göre, her iki ders kitabında da dişil figürler en fazla yetişkin grubunda temsil edilmiştir. Yetişkin figürlerin oranı 1978'de %85,7 iken 1990'da %55,0'a düşmüştür. Buna karşılık çocuk figürlerin oranı 1978'de %9,5 iken 1990'da %35,0'a yükselmiştir. Yaşlı figürler ise her iki kitapta da en az temsil edilen yaş/olgunluk grubudur. Bu grubun oranı 1978'de %4,8, 1990'da %10,0'dır.

1978 kitabında dişil temsil yetişkin figürlerde yoğunlaşmaktadır. 1990 kitabında yetişkinler en geniş grubu oluşturmaktadır. 1990'da 1978'e göre daha dengeli bir dağılım yönünde gelişme görülmektedir.

4.3. Dişil Figürlerin Mekânsal Temsil Durumu

Araştırmanın üçüncü sorusu kapsamında, dişil figürlerin (N = 61) hangi mekânlarda temsil edildiği incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 3'te sunulmuştur:

Tablo 3. Dişil figürlerin mekânlara göre dağılımı

Mekân	**1978 n**	**1978 %**	**1990 n**	**1990 %**	**Toplam n**	**Toplam %**
Kamusal/açık alan	9	42,9	14	35,0	23	37,7
Kurumsal mekân	2	9,5	11	27,5	13	21,3
Kırsal	9	42,9	0	0,0	9	14,8
Çatışma/savaş alanı	0	0,0	7	17,5	7	11,5
Mekân yok	1	4,8	8	20,0	9	14,8
Toplam	**21**	**100,0**	**40**	**100,0**	**61**	**100,0**

Tablo 3'e göre, dişil figürler toplamda en fazla kamusal/açık alanlarda (%37,7) temsil edilmiştir. İki ders kitabının mekânsal dağılımları belirgin biçimde farklılaşmaktadır. 1978 kitabında kamusal/açık alanlar ile kırsal mekânlar aynı oranda (%42,9) öne çıkarken, 1990 kitabında kamusal/açık alanlar (%35,0) ilk sırada, kurumsal mekânlar (%27,5) ikinci sırada yer almaktadır. Kırsal mekânda temsil edilen dişil figürlerin tamamı 1978 kitabındadır. Çatışma/savaş alanında yer alan figürlerin tamamı ise 1990 kitabındadır. Mekânsal bir arka planın bulunmadığı temsillerin oranı 1978'de %4,8 iken 1990'da %20,0'dır. Bu dağılım, iki kitapta dişil figürlerin yerleştirildiği mekânsal bağlamların değiştiğini ortaya koymaktadır.

4.4. Dişil Figürlerin Faaliyetlere Göre Temsil Durumu

Araştırmanın dördüncü sorusu kapsamında, dişil figürlerin (N = 61) hangi faaliyetler içerisinde gösterildiği incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Dişil figürlerin faaliyetlere göre dağılımı

Faaliyet	**1978 n**	**1978 %**	**1990 n**	**1990 %**	**Toplam N**	**Toplam %**
Eğitim ve bilim	0	0,0	10	25,0	10	16,4
Durgun	5	23,8	13	32,5	18	29,5
Ev/aile içi	3	14,3	0	0,0	3	4,9
Çalışma veya meslekî	11	52,4	1	2,5	12	19,7
Tüketim	2	9,5	0	0,0	2	3,3
Ulaşım/hareketlilik	0	0,0	6	15,0	6	9,8
Kamusal/sembolik	0	0,0	3	7,5	3	4,9
Askerî/güvenlik	0	0,0	7	17,5	7	11,5
Toplam	**21**	**100,0**	**40**	**100,0**	**61**	**100,0**

Tablo 4'e göre, dişil figürlerin faaliyet dağılımı iki ders kitabında farklıdır. 1978 kitabında figürlerin yarısından fazlası çalışma veya meslekî faaliyetler içerisindedir (%52,4). Bunu durgun (%23,8), ev/aile içi (%14,3) ve tüketim (%9,5) faaliyetleri izlemektedir. 1990 kitabında en geniş grubu durgun biçimde temsil edilen figürler (%32,5) oluşturmaktadır. Eğitim ve bilim (%25,0), askerî/güvenlik (%17,5) ve ulaşım/hareketlilik (%15,0) faaliyetleri bunu izlemektedir. Çalışma veya meslekî faaliyetlerin oranı 1990 kitabında %2,5'tir. Eğitim ve bilim, ulaşım/hareketlilik, kamusal/sembolik ve askerî/güvenlik faaliyetleri yalnızca 1990 kitabında, ev/aile içi ve tüketim faaliyetleri ise yalnızca 1978 kitabında görülmektedir. Bu bulgular, dişil figürlerin ilişkilendirildiği faaliyet türlerinin iki kitap arasında farklılaştığını göstermektedir.

4.5. Dişil Figürlerin Birliktelik Durumu

Araştırmanın beşinci sorusu kapsamında, dişil figürlerin (N = 61) görsellerde kimlerle birlikte temsil edildiği incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Dişil figürlerin birliktelik durumuna göre dağılımı

Birliktelik durumu	**1978 n**	**1978 %**	**1990 n**	**1990 %**	**Toplam n**	**Toplam %**
Karma grup	9	42,9	26	65,0	35	57,4
Hemcins	7	33,3	7	17,5	14	23,0
Karşı cins	2	9,5	3	7,5	5	8,2
Aile içi	3	14,3	1	2,5	4	6,6
Yalnız	0	0,0	3	7,5	3	4,9
Toplam	**21**	**100,0**	**40**	**100,0**	**61**	**100,0**

Tablo 5'e göre, dişil figürler her iki ders kitabında da en fazla karma gruplar içerisinde temsil edilmiştir. Bu kategorinin oranı 1978'de %42,9'dir. 1990'da %65,0'a yükselmiştir. Hemcinslerle birlikte temsil edilme oranı 1978'de %33,3 iken 1990'da %17,5'tir. Karşı cinsle birlikte temsil edilen figürlerin oranı iki kitapta birbirine yakın düzeyde kalmaktadır (%9,5 ve %7,5). Aile içi birliktelik 1978'de %14,3, 1990'da %2,5'tur. 1978 kitabında yalnız temsil edilen dişil figür yoktur. 1990 kitabında 3 figür (%7,5) bu kategoride yer almaktadır. Genel dağılımda, dişil figürlerin yarısından fazlasının (%57,4) karma gruplar içerisinde gösterilmektedir.

4.6. Dişil Figürlerin Kıyafet Özelliklerine Göre Temsil Durumu

Araştırmanın altıncı sorusu kapsamında, dişil figürlerin (N = 61) kıyafet özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 6'da sunulmuştur:

Tablo 6. Dişil figürlerin kıyafet özelliklerine göre dağılımı

Kıyafet Özelliği	1978 n	1978 %	1990 n	1990 %	Toplam n	Toplam %
Gündelik	5	23,8	21	52,5	26	42,6
Üniforma/meslekî	0	0,0	11	27,5	11	18,0
Geleneksel	16	76,2	8	20,0	24	39,3
Toplam	**21**	**100,0**	**40**	**100,0**	**61**	**100,0**

Tablo 6'ya göre, 1978 ve 1990 ders kitaplarında dişil figürlerin kıyafet özellikleri belirgin biçimde farklılaşmaktadır. 1978 kitabında dişil figürlerin büyük çoğunluğu geleneksel kıyafetlerle (%76,2) temsil edilmektedir. Gündelik kıyafetli figürlerin oranı %23,8'dir. Bu kitapta üniforma/meslekî kıyafetle temsil edilen dişil figür bulunmamaktadır. 1990 kitabında gündelik kıyafetler (%52,5) en geniş kategoriyi oluşturmaktadır. Bunu üniforma/meslekî kıyafetler (%27,5) ve geleneksel kıyafetler (%20,0) izlemektedir. 1978 kitabında geleneksel kıyafetlerin ağırlıkta olduğu temsil, 1990 kitabında gündelik ve üniforma/meslekî kıyafetlerin daha fazla yer aldığı bir dağılıma dönüşmektedir.

4.7. Dişil Figürlerin Duygu Durumlarına Göre Temsil Durumu

Araştırmanın yedinci sorusu kapsamında, dişil figürlerin (N = 61) görsellerde hangi duygu durumlarıyla betimlendiği incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Dişil figürlerin duygu durumlarına göre dağılımı

Duygu Durumu	1978 n	1978 %	1990 n	1990 %	Toplam n	Toplam %
Neşeli/mütebessim	0	0,0	7	17,5	7	11,5
Ciddi/nötr	11	52,4	7	17,5	18	29,5
Üzgün/dalgın/yorgun	1	4,8	0	0,0	1	1,6
Öfkeli/sert	0	0,0	1	2,5	1	1,6
Şaşkın/hayret	0	0,0	1	2,5	1	1,6
Belirsiz	9	42,9	24	60,0	33	54,1
Toplam	**21**	**100,0**	**40**	**100,0**	**61**	**100,0**

Tablo 7'ye göre, dişil figürlerin önemli bir bölümünün duygu durumları açık biçimde belirlenememiştir. Belirsiz olarak kodlanan figürlerin oranı 1978'de %42,9, 1990'da %60,0'dır. Duygu durumu belirlenebilen figürler arasında 1978 kitabında ciddi/nötr ifadeler (%52,4) öne çıkarken, neşeli/mütebessim bir ifadeyle temsil edilen figüre rastlanmamıştır. 1990 kitabında ciddi/nötr ve neşeli/mütebessim ifadeler eşit oranda (%17,5) yer almaktadır. Üzgün/dalgın/yorgun ifade yalnızca 1978 kitabında bir figürde (%4,8), öfkeli/sert ve şaşkın/hayret ifadeleri ise yalnızca 1990 kitabında birer figürde (%2,5) görülmüştür. Duygu durumunun belirlenemediği temsillerin ağırlığı her iki kitapta da dikkat çekmektedir. Özellikle 1990 kitabında bu kategori dişil figürlerin çoğunluğunu oluşturmaktadır.

4.8. Dişil Figürlerin Mesleki Temsil Durumu

Araştırmanın sekizinci sorusu kapsamında, dişil figürlerin (N = 61) hangi mesleklerle ilişkilendirildiği incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Dişil figürlerin mesleki temsil durumuna göre dağılımı

Mesleki temsil Durumu	**1978 n**	**1978 %**	**1990 n**	**1990 %**	**Toplam n**	**Toplam %**
Sağlık ve bakım	0	0,0	2	5,0	2	3,3
Ekonomi ve hizmet	10	47,6	0	0,0	10	16,4
Mesleki bağlam yok	3	14,3	12	30,0	15	24,6
Belirsiz	8	38,1	26	65,0	34	55,7
Toplam	**21**	**100,0**	**40**	**100,0**	**61**	**100,0**

Tablo 8'e göre, dişil figürlerin yarısından fazlasında (%55,7) meslek belirsizdir. Yaklaşık dörtte birinde (%24,6) ise herhangi bir mesleki bağlam bulunmamaktadır. İki kitap mesleği belirlenebilen figürler açısından farklılaşmaktadır. 1978 kitabında 10 dişil figür (%47,6) ekonomi ve hizmet alanıyla ilişkilendirilmiştir. Sağlık ve bakım alanında temsil edilen figüre rastlanmamıştır. 1990 kitabında ekonomi ve hizmet alanında kodlanan figür bulunmamaktadır. İki figür (%5,0) sağlık ve bakım alanında temsil edilmiştir. Ayrıca mesleğin belirsiz olduğu figürlerin oranı 1978'de %38,1 iken 1990'da %65,0'a yükselmiştir. Bu dağılım, mesleği açık biçimde belirlenebilen dişil figürlerin 1978 kitabında daha fazla olduğunu ve bu temsillerin ekonomi ve hizmet alanında yoğunlaştığını göstermektedir.

5. Tartışma

Araştırmanın ilk dikkat çekici bulgusu, incelenen iki ders kitabında dişil figürlerin görsel görünürlüğünün oldukça sınırlı olmasıdır. Dişil figür içeren görsellerin oranı 1978 tarihli kitapta %5,6, 1990 tarihli kitapta ise %6,8'dir. İki kitap arasındaki 1,2 yüzde puanlık fark, bu yaklaşımdaki sürekliliği göstermektedir. Bu sonuç, kadın figürlerin ders kitabı görsellerinde sayısal olarak sınırlı temsil edildiğini ortaya koyan ulusal ve uluslararası çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Işık Demirhan, 2021; Jehle vd., 2024; Karaboğa, 2020). Dişil görünürlük her iki kitapta sınırlı kalırken temsil iki dönemde de aynı biçimde yapılandırılmamıştır. İki kitap arasındaki farklılaşma, dişil figürlerin yaş, mekân, faaliyet ve toplumsal ilişki bağlamlarında görünür hâle getirilişlerinde ortaya çıkmaktadır. Bu farklılaşmanın ilk göstergelerinden biri yaş dağılımıdır.

1978 tarihli kitapta dişil figürlerin büyük çoğunluğunu yetişkinler oluşturmaktadır (%85,7). 1990 tarihli kitapta bu oran %55,0'a gerilemiştir. Çocukların oranı %9,5'ten %35,0'a yükselmiştir. Bu dağılım, 1978 kitabında yetişkinlik etrafında yoğunlaşan dişil temsilin 1990 kitabında yaş grupları bakımından daha çeşitli görünüm kazandığını göstermektedir. Ancak, bu değişimi doğrudan daha kapsayıcı ya da eşitlikçi bir temsil biçimi olarak değerlendirmek mümkün değildir. Değişim, dişil temsilin yaş bakımından çeşitlenmesine işaret etmektedir. Bu figürlere tanınan faaliyetler ve toplumsal konumlar, temsilin niteliğine ilişkin ayrı bir boyuttur. Mekân, faaliyet ve kıyafet bulguları birlikte değerlendirildiğinde iki kitap arasındaki farklılaşma daha belirgin hâle gelmektedir. 1978 kitabında kırsal alan (%42,9) ve geleneksel kıyafet (%76,2) güçlü biçimde öne çıkmaktadır. 1990 kitabında kurumsal mekânlar (%27,5), gündelik kıyafet (%52,5) ve üniforma/meslekî kıyafet (%27,5) daha belirgindir. Benzer bir farklılaşma faaliyetlerde de görülmektedir. 1978'de dişil figürlerin yarıdan fazlası iş/meslekî faaliyet içinde gösterilmektedir (%52,4). 1990 kitabında eğitim/bilim (%25,0), ulaşım/hareketlilik (%15,0), askerî/güvenlik (%17,5) ve kamusal/sembolik faaliyetler (%7,5) gibi 1978 kitabında görülmeyen faaliyet alanları yer almaktadır. 1990 kitabındaki dişil figürler,

1978 kitabına kıyasla mekân ve faaliyet bakımından daha çeşitli bağlamlarda temsil edilmektedir. Bu sunum, ders kitabı görsellerinde toplumsal cinsiyet temsilinin figürlerin varlığı yanı sıra içinde bulundukları mekânlar ve gerçekleştirdikleri faaliyetler aracılığıyla da yapılandırıldığını gösteren çalışmalarla birlikte değerlendirilebilir (Huang ve Liu, 2024; Yang ve Zhou, 2023). Ancak 1990 kitabındaki bu çeşitlenme, dişil figürlerin faaliyet ve mesleki temsil bakımından da aynı ölçüde çeşitlendiği anlamına gelmemektedir. Nitekim aynı kitapta en yüksek faaliyet kategorisini durgun temsil oluşturmaktadır (%32,5). İş/meslekî faaliyet oranı %2,5'e düşmektedir. Meslekî temsil bulguları bu gerilimi daha görünür kılmaktadır. 1978 kitabında dişil figürlerin %47,6'sı ekonomi/hizmet alanında mesleki bir bağlam içerisinde tanımlanmaktadır. 1990 kitabında mesleğin belirsiz olduğu figürlerin oranı %65,0'a ulaşmıştır. Dolayısıyla 1978 kitabında meslekî rol daha belirgindir. Ancak, tek bir meslek alanında yoğunlaşma vardır. 1990 kitabında faaliyet ve toplumsal bağlam çeşitlenmiştir. Meslekî rolün görsel olarak belirlenebilirliği daha düşüktür. Bu bulgu, kadınların genel görsel görünürlüğü ile uzmanlık veya meslekî konumlar içerisindeki görünürlüğünün birbirinden ayrı temsil boyutları olduğunu gösteren çalışmalarla uyumludur (Becker ve Nilsson, 2021; Jehle vd., 2024). Bu durum, iki kitap arasındaki farklılığın basit bir gelenekselden moderne geçiş ekseninde okunmasını güçleştirmektedir. İlk bakışta 1978 kitabında geleneksel kıyafetin ve kırsal mekânın ağırlığı, 1990 kitabında ise gündelik ve üniforma/mesleki kıyafetlerin, kurumsal mekânların ve daha çeşitli faaliyetlerin görülmesi böyle bir dönüşüm izlenimi oluşturmaktadır. Ancak meslekî faaliyet ve mesleğin belirlenebilirliği dikkate alındığında aynı doğrultuda ilerleyen bir değişim görülmemektedir. 1978 kitabı kırsal mekân ve geleneksel kıyafetin ağırlığıyla ayrışırken dişil figürleri daha yüksek oranda iş/meslekî faaliyet içinde göstermektedir. 1990 kitabında temsil bağlamları çeşitlenirken meslekî rolün görsel olarak belirlenebilirliği daha düşüktür. Bu sonuç, toplumsal cinsiyet temsilindeki tarihsel değişimin farklı boyutlarda farklı yönlerde gerçekleşebileceğini gösteren araştırmaları desteklemektedir (Goyal ve Rose, 2020; Tabatadze ve Gorgadze, 2023; Yang vd., 2025). Dolayısıyla iki kitap arasındaki farklılığı doğrusal bir ilerleme veya gerilemeden çok, dişil temsil repertuvarının yeniden düzenlenmesi olarak değerlendirmek daha uygundur.

Birliktelik bulguları da bu yeniden düzenlenmenin ilişkisel boyutunu göstermektedir. Her iki kitapta da dişil figürler en çok karma gruplar içerisinde sunulmaktadır. Bu oran 1990 kitabında daha yüksektir (%65,0). Aile bağlamındaki temsil %14,3'ten %2,5'e gerilemiş, 1978 kitabında görülmeyen tek başına temsil 1990 kitabında %7,5 oranında yer almıştır. Bu dağılım, iki kitap arasında dişil figürlerin ilişkisel bağlamlarının farklılaştığını göstermektedir. Birliktelik kategorileri kendi başlarına eylemlilik göstergesi değildir. Karma bir grup içerisinde bulunmak etkin katılımı demek değildir. Tek başına gösterilmek de doğrudan bağımsızlık anlamına gelemez. Bu nedenle birliktelik sunumlarının, faaliyet ve mekân gibi diğer temsil boyutlarıyla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Duygu durumu bulguları daha ihtiyatlı yorumlanmalıdır. Her iki kitap birlikte değerlendirildiğinde figürlerin %54,1'inde duygu durumu belirlenememiştir. Bu oran 1990 kitabında %60,0'a ulaşmıştır. 1978 kitabında ciddi/nötr ifadeler (%52,4) öne çıkmaktadır. 1990 kitabında mutlu/gülümseyen ve ciddi/nötr ifadeler aynı oranda (%17,5) görülmektedir. Özellikle 1990 kitabındaki yüksek belirsizlik oranı nedeniyle bu dağılımdan güçlü bir tarihsel değişim sonucu çıkarmak mümkün değildir.

6. Sonuç

Bu araştırma, 1978 ve 1990 tarihli 5. sınıf Sosyal Bilgiler ders kitaplarında dişil figürlerin görsel temsilini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bulgular, iki kitap arasındaki temel farklılığın dişil figürlerin temsil edilme biçimlerinde ortaya çıktığını göstermektedir. Dişil figür içeren görseller her iki kitapta da sınırlıdır. Ancak, figürlerin yaş, mekân, faaliyet, birliktelik ve kıyafet

bakımından dağılımları belirgin biçimde farklılaşmıştır. Bununla birlikte, bu çeşitlenme bütün temsil boyutlarında aynı yönde gerçekleşmemiştir. Bu durum, ders kitabı görsellerindeki tarihsel değişimin yalnızca dişil figürlerin sayısındaki artış veya azalış üzerinden değerlendirilemeyeceğini ortaya koymaktadır. 1990 tarihli kitapta dişil figürlerin daha çeşitli yaş, mekân ve faaliyet bağlamlarında yer alması, mesleki rollerinin aynı ölçüde belirginleşmesiyle sonuçlanmamıştır. Benzer biçimde, 1978 kitabında geleneksel kıyafet ve kırsal mekânın ağırlığına rağmen iş/meslekî faaliyetlerin daha yüksek oranda görülmesi, temsil biçimlerinin basit bir geleneksel–modern karşıtlığı içerisinde açıklanmasını güçleştirmektedir. İki kitap arasındaki değişim, doğrusal bir ilerleme veya gerilemeden çok dişil temsil repertuvarının farklı boyutlarda yeniden düzenlenmesidir.

Araştırmanın temel katkısı, ders kitabı görsellerindeki dişil temsili yalnızca görünürlük üzerinden değil, figürlerin hangi toplumsal bağlamlarda ve konumlarda görünür kılındıkları üzerinden ele almasıdır. Bu yaklaşım, sayısal görünürlük ile temsilin niteliğinin birbirinden ayrılması gerektiğini göstermektedir. Bir figürün görselde bulunması, ona etkin, çeşitli veya belirgin bir toplumsal konum tanındığı anlamına gelmemektedir. Bu nedenle ders kitaplarındaki toplumsal cinsiyet temsilinin değerlendirilmesinde görünürlük ile yaş, mekân, faaliyet, birliktelik, kıyafet, duygu durumu ve meslekî konum gibi temsil boyutlarının birlikte incelenmesi daha kapsamlı bir değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

Araştırmanın sonuçları incelenen iki ders kitabıyla sınırlıdır. 1978 ile 1990 arasındaki dönemin bütününe genellenemez. İki tarihsel kesit arasındaki farklılıklar da dönemin siyasal, toplumsal veya eğitim politikalarındaki değişimlerin doğrudan etkisi olarak değerlendirilemez. Gelecek araştırmalarda daha fazla tarihsel kesitin ve farklı sınıf düzeylerindeki ders kitaplarının karşılaştırılması, dişil temsil repertuvarındaki değişimin süreklilik ve kırılma noktalarının daha ayrıntılı biçimde izlenmesini mümkün kılabilir. Özellikle görsel görünürlük ile faaliyet, meslek ve toplumsal konum arasındaki ilişkilerin uzun dönemli olarak incelenmesi, ders kitaplarında toplumsal cinsiyet temsilinin tarihsel dönüşümünün daha kapsamlı biçimde anlaşılmasına katkı sağlayabilir

Kaynakça

Adukia, A., Eble, A., Harrison, E., Runesha, H. B. ve Szasz, T. (2023). What we teach about race and gender: Representation in images and text of children's books. *The Quarterly Journal of Economics, 138*(4), 2225–2285. https://doi.org/10.1093/qje/qjad028

Alkış Küçükaydın, M. (2026). A social semiotic analysis of visual representation in science textbooks for Maarif Model for Turkey's century. *Women's Studies International Forum, 114*, 103229. https://doi.org/10.1016/j.wsif.2025.103229

Apple, M. W. (1992). The text and cultural politics. *Educational Researcher, 21*(7), 4–19. https://doi.org/10.3102/0013189X021007004

Azad, M. T. (2020). Gender representation in Iranian high school textbook images. *Language Teaching Research Quarterly, 15*, 50–70. https://doi.org/10.32038/ltrq.2020.15.04

Becker, M. ve Nilsson, M. R. (2021). College chemistry textbooks fail on gender representation. *Journal of Chemical Education, 98*(4), 1146–1151. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01037

Benattabou, D. (2021). Gendered hegemony in the visual discourse of Moroccan EFL textbooks: A quantitative content analysis. *International Journal of Linguistics and Translation Studies, 2*(1), 40–61. https://doi.org/10.36892/ijlts.v2i1.103

Caldwell, E. F. ve Wilbraham, S. (2018). Hairdressing in space: Depiction of gender in science books for children. *Journal of Science and Popular Culture, 1*(2), 101–118. https://doi.org/10.1386/jspc.1.2.101_1

Crawfurd, L., Saintis-Miller, C. ve Todd, R. (2024). Sexist textbooks: Automated analysis of gender bias in 1,255 books from 34 countries. *PLOS ONE, 19*(10), e0310366. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0310366

Demircioğlu, E. ve Özalp, M. T. (2023). Sosyal bilgiler ders kitaplarında kadın bilim insanlarının temsili. *Educational Academic Research*, 47, 80–92. https://doi.org/10.5152/AUJKKEF.2022.991680

Dere, İ. ve Kıral, N. Z. (2022). Türkiye'de sosyal bilgilerin yakın tarihi: 24 yıllık tecrübe (1998–2022). *Uluslararası Sosyal Bilgilerde Yeni Yaklaşımlar Dergisi, 6*(2), 206–224. https://doi.org/10.38015/sbyy.1154914

Erbuyurucu, Z. C. ve Deniz, L. (2024). Sosyal bilgiler ders kitaplarında toplumsal cinsiyetin temsili: İstanbul Sözleşmesi öncesi ve sonrası. *Anadolu Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 8*(3), 896–928. https://doi.org/10.34056/aujef.1230377

Fabbian, C., Valfredini, A. ve Carney, E. Z. (2019). What's in a book? Foreign language textual contents (and discontents). B. Dupuy, K. Michelson, J. Watzinger-Tharp ve K. Paesani (Ed.), *Pathways to paradigm change: Critical examinations of prevailing discourses and ideologies in second language education* içinde (ss. 9–31). Cengage Learning.

Goyal, R. ve Rose, H. (2020). Stilettoed damsels in distress: The (un)changing depictions of gender in a business English textbook. *Linguistics and Education, 58*, 100820. https://doi.org/10.1016/j.linged.2020.100820

Gümüşoğlu, F. (2016). *Ders kitaplarında toplumsal cinsiyet: 1928'den günümüze* (Geliştirilmiş 4. bs.). Tarihçi Kitabevi.

Hernández Flórez, N., Klimenko, O., Banegas Ramírez, J. ve Mendoza Carrión, M. S. (2025). Analysis of the representation of gender equity in the iconography of sixth grade language and literature textbooks in Ecuador. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 6*(2), 103–121. https://doi.org/10.56712/latam.v6i2.3611

Huang, P. ve Liu, X. (2024). Challenging gender stereotypes: Representations of gender through social interactions in English learning textbooks. *Humanities and Social Sciences Communications, 11*(1), 819. https://doi.org/10.1057/s41599-024-03293-x

Hungwe, C., Mugari, Z. E. ve Hungwe, E. (2023). The portrayal of older persons in grade 3 primary school children's textbooks in Zimbabwe. *Educational Gerontology, 49*(3), 251–262. https://doi.org/10.1080/03601277.2022.2102339

Ismiyati, T., Masjid, A. A., Nisa, A. F., Khosiyono, B. H. C. ve Cahyani, B. H. (2026). Visual gender representation in Indonesian language textbooks of the Merdeka Curriculum for primary schools. *AL-ISHLAH: Jurnal Pendidikan, 17*(4). https://doi.org/10.35445/alishlah.v17i4.6882

Işık Demirhan, E. (2021). Toplumsal cinsiyet eşitliği açısından öğretim programı ve ders kitabı inceleme (4. sınıf insan hakları, yurttaşlık ve demokrasi). *Journal of Innovative Research in Social Studies, 4*(1), 69–82. https://doi.org/10.47503/jirss.931329

Jehle, A. M. C., Groeneveld, M. G., van de Rozenberg, T. M. ve Mesman, J. (2024). The hidden lessons in textbooks: Gender representation and stereotypes in European mathematics and language books. *European Journal of Education, 59*(4), e12716. https://doi.org/10.1111/ejed.12716

Karaboğa, M. T. (2020). Sosyal bilgiler ders kitaplarında cinsiyet rolleri. *OPUS Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi, 15*(1), 4847–4881. https://doi.org/10.26466/opus.686709

Kress, G. ve van Leeuwen, T. (2021). *Reading images: The grammar of visual design* (3. bs.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003099857

Krippendorff, K. (2019). *Content analysis: An introduction to its methodology* (4. bs.). SAGE Publications. https://doi.org/10.4135/9781071878781

Nurlu, Ö. (2021). Analysis of gender fairness of primary school mathematics textbooks in Turkey. *International Journal of Psychology and Educational Studies, 8*(4), 78–95. https://doi.org/10.52380/ijpes.2021.8.4.543

Pownall, M. ve Heflick, N. A. (2023). Mr. Active and Little Miss Passive? The transmission and existence of gender stereotypes in children's books. *Sex Roles, 89*(11–12), 758–773. https://doi.org/10.1007/s11199-023-01409-2

Tabatadze, S. ve Gorgadze, N. (2023). Analysis of language textbooks in Georgia: Approaches to gender equality of males and females while teaching languages. *International Journal of Educational Reform, 32*(2), 169–188. https://doi.org/10.1177/10567879221147011

Temur, S. (2025). 5. sınıf sosyal bilgiler ders kitabının toplumsal cinsiyet açısından incelenmesi. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 13*(1), 473–518. https://doi.org/10.52826/mcbuefd.1583199

Wang, Y., Tlili, A., Metwally, A. H. S., Zhao, J., Li, Z., Shehata, B. ve Huang, R. (2023). If images could speak: A social semiotics analysis of gender representation in science textbook images. *Journal of Curriculum Studies, 55*(4), 471–488. https://doi.org/10.1080/00220272.2023.2228376

Yang, C. C. R. (2016). Are males and females still portrayed stereotypically? Visual analyses of gender in two Hong Kong primary English language textbook series. *Gender and Education, 28*(5), 674–692. https://doi.org/10.1080/09540253.2015.1103839

Yang, D. ve Zhou, M. (2023). A social semiotic analysis of gender representations in biology textbooks for upper secondary schools in China. *Education as Change, 27*(1), 1–21. https://doi.org/10.25159/1947-9417/12791

Yang, X., Sun, Y. ve He, H. (2025). Progress and stagnation: A comparative study of gender representation in Chinese language textbooks for junior high school between 2001 edition and 2023 edition. *PLOS ONE, 20*(11), e0334398. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334398

2024 SOSYAL BİLGİLER DERSİ ÖĞRETİM PROGRAMINDA ÖĞRENEN ÖZERKLİĞİ ÜZERİNE BİR DOKÜMAN ANALİZİ

Dr. Gülşah KIYMIK
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Eğitim Bilimleri Bölümü
ORCID ID: 0000-0003-3820-0158
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah TANTA
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Türkçe ve Sosyal Bilimler Eğitimi Bölümü
ORCID ID: 0000-0001-8613-8761

ÖZET

Bu araştırmanın amacı, 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programını öğrenen özerkliği açısından incelemek ve programın öğrencilere öğrenme süreçlerinin farklı unsurları üzerinde hangi karar alanlarını, ne şekilde ve hangi sınırlar içerisinde sunduğunu ortaya koymaktır. Araştırma, nitel araştırma yaklaşımı çerçevesinde doküman analizi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın veri kaynağını 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programı oluşturmuştur. Veriler içerik analiziyle çözümlenmiştir. Analizde öğrencinin yalnızca bir etkinliğe katılması değil, öğrenme sürecinin anlamlı bir unsuru üzerinde seçim veya karar alanına sahip olması özerkliğin temel ölçütü olarak kabul edilmiştir. Bulgular, öğrenen özerkliğinin programda seçim, araştırma, süreç, karar verme, ürün ile inisiyatif ve eylem özerkliği olmak üzere altı biçimde ortaya çıktığını göstermiştir. Öğrenciye sunulan karar alanlarının genişliğinin öğrenme yaşantılarına göre farklılaştığı; bazı durumlarda öğrencinin önceden belirlenmiş seçenekler içerisinde karar verdiği, bazı durumlarda ise konu, soru, süreç veya çözümün belirlenmesinde daha fazla rol üstlendiği belirlenmiştir. Ayrıca kararların bazı öğrenme yaşantılarında bireysel, bazılarında ise müzakere ve ortak karar yoluyla kolektif biçimde yapılandırıldığı görülmüştür. Bulgular bütüncül olarak değerlendirildiğinde, programın farklı karar alanlarından oluşan yapılandırılmış bir özerklik örüntüsü içinde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak öğretim programlarında öğrenen özerkliğinin, öğrencinin ne kadar etkin olduğundan çok, öğrenmenin hangi unsurları üzerinde ne ölçüde karar verebildiği ve bu karar alanlarının nasıl yapılandırıldığı üzerinden değerlendirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Öğrenen özerkliği, sosyal bilgiler, öğretim programı

LEARNER AUTONOMY IN 2024 SOCIAL STUDIES CURRICULUM: A DOCUMENT ANALYSIS

ABSTRACT

This study aims to examine 2024 Social Studies Curriculum from the perspective of learner autonomy and to determine the extent to which the curriculum provides students with autonomy across different dimensions of learning process. The study employed document analysis as a qualitative research method and data obtained from the document were analyzed using content analysis. 2024 Social Studies Curriculum constituted the data source of study. The data were analyzed based on theoretical indicators of learner autonomy. In analysis, learner autonomy was defined not merely in terms of students' participation in an activity but in terms of their opportunities to exercise choice or make decisions regarding meaningful aspects of the learning process. The findings revealed six themes of learner autonomy within the curriculum: choice, inquiry, process, decision-making, product, and initiative and action autonomy. The scope of decision-making opportunities afforded to students varied across learning experiences. In some instances, students made decisions within predetermined options, whereas in others, they

assumed a greater role in determining the topic, question, process, or solution. The findings also indicated that decisions were structured individually in some learning experiences and collectively in others. Overall, the curriculum was found to provide a form of structured autonomy within pedagogical boundaries. Therefore, it is recommended that learner autonomy be evaluated not merely in terms of students' level of engagement in the learning process, but in terms of the areas in which they are able to make decisions and how these decision-making opportunities are structured.
Keywords: Learner autonomy, social studies, curriculum

GİRİŞ

Öğrencinin öğrenme sürecindeki konumu, çağdaş öğretim programlarının temel tartışma alanlarından biridir. Öğrencinin etkin katılımı, seçim yapması, görüşünü ortaya koyması ve öğrenme sürecine yön vermesi, öğrenci merkezli öğrenme anlayışlarının önemli bileşenleri arasında değerlendirilmektedir (OECD, 2024). Bununla birlikte öğrenci katılımının farklı biçimleri, öğrenciye aynı ölçüde özerklik sağlamamaktadır. Öğrencilerin öğrenme ve öğretme süreçlerine katılımına ilişkin çalışmalar, öğrenci görüşünün alınmasından ortak oluşturma ve karar verme süreçlerine kadar uzanan farklı katılım biçimlerinin bulunduğunu göstermektedir (Geurts vd., 2024). Öğrenciye sunulan karar alanı, önceden belirlenmiş seçenekler arasından seçim yapmaktan öğrenmenin içeriği ve süreci üzerinde daha geniş bir karar yetkisine sahip olmaya kadar farklılaşabilmektedir (OECD, 2024). Bu nedenle öğrencinin bir etkinliğe katılması ile öğrenme yaşantısının anlamlı unsurları üzerinde karar yetkisine sahip olması aynı durum olarak değerlendirilemez. Bu ayrım öğrenen özerkliğinin öğretim programlarında nasıl temsil edildiğinin daha dikkatli biçimde incelenmesini gerektirmektedir.

Öğrenen özerkliğinin önemli kuramsal dayanaklarından biri Öz-Belirleme Kuramıdır. Kurama göre özerklik, bireyin davranışlarını yalnızca dışsal baskı veya kontrol altında gerçekleştirmemesini değil, eylemlerini iradi ve kendisi tarafından benimsenmiş olarak deneyimlemesini ifade etmektedir. Bu bakımdan özerklik, bağımsız hareket etmek ya da dışsal yönlendirmelerden bütünüyle uzak olmakla eş anlamlı değildir. Bireyin kendi eylemleriyle özdeşleşmesi ve bu eylemleri isteyerek gerçekleştirmesi önem taşımaktadır (Ryan & Deci, 2017). Öğrenen özerkliği bağlamında ise özerklik, öğrencinin öğrenme amacını, içeriğini ve yöntemlerini belirleyebilmesi, öğrenme sürecini izleyip kontrol edebilmesi ve öğrenme ürününü değerlendirebilmesiyle ilişkilendirilmektedir (Süğümlü, 2017). Eğitim bağlamında özerklik destekleyici öğretime ilişkin çalışmalar, öğrencinin bakış açısının dikkate alınması, seçenekler sunulması, öğrencinin girişimlerinin desteklenmesi ve öğretimsel talepler için açıklayıcı gerekçeler sağlanması gibi uygulamaların önemine dikkat çekmektedir (Reeve, 2006; Reeve & Jang, 2006; Reeve & Halusic, 2009; Reeve & Cheon, 2021).

Özerklik desteği, öğretimsel yapının ortadan kaldırılmasını gerektirmemektedir. Nitekim özerklik desteği ile öğretimsel yapının birbirine karşıt değil, birbirini tamamlayabilen öğretim boyutları olduğu gösterilmiştir (Sierens vd., 2009; Cheon vd., 2020; Patzak & Zhang, 2025). Dolayısıyla öğretim programında amaçların, görevlerin, kaynakların veya pedagojik sınırların önceden belirlenmiş olması tek başına öğrenen özerkliğinin yokluğu anlamına gelmemektedir. Özerklik açısından belirleyici olan, bu yapı içerisinde öğrenmenin hangi anlamlı unsurlarının öğrenci kararına bırakıldığıdır. Bu bağlamda Railton ve Watson (2005), öğrencilerin özerk öğrenme pratiklerinin geliştirilmesini ele aldıkları çalışmalarında "yapılandırılmış özerklik" kavramını kullanmış ve özerkliğin öğrenme, öğretme ve değerlendirme stratejilerinin merkezi bir bileşeni olarak ele alınması gerektiğini belirtmiştir. Bu yaklaşım, öğretimsel yapı ile öğrenen özerkliğinin zorunlu olarak birbirini dışlayan özellikler olmadığını göstermesi bakımından önemlidir.

Öğrenciye sunulan özerkliğin niteliği, yalnızca seçeneklerin bulunmasına değil, öğrencinin öğrenmeyle ilgili hangi kararlar üzerinde ne ölçüde kontrol sahibi olabildiğine de bağlıdır. Hauk ve Gröschner (2022), öğrenci kontrollü öğretimi öğrencilerin öğretimsel kararlar üzerinde belirli ölçülerde kontrol sahibi olabildiği bir yaklaşım olarak ele almaktadır. Bu yaklaşımda öğrenci kontrolünün öğretmen tarafından belirlenen öğretimden öğrencinin daha geniş karar yetkisine sahip olduğu öğrenme ortamlarına uzanan bir süreklilik içerisinde değerlendirilebileceği belirtilmektedir. Ayrıca öğrenci kontrolünün örgütsel, yöntemsel, içerikle ilgili ve hak/normlarla ilgili farklı karar alanlarına yönelebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çerçeve, öğrenen özerkliğinin yalnızca seçim fırsatlarının varlığı üzerinden değil, öğrenciye bırakılan kararların kapsamı ve bu kararların öğrenme sürecinin yönünü ne ölçüde etkileyebildiği üzerinden ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Alanyazına bakıldığında Güvenç (2011) de çalışmasında öğretmenlerin özerklik desteğini öğrencinin karar alma fırsatları ve bu karar alanlarını kullanabilmesine yönelik destek üzerinden ele almış, öğretmenlerin öğrencilere özerklik desteği sağlamakla birlikte karar alma fırsatlarını görece daha sınırlı sunduklarını belirtmiştir. Türkiye'de ortaokul öğrencileriyle gerçekleştirilen bir başka araştırmada ise Koçoğlu ve Kanadlı (2019), öğrencilerin fen bilimleri ve matematik derslerinde algıladıkları özerklik desteğinin eleştirel düşünme eğilimleri ve problem çözme becerileriyle pozitif yönde ilişkili olduğunu ve her iki değişkeni de anlamlı biçimde yordadığını belirtmişlerdir.

Öğretim programları bağlamında öğrenen özerkliğini ele alan çalışmalar da bulunmaktadır. Kılıçaslan ve Ünal (2022), 2018 ortaöğretim İngilizce dersi öğretim programını öğrenen özerkliği açısından incelemiştir. Yıldırım ve Ayvaz Tuncel (2025) ise öğretmenlerin program özerkliği ile öğrenen özerkliğini desteklemeleri arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Kim (2026), Güney Kore'deki yeterlik temelli program reformunu öğrenci failliği açısından incelemiştir. Öğrenci sesi, yapılandırılmış seçim, birlikte tasarım ve öğrenci tarafından yönlendirilen uygulama gibi farklı katılım biçimlerinin programda nasıl temsil edildiğini ortaya koymuştur. Çalışmada yapılandırılmış seçim ve sınırlandırılmış özerklik üzerinden yapılan tartışma, programda öğrenciye seçenek sunulmasının tek başına geniş bir karar yetkisi anlamına gelmeyebileceğine işaret etmektedir (Kim, 2026). Öğrencilerin öğrenme ve öğretmeyle ilgili karar süreçlerine katılımını inceleyen çalışmalar da öğrenci katılımının yalnızca öğrenci görüşünün alınmasıyla sınırlı olmadığını, öğrencilerin ortak oluşturma ve karar verme süreçlerine farklı rollerle katılabildiğini göstermektedir (Geurts vd., 2024). Bu çalışmalar, öğrenen özerkliğinin program bağlamında ele alınabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte öğrenci merkezli etkinliklerin programda bulunması, öğrencinin bu etkinliklerin anlamlı unsurları üzerinde karar yetkisine sahip olduğunu tek başına göstermemektedir. Öğrencinin araştırma yapması, tartışmaya katılması, ürün oluşturması veya öz değerlendirme gerçekleştirmesi, bu süreçlerin hangi unsurları üzerinde karar verebildiği açıklığa kavuşturulmadıkça özerkliğin kapsamını belirlemek için yeterli değildir. Sert (2007), ders planları ve sınıf içi uygulamalarda grup çalışmalarına yaygın biçimde yer verilmesine karşın hedef belirleme ve öz değerlendirme gibi özerk öğrenme etkinliklerinin sınırlı kaldığını belirlemiş, bu tür öğrenci merkezli etkinliklerin tek başına yeterli olmadığını ve diğer özerk öğrenme uygulamalarıyla sistematik biçimde bütünleştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Bu noktadan hareketle bu araştırmada öğrenen özerkliği, öğrencinin öğrenme yaşantısının anlamlı unsurları üzerindeki karar alanı temelinde ele alınmaktadır. Çalışmanın odağı öğrencinin "ne yaptığı" sorusundan "neye karar verebildiği" sorusuna taşınmaktadır. Böylece yalnızca bir karar alanının bulunup bulunmadığı değil, kararın öğrenmenin hangi unsuruna yöneldiği, karar alanının ne ölçüde öğrenciye bırakıldığı ve kararın bireysel ya da kolektif olarak nasıl yapılandırıldığı incelenmektedir.

Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programı bu açıdan anlamlı bir inceleme alanı sunmaktadır. Program; alan becerileri, kavramsal beceriler, sosyal-duygusal öğrenme becerileri, okuryazarlık becerileri, eğilimler ve değerlerin geliştirilmesini ve öğrenmelerin günlük yaşam ve gerçek yaşam deneyimleriyle ilişkilendirilmesini amaçlamaktadır (MEB, 2024). Ayrıca program, disiplinler arası bir anlayışla yapılandırılmış; toplumsal olgu ve olayların yerel, bölgesel, ulusal ve uluslararası düzeylerde ele alınması öngörülmüştür (MEB, 2024). Programın bu yapısı, öğrencinin öğrenme sürecindeki konumunun yalnızca etkinliklere katılımı bakımından değil, öğrenmenin farklı unsurları üzerinde kendisine bırakılan seçim ve karar alanları bakımından da incelenmesini önemli hâle getirmektedir.

Alan yazında öğrenen özerkliğini öğretim programları bağlamında ele alan çalışmalar bulunmakla birlikte, 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programını öğrencinin öğrenmenin farklı unsurları üzerindeki anlamlı karar alanlarının yönü, genişliği ve yapılandırılması açısından sistematik olarak inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu boşluktan hareketle araştırmanın amacı, 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programını öğrenen özerkliği açısından incelemek ve programın öğrencilere öğrenme süreçlerinin farklı unsurları üzerinde hangi karar alanlarını, ne şekilde ve hangi sınırlar içerisinde sunduğunu ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki sorulara yanıt aranmıştır:

1. 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programında öğrenen özerkliği hangi biçimlerde ve nasıl yapılandırılmaktadır?
2. Programda öğrenciye sunulan özerklik alanlarının niteliği nasıl farklılaşmaktadır?
3. Programda öğrenci özerkliğini destekleyen ve sınırlandıran düzenlemeler nelerdir?

YÖNTEM

Araştırma Deseni

Bu araştırma, nitel araştırma yaklaşımı çerçevesinde doküman analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doküman analizi, araştırma problemiyle ilişkili belgelerin sistematik biçimde incelenmesi, değerlendirilmesi ve yorumlanmasına dayanan bir nitel araştırma yöntemidir (Bowen, 2009). Bu çalışmada doküman analizi, 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programında öğrenen özerkliğinin nasıl yapılandırıldığını, öğrencilere öğrenmenin hangi unsurları üzerinde karar alanları sunulduğunu ve bu alanların nasıl sınırlandırıldığını incelemek amacıyla kullanılmıştır.

Araştırmada programda öğrenci merkezli veya etkinlik temelli ifadelerin bulunması tek başına öğrenen özerkliğinin göstergesi olarak kabul edilmemiştir. Bu araştırmada öğrencinin bir etkinlikte ne yaptığından çok, öğrenme yaşantısının hangi anlamlı unsurları üzerinde seçim veya karar sahibi olabildiğine odaklanılmıştır.

Araştırmanın veri kaynağını 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programı oluşturmuştur. Araştırmanın analiz birimini, öğrencinin öğrenme sürecindeki rolünü ve öğrenmenin anlamlı unsurları üzerindeki karar alanını ortaya koymaya olanak sağlayan program ifadeleri oluşturmuştur. Veriler, öğrenen özerkliğine ilişkin kuramsal tartışmalardan hareket eden ve dokümanda ortaya çıkan örüntüler doğrultusunda geliştirilen içerik analiziyle çözümlenmiştir. Bu kapsamda öğrenme çıktıları, öğrenme-öğretme uygulamaları, öğrenme kanıtları, farklılaştırmaya ilişkin açıklamalar ve öğrenciye doğrudan rol yükleyen diğer program ifadeleri incelenmiştir. Analiz yalnızca “seçer”, “karar verir”, “planlar” veya “değerlendirir” gibi anahtar sözcüklerin aranmasına dayandırılmamıştır. Program ifadeleri içinde bulundukları öğrenme yaşantısı dikkate alınarak bağlamsal biçimde değerlendirilmiştir. Öğrencinin etkin olduğu ancak öğrenme yaşantısının anlamlı bir unsuru üzerinde karar yetkisine sahip olmadığı ifadeler doğrudan özerklik göstergesi olarak kodlanmamış; sınır ve karşı örnekler olarak analiz kapsamında tutulmuştur.

Verilerin Analizi

İlk aşamada seçim, karar verme, girişimde bulunma, öğrenme sürecine yön verme ve öz değerlendirme gibi alan yazından türetilen göstergeler, program ifadelerine duyarlılığı artıran duyarlılaştırıcı kavramlar olarak kullanılmıştır. Bu kavramlar nihai tema olarak kabul edilmemiş; programdaki ifadelerin bağlamı ve birbirleriyle ilişkileri dikkate alınarak kodların kapsamı ve sınırları netleştirilmiştir.

İkinci aşamada her program ifadesi için öğrencinin yalnızca bir etkinliği yerine getirip getirmediği değil, öğrenme yaşantısının anlamlı bir unsuru üzerinde seçim veya karar alanına sahip olup olmadığı sorgulanmıştır. Anlamlı karar alanı saptanan ifadelerde kararın yöneldiği unsur belirlenmiştir.

Üçüncü aşamada, aynı özerklik biçimi altında yer alan karar alanlarının eşdeğer olmadığı dikkate alınarak karar alanının genişliği nitel olarak incelenmiştir. Bu amaçla bütün örneklere üç ortak analitik soru uygulanmıştır: (a) Karar seçeneklerini kim oluşturmaktadır? (b) Öğrencinin kararı öğrenme yaşantısının hangi anlamlı unsurlarını etkilemektedir? (c) Öğrencinin verdiği karar sonraki öğrenme sürecinin yönünü ne ölçüde belirlemektedir? Böylece önceden oluşturulmuş seçeneklerden birini tercih etme ile öğrencinin konu, soru, çözüm veya süreç seçeneklerinin oluşumuna katılması analitik olarak birbirinden ayrılmıştır.

Son aşamada kararların bireysel veya kolektif biçimde nasıl yapılandırıldığı ile programdaki destekleyici ve sınırlandırıcı düzenlemeler karşılaştırılmıştır. Bireysel-kolektif karar ayrımı ayrı bir özerklik teması olarak değil, karar alanının yapılandırılmasına ilişkin ikinci düzey bir özellik olarak ele alınmıştır. Altı özerklik biçimi, karar alanlarının farklı genişlikleri ve program tarafından oluşturulan sınırlar birlikte değerlendirildikten sonra ulaşılan "yapılandırılmış özerklik" ise analiz başlangıcında kullanılan bir kod veya yedinci bir tema değil, bulguların bütününe ilişkin üst düzey yorumlayıcı bir örüntü olarak değerlendirilmiştir.

BULGULAR

Analiz sonucunda öğrenci özerkliğinin programda altı görünüm biçimi altında toplandığı belirlenmiştir.

Seçim Özerkliği

Seçim özerkliği, öğrencinin öğrenme yaşantısının anlamlı bir unsuru üzerinde tercih yapabildiği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Dördüncü sınıfta öğrencilerin kendilerine sunulan farklı ürünler arasından seçim yapmaları, seçimlerini gerekçelendirmeleri ve yaptıkları seçimi değerlendirmeleri bu biçimin açık örneklerinden biridir. Burada öğrenci karar sahibidir. Ancak seçenek alanı program tarafından önceden oluşturulduğu için kararın sınırları da program tarafından çizilmektedir (MEB, 2024).

Program incelendiğinde aynı sınıf düzeyinde öğrencinin yakın çevresindeki ortak miras ögelerinden birini seçmesi, seçim özerkliğinin başka bir görünümünü oluşturmaktadır. Bununla birlikte bu etkinlikte ortaya konacak ürünün "tanıtım yazısı" olarak belirlenmiş olması, konu seçiminin öğrenciye bırakılırken ürün biçiminin öğrenci kararına açılmadığını göstermektedir. Benzer biçimde öğrencinin araştırmak istediği doğal kaynağı seçebilmesi, araştırma konusuna ilişkin anlamlı bir karar alanı oluşturmakta; ancak etkinliğin diğer unsurları program tarafından yapılandırılmaya devam etmektedir. Bu örnekler seçim özerkliğinin varlığının, öğrenme yaşantısının bütün unsurlarının öğrenci tarafından belirlendiği anlamına gelmediğini göstermektedir.

Araştırma Özerkliği

Araştırma özerkliği, öğrencinin sorgulamanın yönü veya bilgiyle kurduğu ilişki üzerinde karar sahibi olduğu durumlarda belirginleşmektedir. Beşinci sınıfta öğrencinin merak ettiği konuları belirlemesi, bu konulara ilişkin kendi sorularını oluşturması, bilgi toplaması ve ulaştığı bilgilerin doğruluğunu değerlendirmesi, öğrencinin araştırma sürecinde yalnızca verilen bir

soruya cevap arayan konumda olmadığını göstermektedir. Benzer bir yapı altıncı sınıfta öğrencinin merak ettiği konuyu tanımlaması, soru üretmesi, bilgi toplaması ve doğruluğu değerlendirmesi yoluyla görülmektedir (MEB, 2024).

Araştırma özerkliği yalnızca konu ve soru belirlemeyle sınırlı değildir. Beşinci sınıfta öğrencilerin en az iki kaynağı karşılaştırmaları, resmî ve diğer kaynakların güvenilirliğini değerlendirmeleri ve hangi kaynağı daha güvenilir bulduklarını gerekçelendirmeleri, karar alanının epistemik niteliğini görünür kılmaktadır. Buna karşılık yedinci sınıfta öğrencinin merak ettiği konuyu ve sorularını belirleyebilmesine rağmen araştırmada kullanılacak kaynakların verilmiş olması, aynı öğrenme yaşantısı içinde karar alanının konu ve soru boyutunda daha açık, kaynak boyutunda ise daha sınırlı olabileceğini göstermektedir.

Süreç Özerkliği

Süreç özerkliği, öğrencinin öğrenme etkinliğinin planlanması, yürütülmesi, izlenmesi veya kendi sürecinin değerlendirilmesi üzerinde karar sahibi olduğu durumları kapsamaktadır. Dördüncü sınıfta öğrencinin günlük yaşamına ilişkin somut bir davranış belirlemesi ve bunu belirli bir süre uygulaması, kararın tek bir seçim anında kalmayıp uygulama sürecine taşındığı bir örnektir (MEB, 2024).

Beşinci sınıftaki bütçe çalışması süreç özerkliğinin daha kapsamlı örneklerinden biridir. Öğrencinin kendi bütçesini planlaması, bunu bir süre uygulaması, uygulama öncesi ve sonrasındaki durumunu karşılaştırması ve kendi sürecini değerlendirmesi, planlama-uygulama-izleme-değerlendirme aşamalarının öğrenciyle ilişkilendirildiğini göstermektedir. Yedinci sınıfta toplumsal bir probleme yönelik araştırmanın planlanması ve yürütülmesi de süreç özerkliğini araştırma ve karar verme özerkliğiyle kesişen çok aşamalı bir yapı içerisinde görünür kılmaktadır.

Karar Verme Özerkliği

Karar verme özerkliği, öğrencinin yalnızca bir görüş ifade etmesinden farklı olarak alternatifleri, olası sonuçları, riskleri veya ölçütleri değerlendirerek gerekçeli bir yön belirlemesiyle ortaya çıkmaktadır. Dördüncü sınıfta farklı ürünler arasından seçim yapılması ve bu seçimin gerekçelendirilmesi, karar verme özerkliğinin daha yapılandırılmış bir örneğini oluşturmaktadır (MEB, 2024).

Altıncı sınıfta öğrencinin bir ürün veya ekonomik girişim bağlamında risk ve fırsatları değerlendirerek yatırım ve pazarlamaya ilişkin kararlar vermesi, kararın sonraki uygulamanın yönünü etkilediği daha kapsamlı bir örnektir. Yedinci sınıfta toplumsal bir probleme yönelik çözüm alternatiflerinin ekonomi, güvenilirlik, verimlilik, kullanışlılık ve sürdürülebilirlik gibi ölçütler bakımından karşılaştırılması ve ideal çözümün gerekçelendirilerek belirlenmesi de karar verme özerkliğinin yalnızca tercih değil, değerlendirme ve gerekçelendirme içerdiğini göstermektedir.

Ürün Özerkliği

Ürün özerkliği, öğrencinin bir ürün ortaya koymasından çok, ürünün anlamlı özellikleri üzerinde karar sahibi olmasıyla ilişkilidir. Programda bazı öğrenme yaşantılarında öğrencilerin öğrenmelerini yazılı, görsel veya dijital yollarla ifade edebilmelerine alan açılması, ürünün ifade biçimine ilişkin bir karar alanı oluşturabilmektedir. Yedinci sınıfta ürün türüne ilişkin seçim olanağı sunulan örnekler de bu biçimi desteklemektedir (MEB, 2024).

Bununla birlikte programdaki her ürün oluşturma görevi ürün özerkliği olarak değerlendirilmemiştir. Dördüncü sınıfta öğrencinin ortak miras ögesini seçmesine rağmen ürünün tanıtım yazısı olarak önceden belirlenmesi bu ayrımın açık bir sınır örneğidir. Dolayısıyla "poster hazırlar", "sunum yapar" veya "tanıtım yazısı yazar" gibi önceden belirlenmiş ürün görevleri, öğrenci ürünün biçimi, içeriği, ifade yolu veya revizyonu üzerinde anlamlı bir karar alanına sahip değilse tek başına ürün özerkliği göstergesi sayılmamıştır.

İnisiyatif ve Eylem Özerkliği

İnisiyatif ve eylem özerkliği, öğrencinin kendi fikir veya çözümünü üretmesi ve bu fikri proje, uygulama ya da eyleme dönüştürmesiyle belirginleşmektedir. Beşinci sınıftaki sosyal sorumluluk projesi bu biçimin örneklerinden biridir. Öğrenciler gruplar hâlinde proje fikirleri üretmekte, fikirlerin güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirmekte, alternatifler üzerinde tartışmakta ve sınıfın ortak kararıyla bir projeyi seçerek uygulamaya dönüştürmektedir. Burada özerklik yalnızca fikir üretme aşamasında kalmamakta, ortak karar ve eylem aşamalarına taşınmaktadır (MEB, 2024).

Altıncı sınıfta öğrencilerin toplumsal problemlere yönelik özgün, uygulanabilir ve sürdürülebilir çözümler geliştirmeleri, bu çözümleri akran geribildirimiyle değerlendirmeleri ve yeniden düzenlemeleri de inisiyatif ve eylem özerkliğini desteklemektedir. Bu örneklerde öğrenci, program tarafından verilmiş tek bir çözümü uygulayan kişi değil, çözümün oluşturulmasına ve geliştirilmesine katkıda bulunan bir karar aktörü olarak konumlandırılmaktadır.

Tablo 1. 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programında Öğrenci Özerkliğinin Görünüm Biçimleri

Özerklik Biçimi	Programdaki Örnek Görünüm	Öğrenciye Bırakılan Karar Alanı	Karar Alanının Niteliği
Seçim	Önceden sunulan ürünler arasından seçim yapma ve seçimi gerekçelendirme	Hangi seçeneğin tercih edileceği	Seçenekler program tarafından oluşturulmuş; öğrenci bu alan içinde karar vermektedir.
Seçim - Sınır Durumu	Yakın çevredeki ortak miras ögesini seçme; tanıtım yazısı hazırlama	Ele alınacak ortak miras ögesi	Konu öğrenciye bırakılmış, ürün biçimi önceden belirlenmiştir.
Araştırma	Merak edilen konuyu belirleme ve kendi sorularını oluşturma	Araştırmanın konusu ve soruları	Öğrenci sorgulamanın başlangıç noktasının oluşturulmasına katılmaktadır.
Araştırma - Epistemik Görünüm	Farklı kaynakların güvenilirliğini karşılaştırma	Bilginin/kaynağın güvenilirliğine ilişkin değerlendirme	Araştırma bağlamı yapılandırılmış; öğrenci bilginin niteliği üzerinde gerekçeli değerlendirme yapmaktadır.
Süreç	Kendi bütçesini planlama, uygulama, karşılaştırma ve değerlendirme	Planlama, uygulama ve izleme	Karar alanı sürecin birden fazla aşamasına yayılmaktadır.
Karar Verme	Risk ve fırsatları değerlendirerek yatırım/pazarlama kararı verme	Alternatifler arasından izlenecek yön	Karar gerekçelendirmeye dayanmakta ve sonraki uygulamayı etkilemektedir.
Ürün	Öğrenmeleri farklı ifade/ürün biçimleriyle ortaya koyma	Ürünün ifade biçimi	Öğrenciye ifade yolu bakımından karar alanı sunulmaktadır.
İnisiyatif ve Eylem	Sosyal sorumluluk projesi fikirleri üretme, ortak kararla seçme ve uygulama	Fikir/çözüm ve uygulanacak projenin belirlenmesi	Çok aşamalı, sonraki eylemi belirleyen ve kolektif yapılandırılan karar alanıdır.

Öğrenciye Sunulan Özerklik Alanlarının Niteliği

Programda öğrenciye sunulan karar alanları aynı nitelikte değildir. Karar alanlarının farklılaşması; seçeneklerin kim tarafından oluşturulduğu, öğrencinin kararının öğrenme yaşantısının hangi anlamlı unsurlarını etkilediği ve kararın sonraki sürecin yönünü ne ölçüde

belirlediği üzerinden değerlendirilmiştir. Bu farklılıklar sabit özerklik düzeyleri olarak değil, karar alanının nitel özellikleri olarak ele alınmıştır.

Daha sınırlandırılmış karar alanlarında öğrenci, program tarafından önceden oluşturulan seçenekler içinde karar vermektedir. Dördüncü sınıfta farklı ürünler arasından seçim yapılması bu yapıya örnektir. Ortak miras etkinliğinde ise ele alınacak ögenin öğrenci tarafından seçilmesine karşılık ürün biçiminin tanıtım yazısı olarak belirlenmesi, karar alanının bir unsurda açılırken başka bir unsurda sınırlandırılabileceğini göstermektedir.

Karar alanının daha genişlediği örneklerde öğrenci yalnızca hazır seçeneklerden birini seçmemekte, karar seçeneklerinin veya öğrenme sürecinin başlangıç koşullarının oluşumuna da katılmaktadır. Öğrencinin merak ettiği konuyu belirlemesi ve kendi araştırma sorularını oluşturması buna örnektir. Bununla birlikte yedinci sınıfta konu ve sorunun öğrenci tarafından oluşturulmasına rağmen kaynakların verilmiş olması, aynı öğrenme yaşantısı içinde karar alanının farklı unsurlar bakımından farklı genişliklerde yapılandırılabileceğini göstermektedir.

Bazı öğrenme yaşantılarında karar alanı tek bir tercih noktasından çok birbirini izleyen aşamalara yayılmaktadır. Beşinci sınıftaki sosyal sorumluluk projesinde fikir üretme, alternatifleri değerlendirme, ortak karar oluşturma ve seçilen fikri uygulama birbirine bağlanmaktadır. Yedinci sınıfta toplumsal bir problemi tanımlama, araştırmayı planlama ve yürütme, verileri analiz etme, çözüm alternatiflerini karşılaştırma ve çözüm belirleme de çok aşamalı bir karar alanı oluşturmaktadır.

Kararın kim tarafından verildiği de karar alanının niteliğini farklılaştırmaktadır. Bazı öğrenme yaşantılarında öğrenci bireysel karar verirken, bazı durumlarda öğrenciler kendi veya grup fikirlerini karşılaştırmakta, müzakere etmekte ve ortak bir karar oluşturmaktadır. Beşinci sınıftaki sosyal sorumluluk projesinin sınıfın ortak kararıyla seçilmesi ve dördüncü sınıftaki demokratik katılım çalışmalarında bireysel ve grup fikirlerinden ortak noktaya ulaşılması bu kolektif yapılandırmaya örnektir. Kolektif karar verme ayrı bir özerklik biçimi değil, karar yetkisinin toplumsal olarak nasıl kullanıldığına ilişkin ikinci düzey bir özelliktir.

Bulgular sınıf düzeyi arttıkça özerkliğin doğrusal biçimde yükseldiği biçiminde yorumlanmamıştır. Dördüncü sınıfta da anlamlı seçim, karar ve ortak fikir oluşturma alanları bulunurken, bazı üst sınıf öğrenme yaşantılarında problem tanımlama, araştırma, değerlendirme ve çözüm geliştirme gibi kararların daha çok aşamalı biçimde birbirine bağlandığı görülmektedir.

Öğrenen Özerkliğini Destekleyen ve Sınırlandıran Düzenlemeler

Programdaki düzenlemeler, öğrenen özerkliğini destekleyen ve sınırlandıran özellikler bakımından birlikte değerlendirildiğinde, bu iki durumun kesin bir ikilik oluşturmadığı görülmektedir. Aynı öğrenme yaşantısı bir karar alanını öğrenciye açarken başka bir karar alanını program tarafından belirlenmiş tutabilmektedir. Bu nedenle destekleyici ve sınırlandırıcı özellikler, etkinliğin genel olarak "özerk" veya "özerk değil" biçiminde sınıflandırılması yerine, hangi karar alanlarının açıldığı ve hangilerinin önceden yapılandırıldığı üzerinden değerlendirilmiştir.

Öğrencinin merak ettiği konuyu ve kendi sorularını oluşturması, alternatif fikir veya çözümler geliştirmesi, süreci planlaması, kaynakların güvenilirliğini gerekçeli biçimde değerlendirmesi ve geliştirdiği fikri uygulamaya dönüştürmesi karar alanını genişleten düzenlemeler olarak belirginleşmektedir. Özellikle öğrencinin verdiği kararın sonraki öğrenme sürecini veya gerçekleştirilecek eylemi belirlediği durumlarda karar yetkisi daha görünür hâle gelmektedir. Sosyal sorumluluk projesinde öğrencilerce geliştirilen fikirler arasından ortak kararla seçilen projenin uygulanması buna örnektir.

Buna karşılık konu, problem, kaynak, süreç adımları veya ürün biçiminin önceden belirlenmesi öğrencinin ilgili unsur üzerindeki karar alanını daraltmaktadır. Ancak bu durum özerkliğin

bütünüyle ortadan kalktığı anlamına gelmemektedir. Ortak miras örneğinde konu seçiminin öğrenciye bırakılıp ürün biçiminin belirlenmesi veya araştırma örneğinde konu ve soruların öğrenciye bırakılıp kaynakların verilmesi, yapı ile karar alanının aynı öğrenme yaşantısında birlikte bulunabildiğini göstermektedir.

TARTIŞMA

Bu araştırmada 2024 Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programı, öğrencinin öğrenme sürecine ne ölçüde etkin katıldığı üzerinden değil, öğrenmenin hangi anlamlı unsurları üzerinde karar verebildiği üzerinden incelenmiştir. Bulgular, öğrenen özerkliğinin seçim, araştırma, süreç, karar verme, ürün ile inisiyatif ve eylem özerkliği olmak üzere altı biçimde ortaya çıktığını; ancak bu biçimlerin her durumda aynı genişlikte karar alanları sunmadığını göstermektedir. Bu sonuç, özerkliğin bağımsızlık veya sınırsız serbestlikle eş anlamlı olmadığı yönündeki Öz-Belirleme Kuramı yaklaşımıyla uyumludur (Ryan & Deci, 2017). Özerklik destekleyici öğretim çalışmalarında öğrencinin bakış açısının dikkate alınması, anlamlı seçimlerin sunulması ve girişimlerinin desteklenmesi vurgulanmaktadır (Reeve, 2006; Reeve & Jang, 2006; Reeve & Halusic, 2009; Reeve & Cheon, 2021).

Seçim özerkliğine ilişkin bulgular, seçenek sunulmasının önemli olmakla birlikte tek başına geniş bir karar alanını garanti etmediğini göstermektedir. Program tarafından önceden oluşturulmuş seçeneklerden birini seçmek ile öğrencinin kendi konusunu, sorusunu veya çözümünü oluşturması arasında nitel bir fark bulunmaktadır. Bu nedenle öğrenen özerkliğini "seçim var/yok" biçiminde değerlendirmek yerine, seçimin ne üzerinde gerçekleştiği ve seçenek alanının nasıl oluşturulduğu dikkate alınmalıdır.

Araştırma özerkliği, öğrenen özerkliğinin epistemik yönünü görünür kılmaktadır. Öğrencinin merak ettiği konuyu tanımlaması, kendi sorularını oluşturması ve kaynakların güvenilirliğini değerlendirmesi, onu yalnızca hazır bilgiyi kullanan bir konumdan çıkararak sorgulamanın yönü ve bilginin değerlendirilmesi üzerinde karar sahibi hâle getirmektedir. Süreç özerkliği ise planlama, yürütme, izleme ve değerlendirme üzerindeki karar alanını vurgulamaktadır. Bu nedenle öz düzenleme ile ilişkili olsa da onunla eş anlamlı değildir.

Karar verme özerkliğinin yalnızca görüş bildirmeden, ürün özerkliğinin ise yalnızca ürün oluşturmadan ayrılması çalışmanın önemli sonuçlarındandır. Alternatiflerin ve sonuçların değerlendirilmesiyle gerekçeli bir yön belirlemek karar verme özerkliğini; ürünün biçimi, içeriği, ifade yolu veya revizyonu üzerinde karar sahibi olmak ise ürün özerkliğini görünür kılmaktadır. İnisiyatif ve eylem özerkliği ise öğrencinin kendi fikir veya çözümünü proje, uygulama veya eyleme dönüştürmesi bakımından diğer biçimlerden ayrılmaktadır.

Araştırmanın ikinci önemli sonucu karar alanlarının genişlik bakımından farklılaşmasıdır. Bununla birlikte bu farklılıklar düşük, orta ve yüksek gibi düzeylere dönüştürülmemiştir. Öğrencinin program tarafından oluşturulmuş seçeneklerden birini seçmesi ile kendi sorusunu, çözümünü veya sürecini oluşturması arasındaki fark, seçenek alanının kim tarafından oluşturulduğu, kararın hangi öğrenme unsurlarını etkilediği ve sonraki sürecin yönünü ne ölçüde belirlediği üzerinden nitel olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgu, öğrenci kontrollü öğretimde öğrencilerin içerik ve öğrenme sürecinin düzenlenmesine ilişkin kararlarda farklı ölçülerde kontrol sahibi olabildiğini gösteren Hauk ve Gröschner'in (2022) sistematik derleme bulgularıyla ilişkilendirilebilir. Mevcut araştırma ise bu farklılaşmayı öğretim programı düzeyinde ele alarak özerkliğin yalnızca öğrenciye seçim sunulup sunulmamasıyla değil, öğrenciye bırakılan karar alanının kapsamı ve bu kararın sonraki öğrenme sürecini ne ölçüde yönlendirebildiğiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Özerklik desteği ile öğretimsel yapının zorunlu olarak birbirinin karşıtı olmadığı önceki araştırmalarda gösterilmiştir (Sierens vd., 2009; Cheon vd., 2020). Patzak ve Zhang (2025) tarafından yapılan çalışmada özerklik desteği ile yapı sunumunun birbirini destekleyebilen

öğretimsel özellikler olduğunu görülmektedir. Bu araştırmanın bulguları söz konusu ilişkiyi öğretim programı düzeyinde farklı bir açıdan görünür kılmaktadır. Programın amaç, görev, kaynak, süreç veya ürün için sınırlar belirlemesi öğrenen özerkliğini kendiliğinden ortadan kaldırmamaktadır. Belirleyici olan bu yapı içerisinde öğrenmenin hangi anlamlı unsurlarının öğrenci kararına bırakıldığıdır. Program tarafından oluşturulan yapı içerisinde öğrenciye bırakılan karar alanlarının farklılaşması, Kim'in (2026) yeterlik temelli program reformunda belirlediği yapılandırılmış seçim ve sınırlandırılmış özerklik tartışmasıyla da ilişkilendirilebilir. Bu açıdan öğrenciye seçenek sunulması, karar alanının bütünüyle öğrenci tarafından oluşturulduğu anlamına gelmemekte; program tarafından belirlenen sınırlar içerisinde farklı genişliklerde karar alanları ortaya çıkabilmektedir.

Bulgular, kararların yalnızca bireysel biçimde yapılandırılmadığını da göstermektedir. Bazı öğrenme yaşantılarında öğrenciler fikir üretmekte, önerileri değerlendirmekte, müzakere etmekte ve ortak karar oluşturmaktadır. Bu bulgu, öğrencilerin öğrenme ve öğretmeyle ilgili karar süreçlerine katılımının görüş bildirmekten ortak karar verme ve birlikte oluşturmaya kadar farklı biçimlerde yapılandırılabileceğini gösteren Geurts ve diğerlerinin (2024) çalışması ile de ilişkilendirilebilir. Sosyal Bilgiler bağlamında bu durum özellikle önemlidir. Çünkü öğrencinin karar yetkisi yalnızca bireysel seçimler yoluyla değil, ortak bir kararın oluşturulmasına anlamlı biçimde katılması yoluyla da görünür hâle gelebilmektedir. Kolektif karar alanı yedinci bir özerklik biçimi olarak değil, karar alanının toplumsal olarak nasıl yapılandırıldığına ilişkin ikinci düzey bir özellik olarak değerlendirilmiştir.

Programın sınıf düzeyleri bakımından incelenmesi, öğrenen özerkliğinin doğrusal bir gelişim çizgisi izlediği sonucunu desteklememektedir. Alt sınıflarda da anlamlı seçim, fikir üretme ve ortak karar alanları bulunmaktayken bazı üst sınıf öğrenme yaşantılarında ise problem tanımlama, araştırma planlama, veri değerlendirme, çözüm geliştirme ve karar verme gibi süreçler daha çok aşamalı biçimde birbirine bağlanabilmektedir.

Bu araştırmanın özgün katkısı, öğrenen özerkliğini öğretim programında öğrenci merkezli etkinliklerin bulunması üzerinden değil, öğrenciye bırakılan anlamlı karar alanlarının niteliği üzerinden incelemesidir. Odak öğrencinin "ne yaptığı" sorusundan "neye karar verebildiği" sorusuna taşınmaktadır. Sonuç olarak öğretim programlarında öğrenen özerkliğinin temel göstergesi öğrencinin ne kadar etkin olduğu değil, öğrenmenin hangi unsurları üzerinde anlamlı karar yetkisine sahip olduğu ve bu karar alanının nasıl yapılandırıldığıdır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Araştırmanın sonuçları, öğrenen özerkliğinin programda altı biçimde görünür olduğunu ve bu biçimlerin birbirini dışlayan kategoriler olmadığını ortaya koymuştur. Öğrencinin etkin konumda bulunması ile özerk olması arasında ayrım yapılması gerekmektedir. Araştırma yapma, tartışmaya katılma, sorumluluk üstlenme, ürün oluşturma veya öz değerlendirme tek başına özerklik göstergesi değildir. Belirleyici olan öğrencinin öğrenme yaşantısının anlamlı bir unsuru üzerinde seçim veya karar alanına sahip olmasıdır.

Karar alanlarının genişliği öğrenme yaşantılarına göre farklılaşmaktadır. Bazı durumlarda öğrenci önceden oluşturulmuş seçenekler arasında karar verirken, bazı durumlarda konu, soru, süreç veya çözümün oluşturulmasına daha fazla katılmaktadır. Bazı kararlar tek bir tercih noktasında kalırken bazıları sonraki öğrenme sürecinin yönünü belirleyen çok aşamalı yapılara dönüşmektedir. Kararlar bireysel olabildiği gibi müzakere ve ortak karar yoluyla kolektif biçimde de yapılandırılabilmektedir.

Bulguların bütüncül değerlendirilmesi, programda pedagojik sınırlar içerisinde farklı genişliklerde karar alanlarının oluşturulduğu bir yapılandırılmış özerklik örüntüsüne işaret etmektedir. Bu örüntü yeni bir özerklik türü veya düzeyi olarak değil, program tarafından

belirlenen yapı içerisinde öğrenciye anlamlı karar alanlarının nasıl bırakıldığını açıklayan üst düzey bir yorum olarak ele alınmalıdır.

Öğretim programlarının geliştirilmesi ve değerlendirilmesinde "Öğrenci bu etkinlikte ne yapacaktır?" sorusunun yanında "Öğrenci bu etkinlikte neye karar verecektir?" sorusunun da açık biçimde sorulması önerilebilir. Hazır seçenekler arasından seçim yaptırmanın yanında öğrencinin konu, problem, araştırma sorusu, kaynak, süreç, çözüm veya ürün gibi farklı öğrenme unsurları üzerinde karar verebildiği yaşantılar çeşitlendirilebilir. Sosyal Bilgiler öğretiminde ortak sorunların belirlenmesi, alternatif çözümlerin müzakere edilmesi, ortak karar oluşturulması ve kararların toplumsal eyleme dönüştürülmesi için öğrencilere daha fazla alan açılması özellikle önemlidir.

Gelecek araştırmalarda bu çalışmada belirlenen altı özerklik biçimi farklı derslerin öğretim programlarının incelenmesinde analitik bir başlangıç çerçevesi olarak kullanılabilir. Programın öngördüğü özerklik ile sınıfta gerçekleştirilen ve öğrenciler tarafından deneyimlenen özerklik arasındaki ilişkinin gözlem, görüşme ve farklı veri kaynaklarıyla incelenmesi yararlı olacaktır.

KAYNAKÇA

Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal, 9*(2), 27-40. https://doi.org/10.3316/QRJ0902027

Cheon, S. H., Reeve, J., & Vansteenkiste, M. (2020). When teachers learn how to provide classroom structure in an autonomy-supportive way: Benefits to teachers and their students. *Teaching and Teacher Education, 90,* 103004. https://doi.org/10.1016/j.tate.2019.103004

Geurts, E. M. A., Reijs, R. P., Leenders, H. H. M., Jansen, M. W. J., & Hoebe, C. J. P. A. (2024). Co-creation and decision-making with students about teaching and learning: A systematic literature review. *Journal of Educational Change, 25*, 103-125. https://doi.org/10.1007/s10833-023-09481-x

Güvenç, H. (2011). Sınıf Öğretmenlerinin Özerklik Destekleri ve Mesleki Özyeterlik Algıları. *Kuram ve Uygulamada Eğitim Yönetimi, 1*(1), 99-116. https://izlik.org/JA27CF62UR

Hauk, D., & Gröschner, A. (2022). How effective is learner-controlled instruction under classroom conditions? A systematic review. *Learning and Motivation, 80,* 101850. https://doi.org/10.1016/j.lmot.2022.101850

Kılıçaslan, S., & Ünal, M. (2022). Evaluation of 2018 secondary education English lesson curriculum in terms of learner autonomy. *Türk Akademik Yayınlar Dergisi (TAY Journal), 6*(2), 406–428.

Kim, S. (2026). Reframing student agency: From voice to design in South Korea's competency-based curriculum reform. *Educational Research and Evaluation, 31*(5-6), 389-413. https://doi.org/10.1080/13803611.2026.2651082

Koçoğlu, A., & Kanadlı, S. (2019). Ortaokul Öğrencilerinin Algıladığı Özerklik Desteği, Eleştirel Düşünme Eğilimleri ve Problem Çözme Becerileri Arasındaki İlişkisinin İncelenmesi. *Trakya Eğitim Dergisi, 9*(1), 61-77. https://izlik.org/JA66ZM62SE

Millî Eğitim Bakanlığı. (2024). Sosyal Bilgiler Dersi Öğretim Programı (4, 5, 6 ve 7. sınıflar). Millî Eğitim Bakanlığı.

OECD. (2024). *Curriculum flexibility and autonomy: Promoting a thriving learning environment*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/eccbbac2-en

Patzak, A., & Zhang, X. (2025). Blending teacher autonomy support and provision of structure in the classroom for optimal motivation: A systematic review and meta-analysis. Educational Psychology *Review, 37,* Article 17. https://doi.org/10.1007/s10648-025-09994-2

Railton, D., & Watson, P. (2005). Teaching autonomy: 'Reading groups' and the development of autonomous learning practices. *Active Learning in Higher Education, 6*(3), 182–193. https://doi.org/10.1177/1469787405057665

Reeve, J. (2006). Teachers as facilitators: What autonomy-supportive teachers do and why their students benefit. *The Elementary School Journal, 106*(3), 225-236. https://doi.org/10.1086/501484

Reeve, J., & Cheon, S. H. (2021). Autonomy-supportive teaching: Its malleability, benefits, and potential to improve educational practice. *Educational Psychologist, 56*(1), 54-77. https://doi.org/10.1080/00461520.2020.1862657

Reeve, J., & Halusic, M. (2009). How K–12 teachers can put self-determination theory principles into practice. *Theory and Research in Education, 7*(2), 145-154. https://doi.org/10.1177/1477878509104319

Reeve, J., & Jang, H. (2006). What teachers say and do to support students' autonomy during a learning activity. *Journal of Educational Psychology, 98*(1), 209–218. https://doi.org/10.1037/0022-0663.98.1.209

Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2017). *Self-determination theory: Basic psychological needs in motivation, development, and wellness.* Guilford Press.

Sert, N. (2007). Öğrenen Özerkliğine İlişkin Bir Ön Çalışma. *İlköğretim Online, 6*(1), 180-196. https://izlik.org/JA23RN76DG

Sierens, E., Vansteenkiste, M., Goossens, L., Soenens, B., & Dochy, F. (2009). The synergistic relationship of perceived autonomy support and structure in the prediction of self-regulated learning. *British Journal of Educational Psychology, 79*(1), 57–68. https://doi.org/10.1348/000709908X304398

Süğümlü, Ü. (2017). Öğrenci özerkliği kavramı üzerine kuramsal bir çalışma. International *Journal of Languages' Education and Teaching, 5*(1), 690-708. https://izlik.org/JA62EC54YN

Yıldırım, E., & Ayvaz Tuncel, Z. (2025). Does curriculum autonomy support student autonomy? A R-based analysis. International *Journal of Curriculum and Instructional Studies, 15*(1), 29–50. https://doi.org/10.31704/ijocis.1661073

THE CONCEPT IN LANDSCAPE DESIGN: DEFINITION, PROCESS, AND ITS IMPLICATIONS FOR DESIGN

Şevval ÖZKAL
Niğde Ömer Halisdemir University, Institute of Natural Science, Department of Landscape Architecture, 51240, Niğde
ORCID ID: 0009-0008-4386-9036
Assist. Prof. Dr. Barış KAHVECİ
Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Architecture, Department of Landscape Architecture, 51240, Niğde
ORCID ID: 0000-0002-8508-1748
Assist. Prof. Dr. Nuriye Ebru YILDIZ
Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Architecture, Department of Landscape Architecture, 51240, Niğde
ORCID ID: 0000-0002-3508-4895

ABSTRACT
In landscape design, a concept functions as an organizing framework that connects site characteristics, user requirements, and design problems with spatial decisions and contributes to overall design coherence. This study examines how design concepts are defined and developed, how they are reflected in design components, their main types, and their role in landscape design and education. This study adopted a qualitative research approach, combining a literature review with a multiple case study analysis of selected published project documents and visual materials. The selected cases were examined comparatively for conceptual clarity, relationship to the site and users, translation into spatial design components, consistency across scales, and contribution to spatial identity. The analysis indicates that a concept extends beyond establishing a formal or visual theme and can provide a common framework for organizing decisions related to spatial organization, circulation, form, planting, materials, and site furnishings. Examples include Parc de la Villette, the High Line, Superkilen, Sissinghurst, Gardens by the Bay, Qunli Stormwater Park, Cheonggyecheon, Madrid Río, and the Bostanlı Sunset Lounge in İzmir, which illustrate how conceptual approaches can translate into different spatial decisions across diverse scales and contexts. Accordingly, the concept should be considered not merely a visual device used in the presentation phase of landscape design, but an organizing design framework that establishes continuity across analysis, problem definition, conceptual development, and spatial decision-making.
Keywords: Concept, Conceptual Design, Landscape Design, Design Process, Landscape Architecture

PEYZAJ TASARIMINDA KONSEPT: TANIM, SÜREÇ VE TASARIMA YANSIMALARI

ÖZET
Peyzaj tasarımında konsept, alan özellikleri, kullanıcı gereksinimleri ve tasarım problemleri ile mekânsal kararlar arasında ilişki kuran ve tasarımın genel bütünlüğünü yönlendiren örgütleyici bir çerçeve olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada konseptin tanımı ve geliştirilme süreci, tasarım bileşenlerine yansıması, başlıca türleri ve peyzaj tasarımı ile tasarım eğitimi açısından işlevi incelenmiştir. Araştırma nitel bir yaklaşımla yürütülmüş; literatür taraması ile seçilmiş ve

yayımlanmış proje belgeleri ile görsel materyallere dayalı çoklu örnek olay incelemesi birlikte kullanılmıştır. Örnek projeler; konseptin açıklığı, alan ve kullanıcılarla ilişkisi, mekânsal tasarım bileşenlerine aktarımı, farklı ölçeklerdeki tutarlılığı ve mekânsal kimliğe katkısı açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, konseptin yalnızca biçimsel veya görsel bir tema oluşturmanın ötesinde, mekânsal organizasyon, dolaşım, form, bitkisel tasarım, malzeme ve donatı kararlarını ortak bir tasarım mantığı içinde ilişkilendiren bir çerçeve sağlayabildiğini göstermektedir. Parc de la Villette, High Line, Superkilen, Sissinghurst, Gardens by the Bay, Qunli Yağmur Suyu Parkı, Cheonggyecheon, Madrid Río ve İzmir Bostanlı Gün Batımı Terası örnekleri, farklı ölçek ve bağlamlarda kavramsal yaklaşımların çeşitli mekânsal kararlara nasıl aktarılabildiğini göstermektedir. Sonuç olarak konsept, peyzaj tasarımında yalnızca sunum aşamasında kullanılan görsel bir araç olarak değil; analiz, problem tanımlama, kavramsal geliştirme ve mekânsal kararlar arasında süreklilik sağlayan örgütleyici bir tasarım çerçevesi olarak ele alınmalıdır.
Anahtar Kelimeler: Konsept, Kavramsal Tasarım, Peyzaj Tasarımı, Tasarım Süreci, Peyzaj Mimarlığı

1. INTRODUCTION

Landscape design is a multidimensional field that requires evaluating data on the natural and cultural environment, as well as user needs and design objectives. In this process, design decisions should not be based solely on aesthetic preferences; instead, they should establish meaningful and consistent relationships among the site's character, functional requirements, ecological conditions, and user experience. Lynch (1960), who emphasizes the legibility of the environment in the perception of the urban environment and the formation of spatial identity, demonstrates that design is not merely a process of producing physical forms. Similarly, Altunkasa and Uslu (2016) approach landscape design as a process that moves from conceptual thinking to concrete form; this approach shows that concept is a fundamental component guiding design decisions.

In the early stages of the design process, a reciprocal relationship is established among sources of inspiration, the design problem, and conceptual thinking. Intellectual and visual inputs from sources of inspiration, combined with understanding and interpretation of the design problem, lay the groundwork for developing original ideas; over time, these ideas evolve into a design concept that structures the design problem and guides the search for solutions. Therefore, the design process can be viewed not as a linear sequence of independent stages, but rather as a dynamic process of thinking and creation characterized by continuous interactions between the definition, conceptualization, and resolution of the problem (Goldschmidt & Litan Sever, 2009; Yuhaniz et al., 2024).

As general problem-solving theories emphasize, a design problem requires evaluating multiple variables simultaneously and structuring them within a framework that enables solution generation (Newell & Simon, 1972). In landscape design, the concept serves as an organizing idea that unifies the process's components within a common conceptual framework and guides design decisions. While Reid (2007) identifies the transition from concept to form as a fundamental challenge in landscape design, Mumcu and Düzenli (2018) highlight the importance of the relationship among the design problem, sources of inspiration, and conceptual approach in the early design stages. In this context, the concept is not merely a title, theme, or visual narrative element on a drawing; it is a fundamental design tool that helps interpret the problem, develop alternatives, and integrate different design decisions into a cohesive whole.

The concept’s function in the design process is not merely to transform an abstract idea into form. The concept must reveal the fundamental relationships in the design problem, organize

them within a design logic, and render them translatable into spatial decisions. In this translation process, form, spatial organization, circulation, planting, materials, topography, and other design components can constitute the concrete manifestations of the concept. Thus, conceptual thinking provides a framework for solving the design problem, thereby supporting the design product's formal and functional integrity. This approach is also significant for developing design thinking in landscape architecture education and highlights the importance of conceptual and design knowledge in defining professional competencies (Steinitz, 1990; Goldschmidt & Litan Sever, 2009; Ortaçeşme, 2020).

This study aims to explain how a concept is defined in landscape design, how it relates to sources of inspiration and the design problem, the processes through which it develops, and how it translates into the various components of the design. Accordingly, the studyprocesss the conceptual design process, analyzes different types of concepts, and compares landscape projects of various scales and qualities using common analytical criteria. The central question of this study is: What design relationships enable a design idea to evolve into a strong and functional concept, and how does this concept generate spatial identity, coherence, and meaning? Within this framework, the study approaches the concept not merely as an idea generated at the initial stage of design, but as an integrative design tool that guides the process from interpreting the design problem to creating the final design product.

2. MATERIAL AND METHODS

The materials for this study consist of national and international scientific studies published in landscape design and design theory, as well as selected landscape projects in which the relationship between concept and design can be clearly traced. The literature was examined within the framework of conceptual design, design problems, sources of inspiration, landscape design principles, sustainability, and design education; project examples were selected from urban parks, public open spaces, private gardens, ecological and sustainable landscapes, and nature- and water-themed designs. The primary selection criterion was that project descriptions, design reports, drawings, and visual documents could trace how the concept translated into design decisions.

The study adopted a qualitative research approach, comprising the following stages: literature review, sample selection, content analysis, multiple-case study analysis, and comparative evaluation. Through the literature review, the study defined the concept, examined its relationship to the design problem, traced its development, and explained how it translates into design, thereby establishing a theoretical framework. The study examined the selected projects using a multiple case study approach based on published project descriptions and visual sources. Francis (2001) has demonstrated that the case study approach can be used in landscape architecture to analyze design knowledge. The study did not involve on-site observations, user interviews, or behavioral analysis; the analysis was limited to existing publications and project documents.

During coding and analysis, each project was coded under the headings of concept definition, design problem or contextual requirement, spatial response, and concept type. Thus, the analysis was conducted through the relationship: concept → problem/context → spatial decision → concept type. The coded data were then compared based on five evaluation criteria: clarity of the concept, its relationship to the context, the degree of reflection in the design, consistency across scales, and the strength of identity. Clarity refers to the concept’s comprehensibility and traceability; relationship to context refers to the connections it establishes with the site’s natural, physical, ecological, and sociocultural characteristics; the degree of reflection refers to the concept’s translation into decisions regarding form, circulation,

landscaping, and materials; consistency across scales refers to continuity from the overall framework down to the details; and identity strength refers to the concept's ability to impart a unique and recognizable character to the space. These criteria were used not for numerical scoring but to qualitatively compare the projects within a common analytical framework.
In the final stage, project findings were compared to identify recurring patterns and divergent design approaches. Thus, the evaluation focused not only on the formal characteristics of the projects but also on the concept's relationship to the design problem and context, and on how this relationship was translated into spatial decisions. The research presents a comprehensive analytical framework to show how the concept guides the design process in landscape architecture.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Definition of the Concept and Conceptual Framework

A concept is the fundamental idea or organizing principle that gives meaning to a design problem, guides design decisions, and integrates different decisions within a common conceptual framework. However, not every initial idea qualifies as a concept. Single terms such as "water," "memory," or "journey" may serve as sources of inspiration or ideas that initiate the design process; but it is the process of developing these ideas in line with the physical, ecological, and sociocultural characteristics of the site, as well as user needs, and transforming them into a design logic that can be translated into spatial decisions that elevates them to the level of a concept (Reid, 2007; Mumcu & Düzenli, 2018). In this regard, a concept is more than just an abstract theme; it is a reasoned intellectual framework that interprets the design problem and guides the search for solutions.
In solving the design problem, the source of inspiration, the initial idea, the problem domain, and the search for solutions are interdependent. The design problem has an open-ended structure that requires evaluating multiple variables simultaneously and developing alternative solutions. In Goldschmidt's (1997) approach to the design problem space, alternatives and transitions between the initial and target states vary (Figure 1). In this process, rather than proceeding directly from the initial problem to a single solution, the designer evaluates alternatives, navigates the problem space, and develops appropriate solution paths toward the design objectives. In this context, the concept becomes a fundamental tool that shapes the design process by linking the problem domain to the solution domain.
Another important function of the concept is to serve as a design filter that tests design decisions. As the designer makes decisions about form, spatial organization, circulation, landscaping, materials, and fixtures, they examine how consistent these decisions are with the concept, the design problem, and the site's contextual characteristics. Thus, the concept helps select options from an unlimited array of design possibilities while ensuring that decisions relate within a common framework. While Goldschmidt (1997) highlights the uncertain and open-ended nature of design problems, Eckert and Stacey (2000) demonstrate that sources of inspiration form a reference and interpretation system within design thinking.
For this reason, a concept should be viewed not merely as an idea formed at the very beginning of the design process and preserved unchanged thereafter, but as an iterative decision-making tool that can be reinterpreted during the development and evaluation of alternatives. A strong concept must ensure continuity from identifying the source of inspiration to understanding the design problem, interpreting contextual data, developing alternatives, and integrating spatial decisions. A concept's success depends not only on its ability to present an original idea, but also on its ability to explain the design problem, establish a relationship with the context, and

be consistently reflected across the design's various scales and components (Goldschmidt, 1997; Goldschmidt & Litan Sever, 2009; Mumcu & Düzenli, 2018).

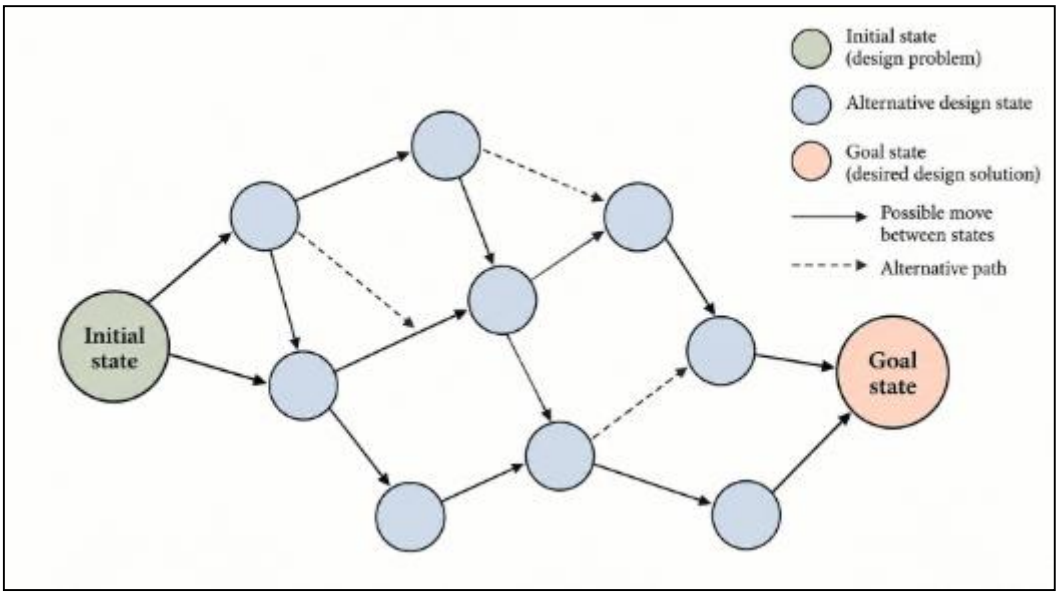


Figure 1. Schematic representation of alternative design states progressing from the initial state to the target state within the design problem space (adapted from Goldschmidt, 1997; based on Holyoak, 1990).

3.2. Concept Development Process

Concept development should be approached as an iterative design process in which analysis, interpretation, idea generation, and testing feed into one another. At the beginning of the process, the fundamental components of the design problem are identified by jointly evaluating the site's natural, physical, and built environmental characteristics, as well as user, functional, and sociocultural data. Analyzing site data in different layers enables interpretation of relationships among land use, topography, vegetation, infrastructure, historical features, and environmental conditions, allowing a more holistic definition of the design problem (Figure 2). This approach aligns with McHarg's (1969) analytical framework, which is based on the layered evaluation of natural and cultural data.

By synthesizing the analysis results, the fundamental relationships, opportunities, and constraints related to the design problem are identified. At this stage, sources of inspiration and key concepts are evaluated to develop initial ideas; these ideas are then linked to the site's characteristics and design requirements and transformed into a conceptual framework. The conceptual framework is concretized through diagrams and other visual tools and translated into design decisions such as spatial organization, circulation, form, landscaping, and materials (Chulvi et al., 2022; Mohammad & Alabdulla, 2022). Designers then reevaluate the resulting decisions for consistency with the concept and revise the analysis, ideas, and spatial decisions as needed (Goldschmidt, 1997; Mumcu & Düzenli, 2018). Therefore, concept development is not a one-way sequence from analysis to design, but an integrated process with continuous feedback loops among analysis, synthesis, conceptualization, design, and evaluation.

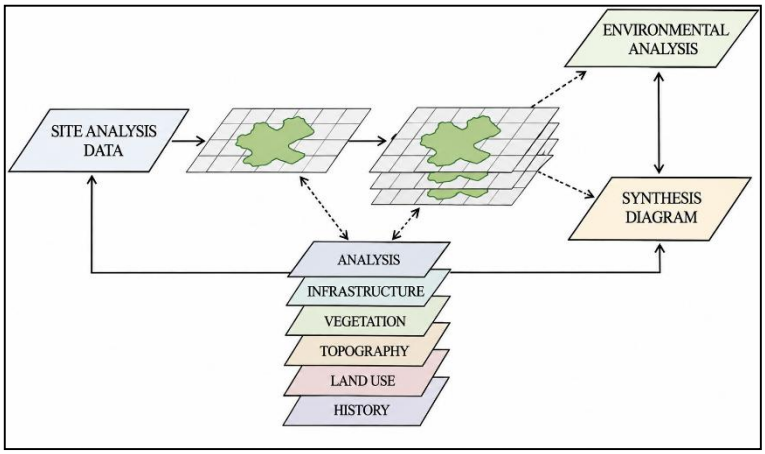


Figure 2. Schematic representation of the layered analysis and synthesis of site information based on the ecological site analysis approach of McHarg (1969).

Within this framework, the concept development process follows an iterative structure in which the stages—site analysis, sociocultural analysis, identification of issues and potentials, definition of the design problem, identification of sources of inspiration, and development of key concepts—feed into one another. Joint evaluation of the site's natural, physical, and built environmental characteristics, along with user, usage, and sociocultural data, establishes the design problem's scope and priorities. This analysis transforms the identified issues, potentials, requirements, and opportunities into a conceptual framework by linking them to relevant sources of inspiration and key concepts. At this stage, concepts must move beyond verbal expressions and become principles that guide the design by defining their relationships. The conceptual framework created is then concretized through diagrams, schematics, and other visual tools and translated into design components such as spatial organization, form, circulation, landscaping, and materials. Synthesizing site data by evaluating its physical, biological, and cultural components links research findings to design decisions and supports a more reasoned design process (LaGro, 2001; Milburn & Brown, 2003). Sources of inspiration and different types of information also play an important role in developing the conceptual approach (Mumcu & Düzenli, 2018). However, concept development is not a linear sequence of steps; a new finding or alternative that emerges during the design process may require reassessing previous analyses, the problem definition, or the conceptual framework. Therefore, a concept is not merely the direct sum of analytical findings; rather, it is an integrative design framework that guides design decisions and can be restructured as needed, formed through interpreting problems, potentials, user needs, contextual data, and sources of inspiration.

3.3. The Reflection of the Concept in Design

From a design perspective, the concept's function emerges by transforming an abstract idea into concrete, coherent, and context-sensitive spatial decisions. This transformation is not merely about producing a formal expression; it encompasses the interrelation of various design components—such as spatial organization, movement and circulation, form, landscape design, hard surfaces, furnishings, color, texture, and materials—within a common conceptual framework. From this perspective, the concept serves as an organizational tool that guides design decisions and ensures coherence across spatial scales (Altunkasa & Uslu, 2016; Moraitis, 2024).

The concept's reflection in spatial organization and circulation decisions is clearly evident in the Parc de la Villette project in Paris (1982–1998). Designed by Bernard Tschumi, the project incorporates a system of dispersed "points," represented by the red follies, together with a

system of “lines” that emphasizes movement through the park (Figure 3). Thus, the conceptual approach becomes an organizational system that guides user movement, focal points, and spatial relationships, rather than merely producing a visual form (Bernard Tschumi Architects, 2026). This demonstrates that a concept can be approached not as a direct design form, but as a system that guides design decisions and establishes relationships among them.

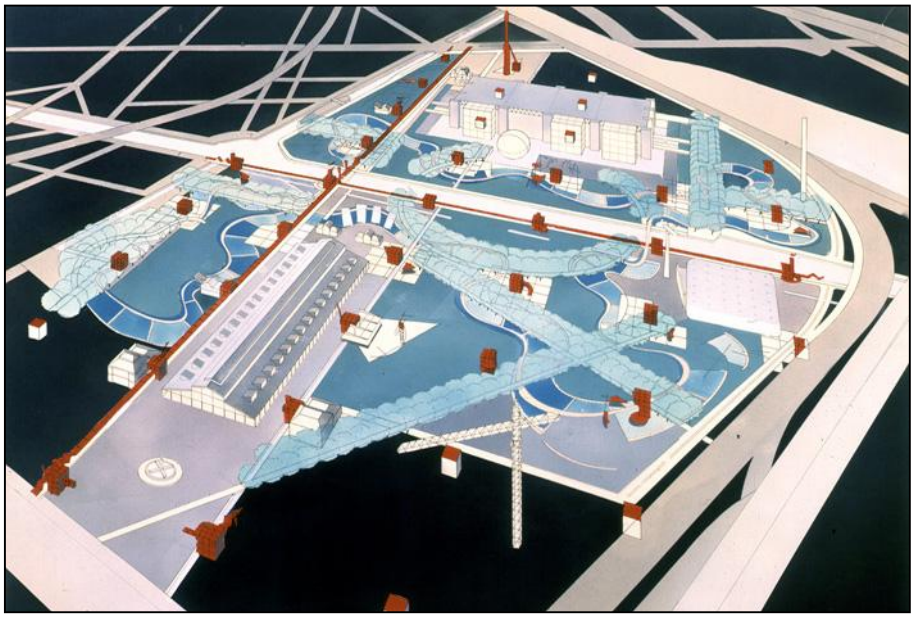


Figure 3. The conceptual relationship between movement, linear systems, and focal points at Parc de la Villette (Bernard Tschumi Architects, 2026).

The concept can also translate into design through different formal languages. While geometric approaches emphasize relationships based on order, rhythm, axes, symmetry, and repetition, organic approaches may feature fluid lines, natural forms, continuity, and more free-flowing spatial relationships. However, what matters is not that the concept dictates a specific form, but that the chosen formal language aligns with the design’s fundamental idea. Therefore, a preference for geometric or organic forms does not, by itself, constitute a concept; formal decisions must relate to the design problem, site data, and the defined conceptual framework (Altunkasa & Uslu, 2016).

Evaluate the concept's reflection in other design components within a similar framework of coherence. Spatial organization can guide the hierarchy and relationships of sub-spaces; circulation and axes can guide user movement and experience; form, line, and geometry can define the design’s formal character; and landscape design can influence color, texture, seasonal changes, and the spatial atmosphere. Similarly, treat decisions about hard surfaces, furnishings, color, texture, and materials as tools that support the concept’s perceptual and functional dimensions (Düzenli et al., 2018; Moraitis, 2024). Therefore, evaluate the concept's reflection in the design not through a single component but through the integration of different components in accordance with the same conceptual logic (Altunkasa & Uslu, 2016). Moraitis’s (2024) approach to landscape design—which focuses on abstraction, schematization, and the creation of formal systems—also supports this integrative relationship. In this regard, Table 1 summarizes the concept’s guiding influence on the fundamental design components.

Table 1. Reflection of the concept in the basic design components

Design component	Guiding influence of the concept
Spatial organization	Guides the configuration, hierarchy, and relationships among subspaces.
Circulation and axes	Determines the organization of pedestrian and bicycle routes and axes based on movement and user-experience scenarios.
Form, lines, and geometry	Guides the development of organic, geometric, or hybrid formal language and establishes the overall design character.
Planting design	Guides plant selection, texture, color, and seasonal variation to support the concept's intended atmosphere.
Hardscape and site furniture	Guides the form, material, and functional decisions for paving, seating, lighting, and other site-furniture elements.
Color, texture, and materials	Establishes the material and color palette, reinforcing the perceptual character and identity of the design.

3.4. Types of Concepts

The reviewed literature and selected project examples indicate that landscape design concepts cannot be reduced to a single, universally applicable classification system. Concepts may emerge from different sources of inspiration, design problems, contextual conditions, user requirements, or environmental objectives. Therefore, this study treats concept types not as rigid, mutually exclusive categories, but as analytical frameworks that help identify the dominant orientation of a design concept (Mumcu & Düzenli, 2018).

Based on a synthesis of the reviewed literature and an analysis of selected landscape design examples, five principal concept types are identified: nature-based, cultural/thematic, function-oriented, abstract conceptual, and sustainability/ecology-based. These categories are not mutually exclusive; a single project may incorporate characteristics of more than one conceptual type. For instance, a design may combine a nature-based approach with ecological and sustainability objectives, while a cultural or thematic concept may simultaneously incorporate functional and symbolic considerations. Accordingly, this classification does not assign projects to rigid categories; instead, it identifies the dominant conceptual orientations through which design decisions are developed and spatially expressed. Table 2 summarizes the main characteristics, design focuses, and typical application contexts of these concept types.

Table 2. Major types of design concepts in landscape design and their main characteristics

Concept type	Fundamental approach/basis	Design focus	Typical application/example
Nature-based	Draws upon natural systems, processes, and forms.	Organic forms, ecological continuity, and the integration of natural processes into design	Nature parks, river corridors, coastal and stream rehabilitation
Cultural/thematic	Draws upon local culture, history, memory, narratives, and symbols.	Symbolic elements, narrative structure, cultural identity, and spatial meaning	Historic squares, memorial spaces, themed parks
Function-oriented	Considers user needs, patterns of use, and activities as fundamental design inputs.	Accessibility, safety, use intensity, and functional relationships	Sports and recreation areas, children's playgrounds, campuses

Abstract conceptual	Translates a metaphor, emotion, philosophical idea, or abstract thought into a spatial language.	Form–emotion relationships, symbolic geometry, continuity, layering, and permeability	Contemporary urban parks, art-oriented spaces, memorial gardens
Sustainability / ecology-based	Adopts ecological balance, resource efficiency, biodiversity, and climate adaptation as fundamental design considerations.	Rainwater management, local/native plant palettes, resource efficiency, and ecological continuity	Rain gardens, ecological parks, sustainable urban landscapes

3.4.1. Nature-Based Concepts

Nature-based concepts consider natural systems, processes, forms, and ecological relationships as fundamental inputs to the design process (Düzenli & Alpak, 2016). Rather than treating nature merely as a visual source of inspiration, this approach translates natural processes and ecological relationships into spatial and functional design decisions. McHarg's (1969) approach, based on the layered analysis of natural and cultural environmental data, constitutes an important theoretical foundation for understanding how environmental processes can inform landscape design.

Gardens by the Bay demonstrates how biomimetic references can be combined with planting design and technological systems to establish a distinctive spatial language. In Qunli Stormwater Park, by contrast, wetland ecology is integrated with stormwater management, transforming ecological processes into functional landscape infrastructure (Figure 4). These examples show that nature can function not only as a formal reference but also as an organizing principle that informs a landscape's spatial and functional structure (Grant Associates, 2026; Turenscape, 2011).



Figure 4. Spatial expression of a biomimetic and nature-based approach in Gardens by the Bay (Grant Associates, 2026)

3.4.2. Cultural and Thematic Concepts

Cultural and thematic concepts derive their primary references from history, local identity, collective memory, narratives, and symbolic meanings (Mumcu & Düzenli, 2018). Within this approach, landscape is considered not merely as a physical arrangement of spaces but also as a medium through which cultural meanings and narratives can be represented and experienced.

Superkilen brings together objects and urban elements from different cultural backgrounds in a public space, making cultural diversity a visible component of the design. Sissinghurst Castle Garden, in contrast, organizes the garden into distinct spatial rooms, each with a different character, using spatial hierarchy, color, and planting composition to establish a thematic

structure (Figure 5, Figure 6). These examples show that cultural and thematic concepts can translate into a variety of design components, including symbolic elements, color, planting, spatial subdivision, and narrative organization (Bjarke Ingels Group, 2012; National Trust, 2026).

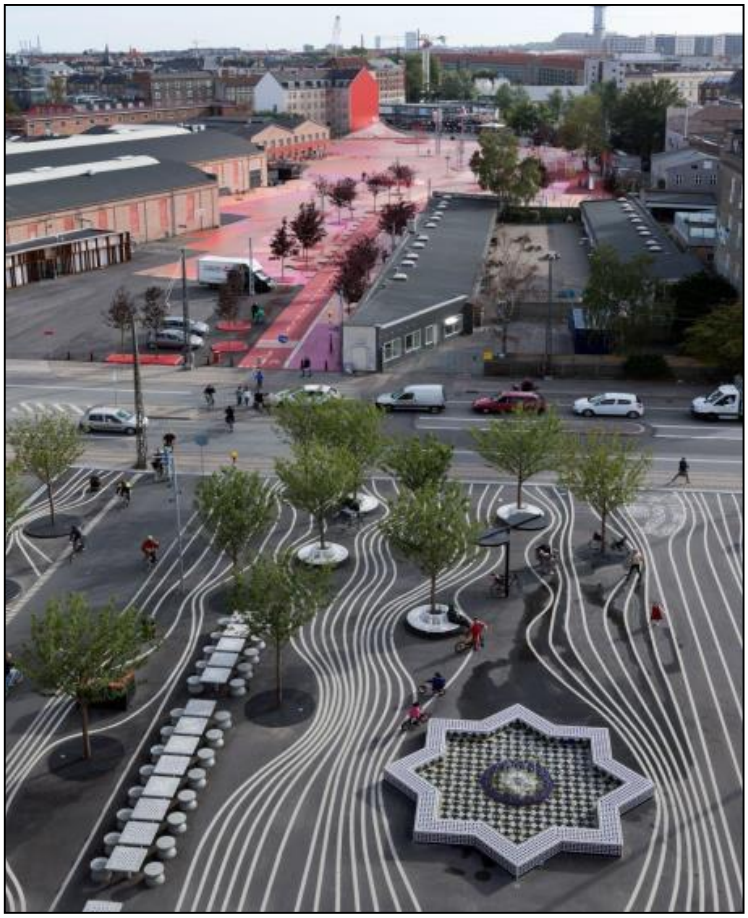


Figure 5. Superkilen as a cultural and thematic landscape concept (Bjarke Ingels Group, 2012).



Figure 6. Spatial and planting expression of the garden-room concept at Sissinghurst Castle Garden (National Trust, 2026)

3.4.3. Function-Oriented and Abstract Conceptual Approaches

Function-oriented concepts consider user requirements, usage patterns, accessibility, safety, and activities as primary determinants of design decisions. In this approach, the concept does not necessarily yield a specific formal language; rather, it provides an organizing framework for structuring different functional requirements and user experiences. Bryant Park, for example, shows how flexible use, visibility, user comfort, seating arrangements, and a range of programmed activities can shape the functional organization of an intensively used urban public space (Bryant Park Corporation, 2020).

Abstract conceptual approaches, by contrast, translate metaphors, emotions, philosophical ideas, or abstract thoughts into spatial languages through design devices such as geometry, rhythm, continuity, layering, and permeability. Parc de la Villette represents an important example in this regard (Bernard Tschumi Architects, 2026). The relationships among points, lines, and surfaces are reiterated at different scales, showing how an abstract conceptual framework can translate into spatial organization and movement systems.

These two approaches should not, however, be regarded as completely independent categories. A project may simultaneously have a strong functional organization and use an abstract conceptual framework to structure it. Accordingly, this distinction is not meant to establish rigid boundaries between projects, but to identify the dominant conceptual priorities underlying design decisions.

3.4.4. Sustainability- and Ecology-Based Concepts

Sustainability- and ecology-based concepts incorporate water management, biodiversity conservation, resource efficiency, energy use, local plant materials, and climate adaptation as fundamental components of the design process. In this approach, aesthetic and functional considerations are addressed alongside environmental performance, making ecological objectives integral to the landscape's spatial and functional organization (Yoffe et al., 2024).

The Supertrees at Gardens by the Bay combine vegetation, technological infrastructure, and environmental performance within a coherent design system, while Qunli Stormwater Park integrates wetland restoration and stormwater retention into the park's spatial structure (Figure 7, Figure 8) (Turenscape, 2011; Grant Associates, 2026). These examples demonstrate how ecological processes can simultaneously contribute to environmental performance and spatial identity. In Turkey, sustainable landscape design has similarly been associated with resource conservation and the integrated consideration of analysis, design, implementation, and maintenance processes (Seçkin et al., 2011; Yaşar & Düzgüneş, 2013).



Figure 7. Supertrees and the sustainable landscape system at Gardens by the Bay (Grant Associates, 2026)

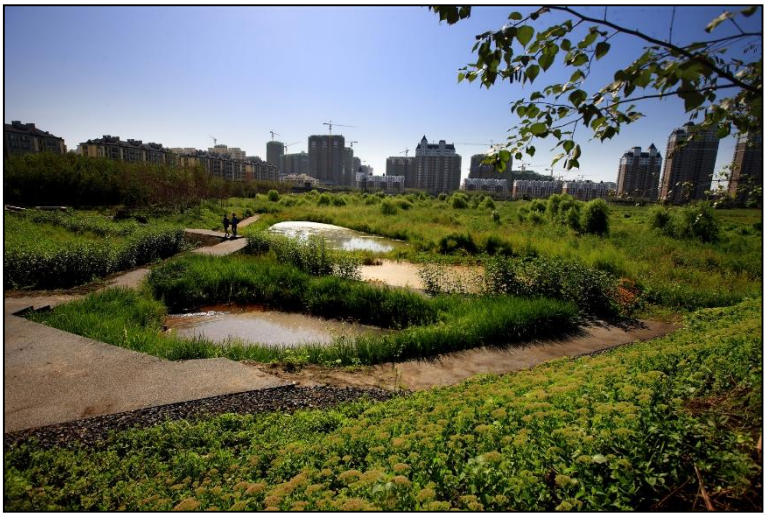


Figure 8. Ecological landscape integrating stormwater management and wetland restoration at Qunli Stormwater Park (Turenscape, 2011)

3.4.5. Integrated Use of Concepts Across Different Scales

The selected examples demonstrate that conceptual approaches can be applied across different spatial scales and design contexts. Private garden projects, for example, illustrate how a concept can establish a strong spatial identity even within relatively small-scale landscapes. At Sissinghurst, garden rooms and color themes differentiate spatial experiences and create a coherent garden identity (National Trust, 2026). At Jardin Majorelle, the intensive use of blue, combined with botanical collections, establishes a distinctive visual and spatial character (Fondation Jardin Majorelle, 2026). These examples demonstrate that conceptual thinking is

not limited to large-scale urban landscapes but can also play a decisive role in the organization and identity of small-scale garden environments (Figure 9, Figure 10).



Figure 9. The themed garden-room approach illustrated by the White Garden at Sissinghurst (National Trust, 2026)



Figure 10. Jardin Majorelle as a cultural and thematic landscape concept (Fondation Jardin Majorelle, 2026)

Nature- and water-oriented projects offer another context in which conceptual approaches translate into spatial interventions. In Cheonggyecheon, restoring a previously covered stream corridor made the water system a visible part of urban life (Figure 11) (Seoul Metropolitan Government, 2026). In Madrid Río, transforming the area around the Manzanares River

combined infrastructure upgrades with the creation of a continuous public open-space system (Figure 12) (Minner, 2011). At a smaller scale, Bostanlı Sunset Lounge organizes the coastal experience through the platform's geometry, user orientation, and visual relationships with the water (Figure 13) (Studio Evren Başbuğ Architects, 2020).



Figure 11. Reopening of the urban stream corridor and integration of water with public space at Cheonggyecheon (Seoul Metropolitan Government, 2026)



Figure 12. Linear green corridor along the Manzanares River in the Madrid Río project (Minner, 2011)

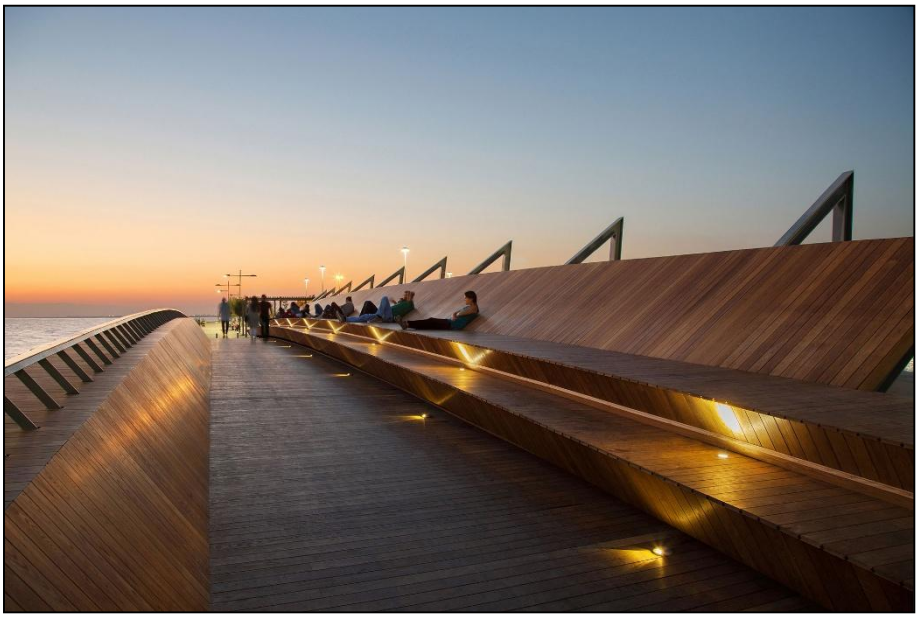


Figure 13. Platform and sunset-oriented public space reinforcing coastal use at Bostanlı Sunset Lounge (Studio Evren Başbuğ Architects, 2020).

The comparative analysis shows that concept types should not be treated as rigid or mutually exclusive categories, but as analytical frameworks for interpreting design decisions. For example, the High Line combines the adaptive reuse of industrial infrastructure with a planting strategy inspired by spontaneous vegetation processes, whereas Gardens by the Bay integrates ecological performance with a biomimetic design language (Field Operations, 2026; Grant Associates, 2026). Similarly, projects such as Sissinghurst and Jardin Majorelle demonstrate that conceptual approaches can establish a strong spatial identity even at the scale of private gardens. Therefore, rather than assigning each project to a single conceptual category, greater emphasis should be placed on identifying the conceptual components and examining how they translate into spatial decisions.

A common characteristic of the examined projects is that the concept does not remain at the level of an initial idea but is reiterated through different scales and design components. The relationship between points, lines, and surfaces in Parc de la Villette; the representation of cultural diversity through objects and colors in Superkilen; the spatial and color organization of garden rooms in Sissinghurst; the transformation of ecological functions into spatial form in Qunli Stormwater Park; and the reinforcement of the coastal experience through platform geometry in Bostanlı demonstrate how a concept can be translated into multiple design tools. This indicates that a concept's effectiveness depends not merely on the strength of the initial idea, but on its capacity to establish consistent relationships among spatial organization, circulation, form, planting, materials, and user experience.

Table 3. Comparative analysis of selected landscape projects illustrating the concept–design relationship

Project / Location	Application type	Dominant concept / conceptual orientation	Spatial manifestation
Parc de la Villette, Paris (Bernard Tschumi Architects, 2026)	Urban Park	Abstract conceptual	Points, lines, surfaces, red follies, grid, and intersecting movement systems
High Line, New York (Field Operations, 2026; Cilento, 2009)	Urban Park	Nature-based / adaptive reuse	Naturalistic planting, preserved railway traces, and reinterpretation of industrial infrastructure
Superkilen, Copenhagen (Bjarke Ingels Group, 2012)	Public space	Cultural/thematic	Color-coded zones and urban objects representing different cultural backgrounds
Bryant Park, New York (Bryant Park Corporation, 2020)	Public space	Function-oriented	Flexible seating, visual openness, event spaces, and adaptable use patterns
Sissinghurst, England (National Trust, 2026)	Private garden	Cultural/thematic	Garden rooms, spatial enclosure, color themes, and differentiated planting compositions
Jardin Majorelle, Marrakech (Fondation Jardin Majorelle, 2026)	Private garden	Cultural/thematic	Distinctive blue structures, botanical collections, and a strong color identity
Gardens by the Bay, Singapore (Grant Associates, 2026)	Ecological/sustainable landscape	Nature-based / sustainability-based	Supertrees, biomimetic forms, planting systems, and environmental technologies
Qunli Stormwater Park, Harbin (Turenscape, 2011)	Ecological/sustainable landscape	Sustainability / ecology-based	Wetland system, stormwater retention, ponds, and mound–depression configuration
Cheonggyecheon, Seoul (Seoul Metropolitan Government, 2026)	Urban water landscape	Nature / water-based	Restored stream corridor, continuous water system, and riverside pedestrian spaces
Madrid Río, Madrid (Minner, 2011)	Linear urban park	Nature / water-based	Continuous green corridor along the Manzanares River and integration of public open space with infrastructure
Bostanlı Sunset Lounge, İzmir (Studio Evren Başbuğ Architects, 2020)	Coastal public space	Nature / water-based	Sloped wooden platform, orientation toward the bay, and sunset-focused spatial experience

3.5. Bostanlı Footbridge and Sunset Lounge: A Local-Scale Example

The Bostanlı Footbridge and Sunset Lounge in İzmir provides a local-scale example of how a landscape concept can translate into spatial experience through the relationship between waterfront continuity, movement, and public use. The project connects both sides of Bostanlı Creek while strengthening the coastal promenade's continuity. The Sunset Lounge extends this

relationship by creating a sloped wooden platform oriented toward the bay, allowing sitting, viewing, resting, and social interaction within a shared space (Figure 14) (Studio Evren Başbuğ Architects, 2020).

The project's spatial configuration shows that the concept is not limited to a formal or visual theme. The platform's orientation toward the water, the continuity of movement, and the provision of spaces for stopping and observing establish a sequence of user experiences tied to the coastal setting. In this sense, the conceptual approach is translated into spatial organization, circulation, orientation, geometry, and user experience. The project therefore provides a relevant local example of how a relatively simple conceptual idea—strengthening the relationship between people, movement, and the waterfront—can be expressed through a coherent set of spatial decisions.



Figure 14. Spatial relationship of the Bostanlı Footbridge and Sunset Lounge with the waterfront, illustrated through plan, section, and overall views (Studio Evren Başbuğ Architects, 2020)

3.6. The High Line: Adaptive Reuse of Industrial Heritage

The High Line in New York represents an approach in which obsolete infrastructure is transformed into a public linear landscape while retaining and reinterpreting elements of its industrial heritage. Led by Field Operations (2026) in collaboration with Diller Scofidio + Renfro and Piet Oudolf, the project transformed a 1.45-mile elevated railway structure on Manhattan's West Side into a public park (Cilento, 2009; Field Operations, 2026). The High Line opened in phases beginning in 2009, with additional sections opening in 2011 and 2014.

The design establishes a relationship between the existing railway structure, movement, planting, and the surrounding urban landscape. The design incorporates existing railway traces into the spatial experience, while planting, paving, furnishings, lighting, and social spaces create a sequence of distinct experiences along the elevated route. Field Operations describes

the project as an adaptive transformation of existing infrastructure into a new urban experience characterized by a choreographed sequence of movement, changing views, planting, and social spaces (Field Operations, 2026).

Conceptually, the High Line shows how adaptive reuse, industrial memory, ecological planting, and movement can be integrated within a single spatial framework (Figure 15). Rather than erasing the site's previous function, the design retains traces of the railway infrastructure and incorporates them into a new public landscape. The conceptual approach is therefore expressed through the preservation and reinterpretation of existing structural elements, the planting strategy, the continuity of pedestrian movement, and the sequential organization of spaces.

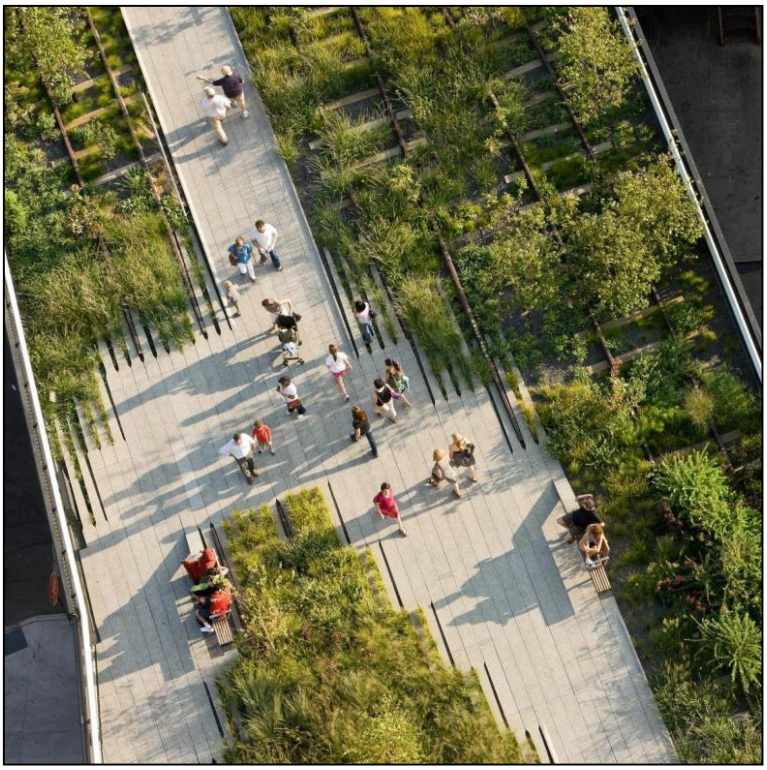


Figure 15. Transformation of the High Line from elevated railway infrastructure into a linear urban park (Cilento, 2009).

3.7. Importance of the Concept in Design and Education

One of the primary contributions of a design concept is its capacity to establish coherence among different design decisions. Organizing decisions related to form, circulation, planting, materials, and site furniture around a common conceptual framework helps prevent the design from becoming a fragmented collection of individual solutions. In the decision-making process, the concept can also function as a practical criterion for testing and comparing alternatives. This contributes to the justification and consistency of design decisions while making the relationships among students' design decisions more comprehensible within the design studio environment (Oh et al., 2013; Düzenli et al., 2017).

The concept is also significant in establishing spatial identity and shaping user experience. Its effectiveness in the design process depends on its ability to establish meaningful relationships with the site's ecological, social, cultural, and physical characteristics and translate these relationships into spatial decisions (Mumcu & Düzenli, 2018). Accordingly, a concept should not be evaluated solely on its visual or formal expression. Instead, examine its relationship with

the site, users, functions, and aesthetic considerations through the concrete design decisions it generates.

Recent studies emphasize the importance of exploring design alternatives and supporting creative thinking within conceptual design processes (Chulvi et al., 2022; Chen & Stouffs, 2023). At the same time, integrating sustainability criteria early in the design process has become increasingly important, particularly in response to environmental pressures and resource constraints (Yoffe et al., 2024). This suggests that conceptual development can provide a framework for integrating environmental objectives with functional and spatial design considerations early in the design process.

From an educational perspective, establishing a clear relationship between the source of inspiration, the design problem, the concept, and the resulting spatial decisions is particularly important. Studies by Mumcu and Düzenli (2018) and Mumcu et al. (2021) highlight the relevance of the design studio experience in developing conceptual approaches. In this context, the concept can be considered not merely a creative idea but also a learning tool that enables students to formulate, justify, test, and translate an idea into design decisions across different spatial scales (Yıldırım et al., 2024; Meral et al., 2022).

3.8. Major Challenges and Limitations in Concept Development

The theoretical review and case-based analysis conducted in this study point to four major challenges in concept development (Mumcu & Düzenli, 2018; Önal, 2011). First, when a concept remains at the level of a title, slogan, or visual theme, it may fail to meaningfully guide spatial decisions. Second, an idea introduced independently of site characteristics and user requirements may result in an artificial or contextually disconnected design language. Third, a weak relationship between analysis and concept may fragment the design process, with analysis and conceptual development operating as separate stages. Fourth, prioritizing conceptual expression over functional requirements may negatively affect usability and the user experience (Düzenli et al., 2018). These challenges indicate that a concept should be continuously tested against site conditions, functional requirements, and emerging design decisions and, where necessary, revised throughout the design process.

The primary limitation of this study is that the selected projects were evaluated based on published documents, project descriptions, drawings, and visual materials rather than direct field observations or user interviews. Consequently, the analysis primarily addresses the relationship between documented conceptual approaches and their spatial manifestations, rather than users' actual perceptions or experiences of the completed spaces. In addition, the sample included projects for which the conceptual approach could be identified and interpreted through available documentation. Therefore, the findings should not be interpreted as an assessment of the overall quality or success of the selected projects, nor do they explain how weak or unsuccessful concepts develop. Instead, they identify recurring relationships between conceptual thinking and spatial design decisions within the selected cases.

Future studies could strengthen this framework by incorporating empirical investigations of user experience through behavioral observation, interviews, surveys, or post-occupancy evaluation (Cinoğlu & Polat, 2019). Such approaches would allow examination not only of how concepts translate into spatial decisions but also of how users perceive, experience, and interpret those decisions.

4. CONCLUSION AND EVALUATION

This study demonstrates that a concept in landscape design should not be regarded merely as an abstract idea generated at the beginning of the design process. Rather, it functions as an organizing framework that establishes continuity among site analysis, problem definition,

sources of inspiration, spatial organization, and design decisions. The comparison of the reviewed literature and selected projects indicates that the conceptual strength of a design is closely tied to its ability to maintain a coherent relationship between an underlying idea and its spatial manifestations across scales.

A concept's contribution is therefore not determined simply by repeating an abstract idea in formal expressions. More importantly, it lies in its capacity to define and structure the design problem and to guide the development of alternative solutions. A concept should be informed by natural and socio-cultural site characteristics, respond to user experience, and find concrete expression in different design components, including spatial organization, circulation, planting, materials, and site furniture, while remaining compatible with functional requirements (Altunkasa & Uslu, 2016; Mumcu & Düzenli, 2018; Moraitis, 2024). The international and local examples examined show how conceptual frameworks can contribute to spatial identity and coherence across different scales and landscape contexts.

From this perspective, concept development in landscape design education should be addressed as a systematic process involving site analysis, problem definition, identification of sources of inspiration, refinement of keywords, development of a conceptual framework, diagrammatic representation, and translation into spatial decisions (Steinitz, 1990; Düzenli & Alpak, 2016; Düzenli et al., 2017; Mumcu & Düzenli, 2018; Mumcu et al., 2021). Such an approach can help students move beyond generating visually attractive ideas and encourage them to establish explicit relationships between design problems, conceptual propositions, and spatial outcomes (Önal, 2011; Düzenli & Alpak, 2016; Meral et al., 2022).

In applied research, future studies should further investigate how users perceive conceptual approaches and how they influence patterns of spatial use and experience. This is particularly relevant in the context of climate change, resource constraints, biodiversity loss, and rapid urbanization, where ecological and sustainability-oriented considerations increasingly need to be integrated into the conceptual foundations of landscape design rather than treated as additional design criteria (Okumuş & İmal, 2022; Yoffe et al., 2024).

Future studies should therefore move beyond evaluating concepts primarily through their visual or formal expressions and focus on how conceptual frameworks can be systematically tested through user experience, spatial performance, and long-term environmental and social outcomes.

Author's Note

This study was prepared as part of a seminar course in the Department of Landscape Architecture at the Institute of Natural Sciences, Niğde Ömer Halisdemir University; it was presented and evaluated as a seminar paper within the department. The scope, content, and academic framework of the study were subsequently revisited, expanded, and revised while preparing a conference paper.

REFERENCES

Altunkasa, M. F., & Uslu, C. (2016). *Peyzaj tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi. ISBN 978-975-511-645-7.

Bernard Tschumi Architects. (2026). *Parc de la Villette* [Project webpage]. Accessed September 10, 2026, from https://www.tschumi.com/projects/3

Bjarke Ingels Group. (2012). *Superkilen*. Accessed September 10, 2026. https://big.dk/projects/superkilen-1621

Bryant Park Corporation. (2020). *History of Bryant Park: Modern Times*. Bryant Park. Accessed September 21, 2026. https://bryantpark.org/blog/history-of-bryant-park-modern-times

Chen, J., & Stouffs, R. (2023). Deciphering the noisy landscape: Architectural conceptual design space interpretation using disentangled representation learning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 38*(5), 601–620. https://doi.org/10.1111/mice.12908

Chulvi, V., Royo, M., Agost, M.-J., Felip, F., & García-García, C. (2022). How the type of methodology used, when working in a natural environment, affects the designer's creativity. *Research in Engineering Design, 33*(3), 231–248. https://doi.org/10.1007/s00163-022-00387-y

Cilento, K. (2009). *The New York High Line officially open*. ArchDaily. Accessed September 03, 2026. https://www.archdaily.com/24362/the-newyork-high-line-officially-open

Cinoğlu, Ş. C., & Polat, Z. (2019). Peyzaj mimarlığında araştırma yöntemleri: Park alanlarında kantitatif analizler. *Türk Tarım - Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7*(12), 2062–2068. https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i12.2062-2068.2964

Düzenli, T., & Alpak, E. M. (2016). Peyzaj mimarlığı eğitiminde doğaya öykünme yaklaşımının yaratıcılık üzerindeki etkisi. *Mimarlık ve Yaşam, 1*(1), 13–21. https://doi.org/10.26835/my.266428

Düzenli, T., Alpak, E. M., & Özkan, D. G. (2017). Peyzaj mimarlığında temel tasarım dersinin öğrenme ve yaratıcılık sürecine etkileri. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 16*(64-Ek Sayı), 1450–1460. https://doi.org/10.17755/esosder.298092

Düzenli, T., Mumcu, S., & Çiğdem, A. (2018). Peyzaj mimarlığı eğitiminde oturma donatısı tasarımı: KTU Peyzaj Mimarlığı Bölümü örneğinde incelenmesi. *Social Sciences, 13*(4), 126–134. https://doi.org/10.12739/NWSA.2018.13.4.3C0176

Eckert, C., & Stacey, M. (2000). Sources of inspiration: A language of design. *Design Studies, 21*(5), 523–538. https://doi.org/10.1016/S0142-694X(00)00022-3

Field Operations. (2026). *High Line*. Accessed September 11, 2026. https://www.fieldoperations.net/project/high-line

Francis, M. (2001). A case study method for landscape architecture. *Landscape Journal, 20*(1), 15–29. https://doi.org/10.3368/lj.20.1.15

Goldschmidt, G. (1997). Capturing indeterminism: Representation in the design problem space. *Design Studies, 18*(4), 441–455. https://doi.org/10.1016/S0142-694X(97)00011-2

Goldschmidt, G., & Litan Sever, A. (2009). From text to design solution: Inspiring design ideas with texts. In M. Norell Bergendahl, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad, & U. Lindemann (Eds.), *DS 58-9: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED 09): Vol. 9. Human behavior in design* (pp. 15–26). The Design Society. ISBN 978-1-904670-13-1. Accessed September 21, 2026. https://www.designsociety.org/publication/28833/from_text_to_design_solution_inspiring_design_ideas_with_texts

Grant Associates. (2026). *Gardens by the Bay*. Accessed September 21, 2026. https://grant-associates.uk.com/projects/gardens-by-the-bay

Holyoak, K. J. (1990). Problem solving. In D. N. Osherson & E. E. Smith (Eds.), *Thinking: An invitation to cognitive science* (Vol. 3, pp. 117–146). MIT Press.

Fondation Jardin Majorelle. (2026). *Jardin Majorelle*. Accessed September 11, 2026. https://www.jardinmajorelle.com/lejardin/

LaGro, J. A. (2001). *Site analysis: Linking program and concept in land planning and design*. New York, NY: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-34412-4.

Lynch, K. (1960). *The image of the city*. Cambridge, MA: The MIT Press. ISBN 978-0-262-12004-3.

McHarg, I. L. (1969). *Design with nature*. Garden City, NY: Natural History Press for the American Museum of Natural History. https://archive.org/details/designwithnature00mcha

Meral, A., Yalçınalp, E., & Demirci, Ö. (2022). Who is designing for whom? A critical design studio approach. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning, 3*(3), 418–424. https://doi.org/10.47818/DRArch.2022.v3i3066

Milburn, L.-A. S., & Brown, R. D. (2003). The relationship between research and design in landscape architecture. *Landscape and Urban Planning, 64*(1–2), 47–66. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00200-1

Minner, K. (2011). *Madrid RIO / Burgos & Garrido + Porras La Casta + Rubio & Álvarez-Sala + West 8*. ArchDaily. Accessed September 21, 2026. https://www.archdaily.com/111287/madrid-rio-west-8-and-mrio-arquitectos

Mohammad, O. H. A., & Alabdullah, M. M. (2022). Landscape architecture design as an art creative practice: A studio teaching model. *Landscape Architecture and Art, 20*(20), 92–101. https://doi.org/10.22616/j.landarchart.2022.20.10

Moraitis, K. (2024). Composing the landscape: Analyzing landscape architecture as design formation. *Land, 13*(6), 827. https://doi.org/10.3390/land13060827

Mumcu, S., & Düzenli, T. (2018). Peyzaj mimarlığı tasarım stüdyosunda kavramsal yaklaşımlar ve esin kaynakları. *Megaron, 13*(4), 665–678. https://doi.org/10.5505/MEGARON.2018.16768

Mumcu, S., Düzenli, T., & Alpak, E. M. (2021). Peyzaj mimarlığı tasarım stüdyosu deneyimlerinin yeni tasarım problemlerinde kullanılması: Karadeniz Teknik Üniversitesi örneği. *Sanat ve Tasarım Dergisi, 11*(2), 260–279. https://doi.org/10.20488/sanattasarim.1048385

National Trust. (2026). *Sissinghurst Castle Garden*. Accessed September 21, 2026. https://www.nationaltrust.org.uk/visit/kent/sissinghurst-castle-garden

Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. ISBN 0-13-445403-0.

Oh, Y., Ishizaki, S., Gross, M. D., & Do, E. Y.-L. (2013). A theoretical framework of design critiquing in architecture studios. *Design Studies, 34*(3), 302–325. https://doi.org/10.1016/j.destud.2012.08.004

Okumuş, S., & İmal, R. (2022). Kentsel dayanıklılık: Planlama ve tasarım boyutunda stratejiler. *Journal of Landscape Research and Practices (JOLARP), 4*(1), 12–19. https://doi.org/10.56629/paud.1136550

Ortaçeşme, V. (2020). ECLAS - LE:NOTRE Tuning Projesi Bağlamında Peyzaj Mimarlığı Yeterlilikleri ve Akreditasyon. *PEYZAJ - Eğitim, Bilim, Kültür Ve Sanat Dergisi, 2020*(Özel Sayı), 19–32. https://izlik.org/JA79BE86DE

Önal, G. K. (2011). Yaratıcılık ve kültürel bağlamda mimari tasarım süreci. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 16*(1), 155–162. https://doi.org/10.17482/uujfe.87376

Reid, G. W. (2007). *From concept to form in landscape design* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-11231-1.

Seçkin, N. P., Seçkin, Ö. B., & Seçkin, Y. Ç. (2011). *Sürdürülebilir peyzaj tasarımı ve uygulama ilkeleri*. İstanbul: Literatür Yayıncılık. ISBN 978-975-04-0582-2.

Seoul Metropolitan Government. (2026). *Cheonggyecheon (Stream).* Accessed September 12, 2026. https://english.seoul.go.kr/service/amusement/stream/

Steinitz, C. (1990). A framework for theory applicable to the education of landscape architects (and other environmental design professionals). *Landscape Journal*, *9*(2), 136–143. https://doi.org/10.3368/lj.9.2.136

Studio Evren Başbuğ Architects. (2020). *Bostanlı Footbridge & Sunset Lounge*. Accessed September 08, 2026. https://www.studioevrenbasbug.com/post/bostanl%C4%B1-footbridge-sunset-lounge

Turenscape. (2011). *Harbin Qunli Stormwater Park*. Accessed September 13, 2026. https://www.turenscape.com/en/project/detail/435.html

Yaşar, Y., & Düzgüneş, E. (2013). Peyzaj tasarımına sürdürülebilirlik kavramının entegrasyonu: Bir stüdyo çalışması. *İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi, 3*(7), 31–43. https://izlik.org/JA99DX42YW

Yıldırım, Y., Müftüoğlu, V., Ersöz, N. D., & Arefi, M. (2024). What can first-year undergraduate students "envision" from a pandemic? *International Journal of Technology and Design Education, 34*(1), 363–376. https://doi.org/10.1007/s10798-023-09816-y

Yoffe, H., Raanan, N., Fried, S., Plaut, P., & Grobman, Y. J. (2024). Sustainable urban landscapes: A computation framework for enhancing sustainability in early-stage design. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research, 18*(4), 870–894. *https://doi.org/10.1108/ARCH-06-2023-0152*

Yuhaniz, M., Abdul Aziz, A., Abdul Ghani, I., & Nasir, D. S. N. (2024). Trends of architectural design discussion: Design process, cognitive and concept. *Journal of Contemporary Issues and Thought, 14*(2), 50–60. https://doi.org/10.37134/jcit.vol14.2.6.2024

TEMEL ORİGAMİ KATLAMALARININ GRAF TEORİ İLE MODELLENMESİ VE MATEMATİK EĞİTİMİNDEKİ YANSIMALARI

Doç. Dr. Mevhibe KOBAK DEMİR
Balıkesir University, Necatibey Education Faculty, Department of Mathematics Education, 10100, Altıeylül, Balıkesir
ORCID ID: 0000-0001-6614-4101

ÖZET
Matematik eğitiminde etkili bir öğretim aracı olarak öne çıkan origami, öğrencilerin geometrik ve uzamsal düşünme becerilerini doğrudan desteklemektedir. Kâğıt üzerinde gerçekleştirilen katlama işlemleri aracılığıyla soyut geometrik ilişkilerin somut olarak gözlemlenmesine ve deneyimlenmesine olanak tanır. Katlama işlemleri sırasında oluşan çizgiler ve bu çizgilerin kesişimleri, yalnızca geometrik bir örüntü olarak değil, graf teori kullanılarak yapısal bir ağ olarak da temsil edilebilir. Bu çalışmada, temel origami katlamalarının graf teori perspektifinden modellenmesi ve matematik eğitimindeki pedagojik potansiyelinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada öncelikle kare kâğıt üzerinde gerçekleştirilebilen temel katlama adımları belirlenmiş ve her katlama sonucunda oluşan katlama çizgileri görselleştirilmiştir. Ardından, katlama çizgilerinin kesişim noktaları grafın düğümleri, bu noktaları birbirine bağlayan katlama çizgileri ise grafın kenarları olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan grafiksel yapılar Python programlama dili ve NetworkX kütüphanesi kullanılarak modellenmiş ve görselleştirilmiştir. Her bir katlama aşaması için fiziksel geometrik yapı ile buna karşılık gelen algoritmik graf gösterimi eşleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, temel origami katlamalarının düğüm ve kenarlardan oluşan graf yapılarıyla sistematik bir şekilde temsil edilebildiğini göstermektedir. Matematiksel modellemenin fiziksel bir eylemle bütünleştiği bu sürecin; öğrencilerin geometrik, uzamsal ve algoritmik düşünmelerini destekleyebilecek öğretim materyallerinin geliştirilmesi açısından potansiyel taşıdığı düşünülmektedir. Ayrıca, katlama çizgilerinin algoritmik bir sırayla inşa edilmesi, matematik eğitiminde bilgisayarsız kodlama etkinliklerine uygun bir ortam sunabilir. Bu yönüyle çalışma, origami ile geometri ve graf teorisi arasında somut bir matematiksel bağlantı kurmakla kalmayıp; elde edilen modelin ilerleyen süreçlerde etkileşimli öğretim materyallerinin tasarımına ve disiplinlerarası STEM uygulamalarının geliştirilmesine temel oluşturacağını ortaya koymaktadır.
Anahtar kelimeler: Origami, graf teori, matematiksel modelleme

MODELING BASIC ORIGAMI FOLDS USING GRAPH THEORY AND ITS REFLECTIONS IN MATHEMATICS EDUCATION

ABSTRACT
Origami, which stands out as an effective teaching tool in mathematics education, directly supports students' geometric and spatial thinking skills. Through folding operations performed on paper, it enables the concrete observation and experience of abstract geometric relationships. The lines formed during folding processes and the intersections of these lines can be represented not only as a geometric pattern but also as a structural network using graph theory. This study aims to model basic origami folds from the perspective of graph theory and to examine their pedagogical potential in mathematics education. Initially, the basic folding steps that can be performed on a square paper were determined, and the crease patterns formed as a result of each fold were visualized. Subsequently, the intersection points of the crease lines were defined as the nodes (vertices) of the graph, and the crease lines connecting these points were defined as

the edges of the graph. The resulting graphical structures were modeled and visualized using the Python programming language and the NetworkX library. For each folding stage, the physical geometric structure was matched with its corresponding algorithmic graph representation. The findings demonstrate that basic origami folds can be systematically represented by graph structures consisting of nodes and edges. It is believed that this process, where mathematical modeling integrates with a physical action, holds potential for developing instructional materials that can support students' geometric, spatial, and algorithmic thinking. Furthermore, the construction of crease lines in an algorithmic sequence can provide a suitable environment for unplugged coding activities in mathematics education. In this respect, the study not only establishes a concrete mathematical connection between origami, geometry, and graph theory, but also reveals that the obtained model will serve as a foundation for the design of interactive teaching materials and the development of interdisciplinary STEM applications in the future.

Keywords: Origami, graph theory, mathematical modeling.

1. Giriş

Matematiksel öğrenme, sembolik temsillerin ötesinde bireyin nesneler, uzam ve bedensel eylemlerle kurduğu etkileşimleri içeren çok boyutlu bir süreçtir. Bu bağlamda uzamsal düşünme; geometrik ilişkilerin fark edilmesi, zihinsel dönüşümlerin gerçekleştirilmesi ve görsel temsillerin matematiksel olarak anlamlandırılması açısından matematik ve STEM öğrenmesinin önemli bileşenlerinden biri olarak görülmektedir (Taylor vd., 2023). Somutlaştırılmış biliş yaklaşımı doğrultusunda fiziksel nesnelerle etkileşim ve bedensel eylemler, soyut matematiksel yapıların anlamlandırılmasını destekleyebilmektedir. Origami bu açıdan, katlama ve açma eylemleri aracılığıyla iki ve üç boyutlu uzamsal ilişkilerin deneyimlenmesine olanak sağlayan özgün bir öğrenme ortamı sunmaktadır. Nitekim origami ve kâğıt mühendisliğine dayalı Think3d! uygulamasının öğrencilerin uzamsal düşünme becerileri ile belirli matematiksel performans göstergelerini desteklediği belirlenmiştir (Burte vd., 2017). Origaminin katlama desenleri eğitimsel potansiyelinin ötesinde, matematiksel olarak modellenebilir yapılar da sunmaktadır. Özellikle kırışıklık desenleri, katlama çizgileri arasındaki ilişkilerin düğüm ve kenarlar aracılığıyla temsil edilebildiği düzlemsel grafiklerle ilişkilendirilmektedir. Chen ve diğerleri (2019), origami kırışıklık desenlerinin graflar aracılığıyla sistematik biçimde temsil edilebildiğini ortaya koyarken, Chen ve diğerleri (2020) graf teorisini katlanabilir origami desenlerinde dağ–vadi katlama çizgilerinin belirlenmesiyle ilişkilendirmiştir. Hull ve diğerleri (2022) ise farklı katlama durumları arasındaki ilişkileri origami flip graph üzerinden incelemiştir. Bu çalışmalar, origami katlama çizgilerinin yalnızca görsel bir desen değil, ayrık matematiksel yapılar üzerinden temsil edilebilecek ilişkisel bir sistem olduğunu göstermektedir. Katlama işlemlerinin ardışık, kurallı ve algoritmik yapısı, origamiyi hesaplamalı düşünme açısından da anlamlı kılmaktadır. Somutlaştırılmış öğrenme etkinliklerinin uzamsal akıl yürütme ve hesaplamalı düşünmeyi destekleyebildiği (Kwon vd., 2024), bilgisayarsız kodlama etkinliklerinin ise algoritmik tasarım, ayrıştırma ve soyutlama becerilerinde gelişim sağlayabildiği görülmektedir (Dağ vd., 2023). Bu doğrultuda origaminin katlama adımlarının graf temsilleriyle ilişkilendirilmesi, geometrik yapı ile algoritmik süreç arasında bir köprü oluşturabilir. Bu bağlamda, çalışmada temel origami katlamalarının graf teorisi perspektifinden modellenmesi amaçlanmıştır.

2. Yöntem

2.1. Araştırma Deseni

Bu çalışmada, temel origami katlamalarının graf teorisi perspektifinden modellenmesine yönelik betimsel ve hesaplamalı matematiksel modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışma, herhangi bir öğrenci veya öğretmen grubuyla yürütülen deneysel bir uygulamaya dayanmamaktadır. Bunun yerine, temel origami katlama örüntülerinin geometrik özellikleri belirlenmiş, bu örüntüler graf teorisinin temel kavramları kullanılarak matematiksel ve algoritmik biçimde temsil edilmiştir.

2.2. İncelenen Origami Katlamaları

Çalışmada, kare kâğıt üzerinde gerçekleştirilebilen temel katlama örüntüleri incelenmiştir. Bu kapsamda dikey katlama, yatay katlama ve köşegen katlama gibi temel katlama çizgileri ele alınmıştır. Katlama örüntüleri, her aşamada oluşan çizgiler ve bu çizgilerin kesişim noktaları dikkate alınarak incelenmiştir. Katlama örüntülerinin belirlenmesinde temel amaç, karmaşık ve çok aşamalı bir origami modelini incelemek yerine, graf teorisinin düğüm ve kenar kavramlarının açık biçimde gözlemlenebileceği sade geometrik yapılar oluşturmaktır.

2.3 Verilerin Oluşturulması ve Görselleştirilmesi

İlk aşamada, kare kâğıt üzerinde temel katlama işlemleri gerçekleştirilmiş ve her katlama sonrasında ortaya çıkan katlama çizgileri görsel olarak kaydedilmiştir.

Her katlama aşamasında;

- katlama çizgileri,
- çizgilerin kesişim noktaları,
- çizgilerin başlangıç ve bitiş noktaları,
- katlama çizgileri arasındaki bağlantılar

belirlenmiştir. Böylece fiziksel katlama örüntüsü ile matematiksel gösterim arasında doğrudan bir eşleştirme kurulmuştur.

2.4 Graf Modelinin Oluşturulması

Origami katlama örüntülerinin graf gösterimine dönüştürülmesinde aşağıdaki eşleştirme ölçütleri kullanılmıştır:

- Katlama çizgilerinin kesişim noktaları düğüm olarak tanımlanmıştır.
- İki düğüm arasında yer alan katlama çizgisi parçaları kenar olarak tanımlanmıştır.
- Katlama çizgilerinin kesişmediği ve yalnızca bir çizgi oluşturduğu durumlarda, çizginin uç noktaları düğüm olarak ele alınmıştır.
- Birden fazla katlama çizgisinin aynı noktada kesiştiği durumlarda, bu ortak nokta tek bir düğüm olarak gösterilmiştir.

Bu doğrultuda her katlama aşaması için ayrı bir graf oluşturulmuştur. Katlama sürecindeki değişimler, grafiksel gösterimde düğüm ve kenar ilişkilerindeki değişimler üzerinden incelenmiştir. Katlama aşamaları sembolik olarak G_1, G_2 ve G_3 biçiminde gösterilmiştir.

2.5 Hesaplamalı Modelleme

Oluşturulan graf yapılarının çizilmesi ve görselleştirilmesi amacıyla Python programlama dili kullanılmıştır. Graf oluşturma ve görselleştirme işlemlerinde NetworkX kütüphanesinden yararlanılmıştır. Her katlama aşaması için öncelikle düğüm ve kenar listesi oluşturulmuş, daha sonra bu bilgiler kullanılarak graf yapısı tanımlanmıştır. Oluşturulan grafikler, düğümlerin ve kenarların görsel olarak incelenebilmesi amacıyla çizdirilmiştir. Böylece fiziksel origami örüntüsü ile bilgisayar ortamında oluşturulan graf gösterimi karşılaştırılmıştır.

Modelleme süreci genel olarak aşağıdaki işlem basamaklarından oluşmaktadır:

1. Temel origami katlama aşamalarının belirlenmesi,
2. Her aşamada oluşan katlama çizgilerinin görselleştirilmesi,
3. Katlama çizgilerinin kesişim ve uç noktalarının belirlenmesi,

4. Noktaların düğüm, çizgi parçalarının kenar olarak tanımlanması,
5. Düğüm ve kenar listelerinin oluşturulması,
6. Python ve NetworkX kullanılarak grafın çizilmesi,
7. Geometrik örüntü ile graf gösteriminin karşılaştırılması.

2.6 Verilerin Analizi

Oluşturulan modeller, temel graf özellikleri bakımından incelenmiştir. Bu kapsamda her katlama aşaması için düğüm sayısı (V), kenar sayısı (E) ve grafın genel bağlantı yapısı belirlenmiştir. Ayrıca katlama aşamaları ilerledikçe graf yapısında meydana gelen değişimler betimsel olarak açıklanmıştır.

Analiz sürecinde aşağıdaki sorulara odaklanılmıştır:

1. Temel origami katlamaları graf teorisi kullanılarak temsil edilebilir mi?
2. Katlama çizgileri ve kesişim noktaları düğüm-kenar ilişkisine nasıl dönüştürülebilir?
3. Katlama aşamalarındaki değişimler graf yapısına nasıl yansımaktadır?
4. Oluşturulan grafiksel gösterimler, origami örüntülerinin geometrik özelliklerini görünür kılmakta mıdır?

Çalışmada elde edilen sonuçlar, oluşturulan geometrik ve grafiksel gösterimlerin karşılaştırılması, düğüm-kenar ilişkilerinin incelenmesi ve modelin görsel tutarlılığının değerlendirilmesi yoluyla yorumlanmıştır.

2.7 Modelin Tutarlılığının Değerlendirilmesi

Modelin tutarlılığını değerlendirmek amacıyla her katlama aşamasının geometrik gösterimi ile bu aşamaya karşılık gelen graf karşılaştırılmıştır. Graf üzerinde yer alan her düğümün ve kenarın, origami örüntüsünde karşılık gelen bir nokta veya katlama çizgisiyle ilişkilendirilebilir olmasına dikkat edilmiştir.

Bu doğrultuda modelin değerlendirilmesinde üç ölçüt kullanılmıştır:

- Geometrik uygunluk: Grafın, origami örüntüsündeki çizgi ve kesişim ilişkilerini yansıtması,
- Grafiksel tutarlılık: Düğüm ve kenarların tanımlanan modelleme kurallarına uygun biçimde oluşturulması,
- Aşamalar arası izlenebilirlik: Katlama sürecindeki değişimlerin graf gösteriminde takip edilebilmesi.

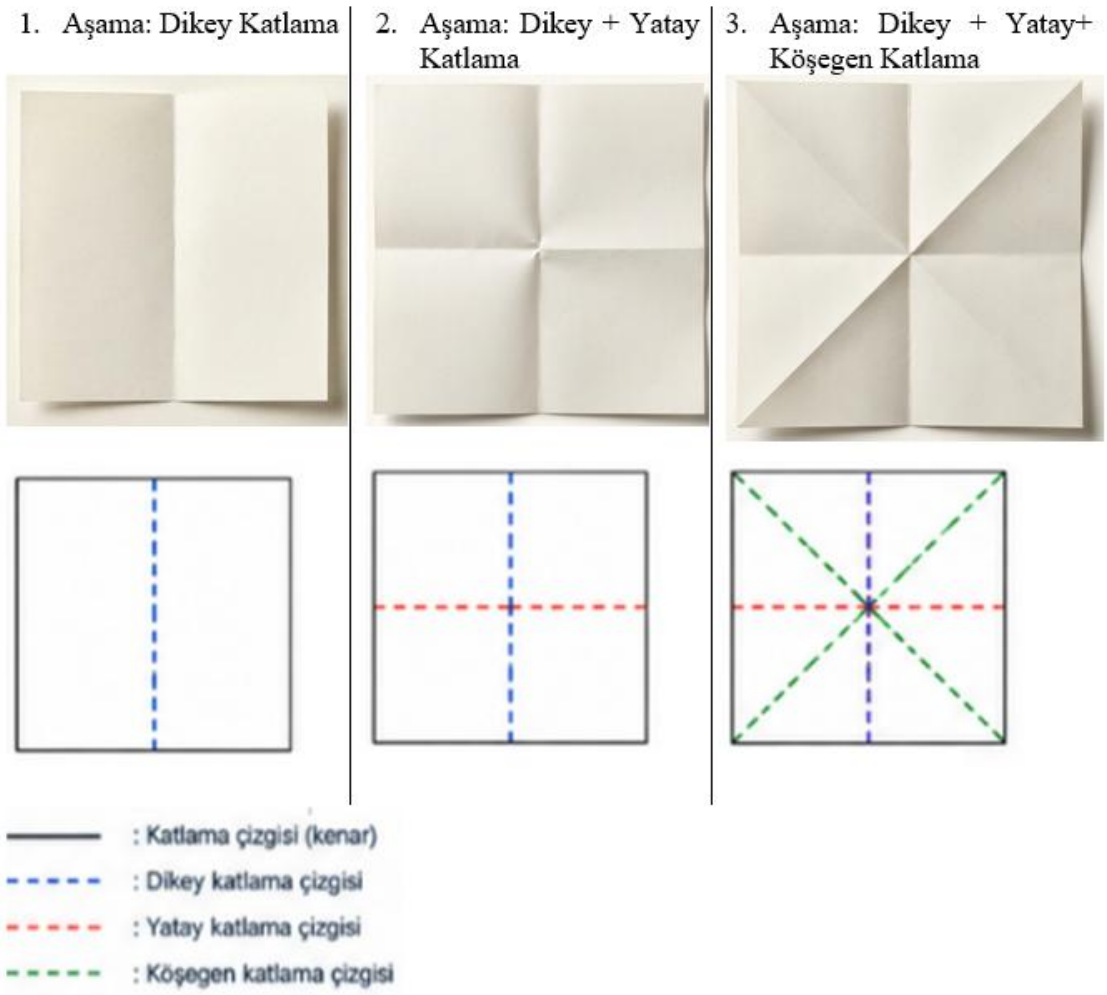
Bu yöntem sonucunda oluşturulan modelin, temel origami katlamaları ile geometri ve graf teorisi arasında görsel ve algoritmik bir bağlantı kurup kuramadığı değerlendirilmiştir.

3. Modelleme Sonuçları ve Görsel Gösterimler

3.1. Temel Origami Katlama Örüntülerinin Görselleştirilmesi

Çalışmanın ilk aşamasında, kare kâğıt üzerinde gerçekleştirilebilen temel origami katlamaları ele alınmıştır. Katlama örüntülerinin seçiminde, geometrik ilişkilerin kolaylıkla gözlemlenebilmesi ve katlama çizgilerinin graf teorisinin temel kavramlarıyla ilişkilendirilebilmesi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda dikey, yatay ve köşegen katlama örüntüleri incelenmiştir. Her bir katlama işleminden sonra kâğıt üzerinde oluşan izler, katlama çizgileri olarak değerlendirilmiştir. Katlama çizgileri, sonraki aşamada oluşturulacak graf modelinin geometrik temelini oluşturmuştur.

İlk aşamada kare kâğıt üzerinde yalnızca dikey bir katlama çizgisi oluşturulmuştur. İkinci aşamada dikey katlama çizgisine yatay katlama çizgisi eklenmiştir. Üçüncü aşamada ise bu çizgilere köşegen katlama çizgileri eklenerek daha yoğun bir katlama örüntüsü elde edilmiştir. Bu aşamalar, katlama örüntülerinin basitten karmaşığa doğru nasıl geliştiğini göstermek amacıyla Şekil 1'de sunulmuştur.



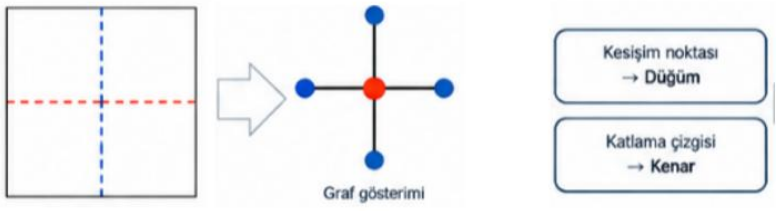
Şekil 1. Temel origami katlama aşamalarının geometrik gösterimi

Şekil 1'de görüldüğü üzere, katlama çizgilerinin sayısı arttıkça kâğıt üzerindeki geometrik ilişkiler de çeşitlenmektedir. Özellikle yatay ve köşegen çizgilerin eklenmesiyle birlikte yeni kesişim noktaları ortaya çıkmakta ve bu durum, katlama örüntüsünün graf olarak temsil edilmesi için daha fazla düğüm ve kenar tanımlanmasına olanak sağlamaktadır.

3.2. Katlama Çizgilerinin Graf Gösterimine Dönüştürülmesi

Modelleme sürecinde, Yöntem bölümünde (Graf Modelinin Oluşturulması başlığı altında) detaylandırılan eşleştirme kuralları esas alınmıştır. Bu kurallar doğrultusunda fiziksel kâğıt üzerindeki geometrik yapı, düğüm ve kenarlardan oluşan matematiksel bir yapıya dönüştürülmüştür. Bu eşleştirme sonucunda fiziksel kâğıt üzerindeki geometrik yapı, düğüm ve kenarlardan oluşan matematiksel bir yapıya dönüştürülmüştür. Böylece origami örüntüsünde bulunan çizgi ve kesişim ilişkileri, graf teorisinin temel gösterim biçimiyle ifade edilmiştir.

Örneğin, yatay ve dikey iki katlama çizgisinin kesiştiği durumda, kesişim noktası merkezî bir düğüm olarak ele alınmıştır. Bu düğümden kâğıdın farklı yönlerine uzanan çizgi parçaları ise grafın kenarlarını oluşturmuştur.



Şekil 2. Origami katlama örüntüsünün graf gösterimine dönüştürülmesi

Şekil 2'de origami örüntüsündeki geometrik unsurlar ile graf gösterimindeki karşılıkları birlikte sunulmuştur. Bu gösterimde kesişim noktası düğümle, katlama çizgisi ise kenarla eşleştirilmiştir. Böylece origami örüntüsünün yapısal özellikleri, graf biçiminde daha açık ve izlenebilir hâle getirilmiştir.

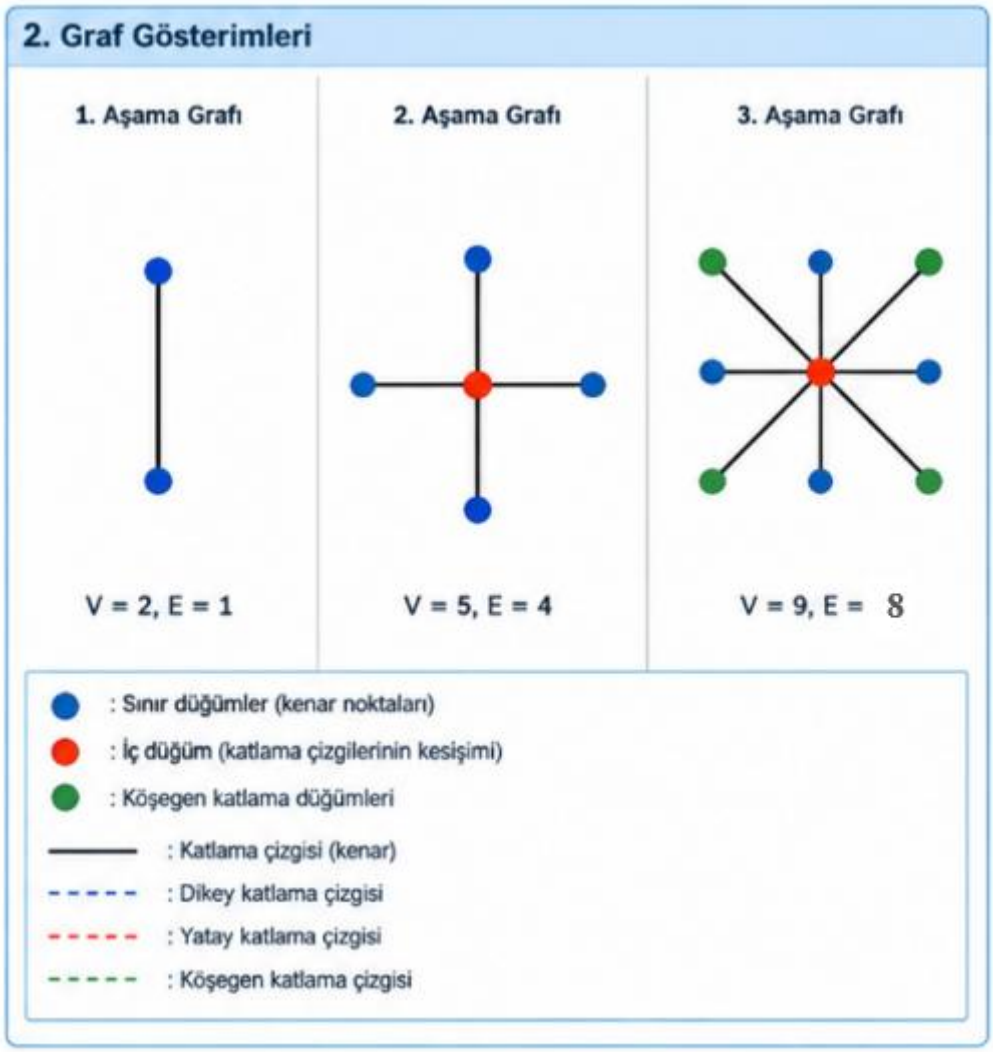
3.3. Katlama Aşamalarına Karşılık Gelen Graf Yapıları

Katlama örüntülerinin graf gösterimine dönüştürülmesinden sonra, her katlama aşaması için ayrı bir graf oluşturulmuştur. Katlama aşamaları G_1, G_2 ve G_3 ile gösterilmiştir.

İlk aşamada yalnızca dikey bir katlama çizgisi bulunduğundan, bu yapı iki uç düğüm ve bu düğümleri birleştiren tek bir kenardan oluşan basit bir yol grafı biçiminde modellenmiştir. Bu graf G_1 olarak adlandırılmıştır.

İkinci aşamada yatay katlama çizgisinin eklenmesiyle dikey ve yatay çizgiler merkezde kesişmiştir. Bu durumda merkezde bir düğüm ve bu düğüme bağlanan dört kenar oluşmuştur. Böylece G_2, merkezî bir düğüm etrafında şekillenen yıldız benzeri bir yapı göstermiştir.

Üçüncü aşamada köşegen katlama çizgilerinin eklenmesiyle graf yapısına yeni düğüm ve kenarlar dâhil edilmiştir. Bu aşamada merkezî düğümden farklı yönlere uzanan daha fazla bağlantı oluşmuş ve grafın yapısı daha karmaşık hâle gelmiştir. Bu yapı G_3 ile gösterilmiştir.



Şekil 3. Katlama aşamalarının graf yapısındaki karşılığı

Katlama aşamalarının graf gösterimleri birlikte değerlendirildiğinde, geometrik örüntüdeki her yeni çizginin graf üzerinde yeni bir bağlantı oluşturabildiği görülmektedir. Benzer biçimde, çizgilerin kesişmesi yeni düğümlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum, origami katlama sürecinin yalnızca fiziksel bir işlem değil, aynı zamanda aşamalı bir graf oluşturma süreci olarak da ele alınabileceğini göstermektedir.

Katlama süreci sembolik olarak aşağıdaki biçimde ifade edilmiştir:

$$G_1 \rightarrow G_2 \rightarrow G_3$$

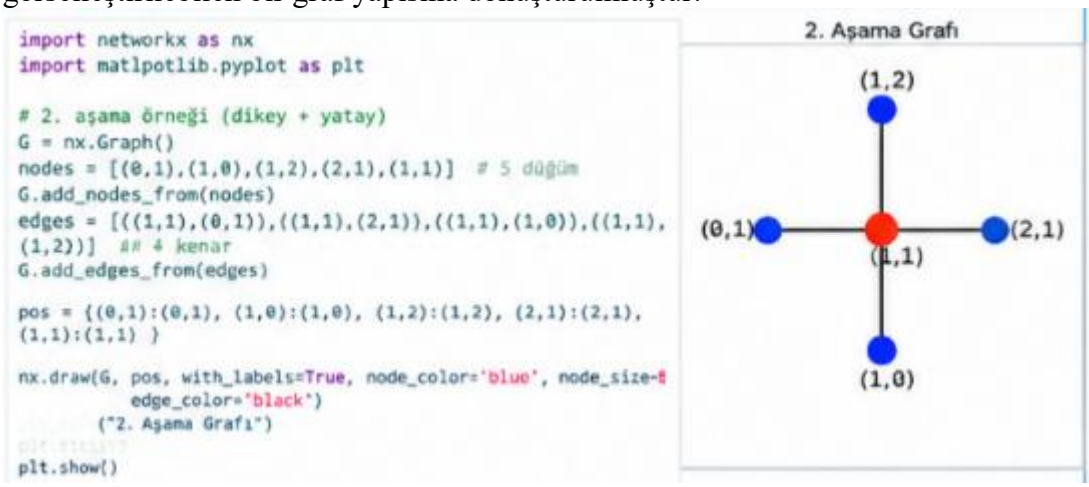
Bu gösterim, katlama örüntüsünün her aşamada yeni geometrik ilişkiler kazanmasıyla birlikte graf yapısının da değiştiğini ifade etmektedir.

3.4. Hesaplamalı Graf Modelinin Oluşturulması

Çalışmanın dördüncü aşamasında, oluşturulan graf yapılarının bilgisayar ortamında modellenmesi ve görselleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Python programlama dili ve NetworkX kütüphanesi kullanılmıştır.

Hesaplamalı modelleme sürecinde öncelikle her katlama aşamasına ilişkin düğüm ve kenar listeleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu listeler Python ortamında tanımlanarak graf yapıları elde edilmiştir. Oluşturulan grafikler, düğüm ve kenar ilişkilerinin görsel olarak incelenebilmesi amacıyla çizdirilmiştir. Kod aracılığıyla oluşturulan graf, origami

örüntüsündeki yatay ve dikey katlama çizgilerinin matematiksel karşılığını göstermektedir. Bu süreçte fiziksel katlama örüntüsü, önce düğüm ve kenar listesine; ardından bilgisayar ortamında görselleştirilebilen bir graf yapısına dönüştürülmüştür:



Şekil 4. Katlama örüntüsünün Python ve NetworkX kullanılarak modellenmesi

Hesaplamalı gösterim, origami örüntülerinin yalnızca statik çizimler olarak değil, algoritmik olarak tanımlanabilen yapılar olarak da ele alınabileceğini göstermektedir. Ayrıca her katlama aşamasının ayrı bir graf olarak tanımlanması, farklı katlama örüntülerinin karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır.

3.5. Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Son aşamada, temel origami katlama örüntüleri ile bu örüntülere karşılık gelen graf yapıları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada katlama çizgilerinin sayısı, kesişim noktaları, düğüm sayısı, kenar sayısı ve grafın genel bağlantı yapısı dikkate alınmıştır.

Modelleme sonucunda elde edilen temel özellikler Tablo 1'de özetlenmiştir:

Tablo 1. Katlama aşamalarına karşılık gelen temel graf özellikleri

Katlama aşaması	Katlama örüntüsü	Düğüm sayısı	Kenar sayısı	Grafın genel yapısı
G_1	Dikey katlama	2	1	Basit yol
G_2	Dikey ve yatay katlama	5	4	Merkezi/yıldız yapı
G_3	Dikey, yatay ve köşegen katlama	9	8	Merkezden yayılan yapı

Karşılaştırma sonucunda, katlama çizgilerinin sayısı arttıkça graf yapısının da daha fazla bağlantı içerdiği görülmüştür. İlk aşamada tek bir çizgiyle temsil edilen yapı, sonraki aşamalarda yeni çizgilerin eklenmesiyle daha fazla düğüm ve kenar içeren bir yapıya dönüşmüştür.

Bu sonuç, temel origami katlamalarının graf teorisi aracılığıyla sistematik biçimde temsil edilebildiğini göstermektedir. Geometrik örüntüdeki çizgiler ve kesişimler, graf modelinde kenar ve düğümlere karşılık gelmiş; böylece fiziksel katlama süreci ile matematiksel gösterim arasında doğrudan bir bağlantı kurulmuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, oluşturulan model üç temel sonucu ortaya koymuştur:

1. Temel origami katlamaları düğüm ve kenarlardan oluşan graf yapılarıyla temsil edilebilmektedir.
2. Katlama çizgilerinin kesişimleri, grafın düğüm yapısını belirlemektedir.
3. Katlama aşamalarındaki değişimler, graf üzerindeki bağlantı ilişkilerinde de gözlemlenebilmektedir.

Bu sonuçlar, origami katlama örüntülerinin geometri ve graf teorisi arasında ilişki kuran görsel ve algoritmik bir model olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, modelin matematik eğitimindeki etkisinin belirlenebilmesi için ilerleyen çalışmalarda öğrenci veya öğretmenlerle gerçekleştirilecek uygulamalı araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

4. Tartışma

Bu çalışmada temel origami katlamalarının graf teorisi perspektifiyle modellenmesi, matematiksel nesnelerin fiziksel deneyim aracılığıyla yapılandırılmasına yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Kâğıt üzerinde gerçekleştirilen katlama eylemleri, öğrencilerin çizgi, kesişim, bağlantı ve bölge gibi geometrik ilişkileri doğrudan gözlemleyebilecekleri bir öğrenme ortamı oluşturabilir. Somutlaştırılmış öğrenme yaklaşımı açısından değerlendirildiğinde, fiziksel eylemler ile matematiksel temsiller arasındaki ilişki, soyut kavramların anlamlandırılmasını destekleyebilecek bir aracı mekanizma olarak düşünülebilir. Nitekim origami ve kâğıt mühendisliği etkinliklerini içeren Think3d! programında, iki boyutlu ve üç boyutlu uzamsal düşünmeye yönelik eğitim sonrasında öğrencilerin uzamsal değerlendirmelerinde gelişim gözlenmiş; bazı matematik problemi türlerinde de ilerleme olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Burte vd., 2017). Bununla birlikte, söz konusu bulgular origami temelli uzamsal eğitimin potansiyeline ilişkin kanıt sunmakta; katlama etkinliklerinin doğrudan graf teorisi öğrenimine neden olduğunu göstermemektedir.

Çalışmada graf teorisi, katlama deseninin bir matematiksel temsil olarak ele alınmıştır. Geometrik katlama desenlerinin belirlenen kurallar çerçevesinde graf bileşenlerine (düğüm ve kenar) dönüştürülmesi, fiziksel model ile matematiksel gösterim arasında açık bir ilişki kurulmasına olanak sağlamıştır. Origami yapılarının geometrik-graf teorik yaklaşımla temsil edilebileceğini inceleyen Chen ve diğerleri (2019), katlama desenlerinin graflar aracılığıyla ifade edilmesini ve düğüm ile elemanların numaralandırılmasını ele almıştır. Bu teknik yaklaşım, origami desenlerinin matematiksel olarak yapılandırılabilirliğini desteklemektedir. Bununla birlikte, mühendislik bağlamında geliştirilen bu modelin matematik eğitimi bağlamına aktarılması, öğrencilerin graf kavramlarını öğrenip öğrenmediğinin ayrıca incelenmesini gerektirmektedir.

Katlama adımlarının belirli bir sıra içerisinde gerçekleştirilmesi, çalışmanın algoritmik düşünme boyutuyla ilişkilendirilebilecek bir başka özelliğidir. Bir origami modelinin oluşturulması sırasında başlangıç koşullarının belirlenmesi, işlemlerin sıralanması, her adımın önceki işlemlerle ilişkilendirilmesi ve ortaya çıkan desenin kontrol edilmesi; algoritmik süreçlerin bazı temel özellikleriyle benzerlik göstermektedir. Somutlaştırılmış hesaplamalı düşünme üzerine yapılan araştırmalarda, fiziksel hareketlerin kodlara dönüştürülmesi ve bu kodlara göre hareket edilmesi gibi etkinliklerin öğrencilerin hesaplamalı düşünme ve uzamsal akıl yürütme becerileriyle ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Kwon vd., 2024). Ayrıca bilgisayarsız etkinliklere ilişkin sistematik derleme ve meta-analiz bulguları, bu tür etkinliklerin hesaplamalı düşünme becerilerini destekleme potansiyeline işaret etmektedir (Chen vd., 2023). Bu çerçevede, katlama adımlarının sembolik yönergeler, işlem sıraları veya akış şemalarıyla ifade edilmesi, origami temelli bir bilgisayarsız kodlama etkinliğinin tasarlanmasına zemin hazırlayabilir. Ancak böyle bir etkinliğin gerçekten algoritmik düşünme becerisini geliştirdiği sonucuna ulaşabilmek için öğrencilerin performanslarının uygun ölçme araçlarıyla değerlendirilmesi önerilebilir.

Origami etkinliklerinin uzamsal düşünme ve matematiksel iletişim açısından taşıdığı potansiyel, yakın dönem araştırmalarında da ele alınmıştır. Ridgley ve diğerleri (2025), origami temelli Project VisMO programında uzamsal sözcük dağarcığındaki gelişim, matematik kaygısındaki azalma ve olası geometri kazanımlarıyla ilişkili bulgular elde etmişlerdir. Bu sonuçlar, katlama eyleminin matematiksel dil, görsel-uzamsal temsil ve geometri öğrenimiyle

birlikte ele alınabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, uzamsal becerilerdeki gelişim ile graf teorisine özgü kavramsal öğrenme arasında doğrudan bir özdeşlik kurulamaz. Bu nedenle mevcut çalışma, söz konusu literatürden hareketle origami–graf teorisi bağlantısının öğretimsel potansiyelini ortaya koymakta; bu potansiyelin deneysel olarak sınanmasını gelecekteki araştırmalara bırakmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen graf-origami modellemesi; matematiksel modelleme, fiziksel temsil, algoritmik yönerge oluşturma ve disiplinlerarası tasarım arasında bir bağlantı kurma potansiyeline sahiptir. Katlama deseninin matematiksel bir graf olarak ifade edilmesi, ilerleyen çalışmalarda etkileşimli öğretim materyallerinin, dijital görselleştirmelerin ve matematik–mühendislik temelli STEM etkinliklerinin geliştirilmesi için bir başlangıç noktası oluşturabilir.

Kaynakça

Burte, H., Gardony, A., Hutton, A., & Taylor, H. (2017). Think3d!: Improving mathematics learning through embodied spatial training. *Cognitive Research: Principles and Implications, 2*, 13. https://doi.org/10.1186/s41235-017-0052-9

Chen, P., Yang, D., Metwally, A. H. S., Lavonen, J., & Wang, X. (2023). Fostering computational thinking through unplugged activities: A systematic literature review and meta-analysis. *International Journal of STEM Education, 10*, 47. https://doi.org/10.1186/s40594-023-00434-7

Chen, Y., Fan, L., Bai, Y., Feng, J., & Sareh, P. (2020). Assigning mountain-valley fold lines of flat-foldable origami patterns based on graph theory and mixed-integer linear programming. *Computers & Structures, 239*, 106328. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106328

Chen, Y., Sareh, P., Yan, J., Fallah, A. S., & Feng, J. (2019). An integrated geometric-graph-theoretic approach to representing origami structures and their corresponding truss frameworks. *Journal of Mechanical Design, 141* (9), 091402. https://doi.org/10.1115/1.4042791

Dağ, F., Şumuer, E., & Durdu, L. (2023). The effect of an unplugged coding course on primary school students' improvement in their computational thinking skills. *Journal of Computer Assisted Learning, 39*(6), 1902–1918. https://doi.org/10.1111/jcal.12850

Hull, T. C., Morales, M., Nash, S., & Ter-Saakov, N. (2022). Maximal origami flip graphs of flat-foldable vertices: Properties and algorithms. *Journal of Graph Algorithms and Applications, 26*(4), 503–517. https://doi.org/10.7155/jgaa.00605

Kwon, K., Jeon, M., Zhou, C., Kim, K., & Brush, T. A. (2024). Embodied learning for computational thinking in early primary education. *Journal of Research on Technology in Education*, *56*(4), 410–430. https://doi.org/10.1080/15391523.2022.2158146

Ridgley, L. M., Geary, D. C., Li, Y., Myers, P. L., Ottinger, R., Silvaggio, D. N., Ünal, Z. E., & Popov, V. (2025). The language of folding: increasing spatial language and decreasing mathematics anxiety through origami. *Frontiers in Education,* 10:1613317. https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1613317

Taylor, H. A., Burte, H., & Renshaw, K. T. (2023). Connecting spatial thinking to STEM learning through visualizations. *Nature Reviews Psychology, 2*, 637–653. https://doi.org/10.1038/s44159-023-00224-6

16. YÜZYILDA OSMANLI İMPARATORLUĞU'NUN HUKUK SISTEMINE İLIŞKIN TÜRK VE BATI TARIHYAZIMININ DEĞERLENDIRILMESI

Bu makale, 16. yüzyıl Osmanlı İmparatorluğu'nun hukuk sistemi hakkındaki tarih yazımı materyallerini analiz etmektedir. Yazar, bu konuda Osmanlı, Türk ve Batı kaynaklarını incelemektedir.

Asst. Prof. Dr. Ensar Baki.
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Hukuk Fakültesi
ORCID ID: 0000-0003-3132-4692
Farman HUSEYNOV
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi. Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kamu Hukuku Bölümü 245208190
ORCID ID: 0009-0004-2453-1401

ÖZET

Bu çalışma, XVI. yüzyıl Osmanlı İmparatorluğu'nun hukuk sistemine ilişkin Türk ve Batı tarih yazımında ortaya konulan yaklaşımları karşılaştırmalı biçimde incelemektedir. Araştırmanın temel amacı, Osmanlı hukuk düzeninin oluşumunda ve uygulanmasında İslam hukuku ile örfî nitelikteki sultanî düzenlemelerin konumunu ortaya koymak ve söz konusu hukuk yapısının dönemin tarih yazımındaki görünümünü değerlendirmektir. Osmanlı hukuk sisteminin, bir taraftan şer'î hukuk, diğer taraftan ise devletin idarî ve malî ihtiyaçları doğrultusunda şekillenen kanun ve örfî hukuk düzenlemeleri olmak üzere iki temel unsur üzerinden geliştiği görülmektedir.

Çalışmada, Osmanlı hukuk düşüncesinin gelişiminde şeyhülislamların, kadıların ve hukuk bilginlerinin üstlendiği rol üzerinde özellikle durulmaktadır. Bu kapsamda İbn Kemal, Zenbilli Ali Efendi ve Ebussuûd Efendi'nin hukukî ve dinî düzenin oluşumundaki katkıları ele alınmakta; özellikle Ebussuûd Efendi'nin şer'î hükümler ile kanunî düzenlemeler arasında uyum sağlama yönündeki faaliyetleri incelenmektedir. Bunun yanında Osmanlı kanunnamelerinin mahiyeti, kaynakları ve tarihsel süreç içerisinde sistemleştirilme sorunları da değerlendirmeye tabi tutulmaktadır.

Türk tarih yazımı bakımından Osmanlı hukukunun oluşumu ve dönüşümü Barkan, Bozkurt ve Tunaya gibi araştırmacıların çalışmaları üzerinden ele alınırken, Batı tarih yazımındaki yaklaşımlar Schacht, Heyd, Coulson, Imber ve Tucker'ın eserleri çerçevesinde incelenmektedir. Özellikle Batılı araştırmalarda Osmanlı hukukunun yalnızca teorik İslam hukuku çerçevesinde değil, mahkeme uygulamaları, fetvalar, kanunnameler, vergi, toprak, aile ve ceza hukuku bakımından da değerlendirilmesi gerektiği ortaya konulmaktadır. Sonuç olarak, XVI. yüzyıl Osmanlı hukuk sisteminin Türk ve Batı tarih yazımında henüz bütün yönleriyle yeterince incelenmediği ve bu alandaki araştırmaların kapsamının genişletilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Osmanlı İmparatorluğu, İslam hukuku, hukuk sistemi

AN EVALUATION OF TURKISH AND WESTERN HISTORIOGRAPHY REGARDING THE LEGAL SYSTEM OF THE OTTOMAN EMPIRE IN THE 16TH CENTURY

ABSTRACT

This study comparatively examines the approaches developed in Turkish and Western historiography concerning the legal system of the Ottoman Empire in the sixteenth century. The primary objective of the research is to determine the position of Islamic law, as well as customary and sultanic regulations, in the formation and implementation of the Ottoman legal order and to evaluate the representation of this legal structure in the historiography of the period. The study demonstrates that the Ottoman legal system developed around two fundamental components: on the one hand, Sharīʿa-based law and, on the other, laws and customary regulations formulated in response to the administrative, fiscal, and social needs of the state.

Particular attention is given to the roles played by Shaykh al-Islams, judges (qadis), and Islamic legal scholars in the development of Ottoman legal thought. Within this framework, the contributions of İbn Kemal, Zenbilli Ali Efendi, and Ebussuûd Efendi to the formation of the Ottoman legal and religious order are examined. Special emphasis is placed on Ebussuûd Efendi's efforts to establish compatibility between Sharīʿa-based provisions and legal regulations enacted by the state. In addition, the nature and sources of Ottoman legal codes (kanunnames), as well as the problems associated with their systematization throughout the historical process, are also evaluated.

From the perspective of Turkish historiography, the formation and transformation of Ottoman law are examined through the works of Barkan, Bozkurt, and Tunaya, while approaches in Western historiography are analyzed through the studies of Schacht, Heyd, Coulson, Imber, and Tucker. In particular, Western scholarship demonstrates that Ottoman law should not be examined solely within the framework of theoretical Islamic law; rather, its practical dimensions, as reflected in court practices, fatwas, and legal codes, should also be taken into consideration. Accordingly, legal practices concerning taxation, land, family, and criminal law are evaluated as significant aspects of the functioning of the Ottoman legal order.

In conclusion, although the sixteenth-century Ottoman legal system has been examined from various perspectives in both Turkish and Western historiography, further comprehensive research is required, particularly regarding the relationship between Sharīʿa-based and customary law, the social and administrative context of legal practices, and the function of legal codes within the Ottoman legal system.

ARAŞTIRMA VE BULGULAR: İslam, dünyanın en önemli dinlerinden biridir. Hem tarihsel olarak hem de günümüzde, insan uygarlığı tarihinde önemli bir rol oynayan İslam, başta Orta Doğu olmak üzere, Uzak Doğu, Orta Asya, Küçük Asya ve Kafkasya'daki birçok ülkede sosyo-politik, hukuki ve kültürel yaşamın çeşitli alanlarını önemli ölçüde etkilemeye devam etmektedir. Devlet aygıtının oluşumu, devletin temel hukuku, siyasi yapı stratejisi ve bu devletlerin ekonomik, kültürel, etnografik ve dini dönüşümleri, yüzyıllardır süregelen dini ve kültürel bir bileşene -gelenek, adet, ahlaki, etik ve hukuk ilkeleri ile yasal normlar katmanına- organik olarak dayanmaktadır. Belirli tarihsel bağlamlarda çeşitli İslami okulların ortaya çıkışı, yayılması ve pekişmesi, modern devletlerin gelişimini etkilemiş ve etkilemeye devam etmektedir.

İslam ülkeleri, hem sosyo-ekonomik ve siyasi özellikleri hem de İslam ve İslam hukukunun devlet ve hukuk gelişimleri üzerindeki etkisinin ölçeği ve yönü bakımından birbirinden farklılık göstermektedir. Çoğunda bu etkiyi karakterize eden ortak özelliklerin yanı sıra, bireysel

ülkelere özgü özellikler de keşfedilebilir[1]. Osmanlı İmparatorluğu bu açıdan eşsiz bir devlettir. Burada, mevzuat iki bağımsız çizgide gelişmiştir. Birinci çizgi, Müslüman hukukunun ilkeleriyle bağlantılıdır ve imparatorlukta Hanefi hukuk okulunun resmi olarak kabul edilen yorumuna karşılık gelmektedir. İkincisi ise, yerel örf ve adet hukukundan doğan sultanın (seküler) mevzuatıdır. Günümüzde Batı'da Osmanlı hukuk sistemine olan ilginin artması şaşırtıcı değildir.

Türk Tarih Yazımı. Zorlu bir birleşme ve genç bir devletin oluşumu dönemini (13. yüzyılın ikinci yarısından 14. yüzyılın ikinci yarısına kadar) Selçuklulardan bayrağı devralır gibi atlatan Osmanlı İmparatorluğu'nda teoloji (el-kelam) ve özellikle tasavvuf yeni bir gelişme yaşadı. 15. yüzyıla gelindiğinde, Suhrawardiyye, Nakşibendiyye ve Halvetiye gibi tasavvuf tarikatları Osmanlı Türkiye'sinde zaten iyi biliniyordu. Örneğin, Alaeddin Ali ibn Musa (ö. 1437) (dua derlemesi yazarı) ve Alaeddin Ali Feneri (ö. 1497) Suhrawardiyye tarikatının temsilcileri iken, Akbilek Bakhşi Halife (ö. 1523) Halvetiye tarikatındandı. Osmanlı İmparatorluğu'nda, Süleyman I Kanuni (1520-1566) ve Selim II (1566-1574) dönemlerinde, bu kardeşlik gücünün zirvesine ulaştı[2].

Bu dönemde, İslam hukuku üzerine birçok eser ortaya çıktı. Çoğu durumda, fıkıh (İslam hukuku) üzerine ilk eserler, Arap ve Fars yazarların daha önceki eserlerinin derlemeleri veya çevirileriydi. Örneğin, İran'da eğitim görmüş olan Ala ad-din Ali Esved (Karahoja) (ö. 1397), Farsçadan çeviriler yaptı. Husrev Mehmed Efendi Sivasi (ö. 1481) Arapçadan eserler çevirdi ve kendisi de İslam hukukunu geliştirdi. Osmanlı tarih yazımında ayrıca İlyas Sinobi (ö.1486) ve Abdurrahman Amasyawi'nin (ö. 1516) eserleri de bilinmektedir. Kur'an'ı incelediler, tercüme ettiler ve yorumladılar[3].

İslam tarihine dair eserler ayrı olarak oluşturuldu ve tercüme edildi. Örneğin, kadı Hüseyin Diyarbakıri (ö. 1559), üç bölümden ve bir ekten oluşan Arapça bir İslam tarihi yazdı. Ek, dört "doğru yolda olan" halife, Emeviler, Abbasiler ve III. Murad'ın (1574-1595) saltanatına kadar Osmanlı sultanları hakkında hikayeler içermektedir [4].

Hanefi İslam'ın Selçuklu döneminde benimsendiği ve daha sonra Osmanlı İmparatorluğu'nda ana mezhep (dini-hukuki okul) haline geldiği bilinmektedir. 15. yüzyılın ikinci yarısından itibaren Osmanlı yazarlarının Hanefi hukuku üzerine bağımsız eserleri ortaya çıkmaya başladı. Bunlar arasında Kemal ad-Din Mehmed Sivasi (ö. 1456) ve Mahmud ibn Süleyman Kefavi'nin (ö. 1588) eserleri yer almaktadır. İkincisi, Hanefi alimlerinin tercüme edilmiş eserlerini kullanarak Hanefi hukuku üzerine yazar ve eserlerin listelerini derlemiştir[5].

Teologlar ve hukuk bilginleri, didaktik ve etik eserlerin yazarları arasında, yazarın Arap ve Fars yazarların tasavvufi felsefi ve etik eserlerini derlediği kadı Ali ibn İmrallah Kınali Zade'nin (1511-1572) "Akhlaq i Alay" (Yüce Ahlak) adlı eseri öne çıkmaktadır[6].

Koca Nishanji Celal Zade Mustafa Çelebi (ö. 1567), 16. yüzyılda Osmanlı İmparatorluğu'nun önde gelen tarihçi ve hukuk bilginlerinden biriydi. Kamu hizmetine 1516 yılında Sultan Selim I (1512-1520) döneminde divan sekreteri olarak başladı. Sultan Süleyman Kanuni döneminde iki kez nişanji (yani devlet şansölyesinin başı, görevleri arasında sultanın tüm kararnamelerinin

---

[1] L. R. Syukiyainen, *Müslüman Hukuku*, Moskova: Nauka, 1986, s.3
[2] Mehmet Tahir Bursalı, *Osmanlı Müellifleri (1299–1915)*, C. I, İstanbul: Yaylacık Matbaası, 1975, s. 23-24
[3] Bursalı, cilt 1, 1975, s. 40-45
[4] Bursalı, cilt 1, 1975, s. 79
[5] Mehmet Tahir Bursalı, *Osmanlı Müellifleri (1299–1915)*, C. 3, İstanbul: Yaylacık Matbaası, 1975, s. 351,391
[6] Bursalı, cilt 1, 1975, s. 61.

ve diğer devlet işlemlerinin yürütülmesi de bulunan kişi) görevini üstlendi (1534'ten 1557'ye ve 1566'dan 1567'ye) [7].

Viyana Milli Kütüphanesi koleksiyonlarında bulunan Hüseyin tarafından derlenen 1620 tarihli kanunlar kanunnamesinin bir kopyası ilgi çekicidir. Kanunnamenin tam metni, yukarıda adı geçen yazarın "Beda i ul vekai" ("Harika Olaylar") adlı kroniğinde yer almaktadır.

Bu kanunlar kanunnamesinin derleyicisi, Yüksek Divan'ın reis ul kuttab'ı* olan ve nişancı görevini yürüten Leysizade Mehmed ibn Mustafa'dır. Hüseyin, kanunnamenin başlangıcını Leysizade Mehmed'in metninde bulunmayan şu sözlerle yapar: "Bu kanunlar kitabı babamın ve dedemin kanunudur. Aynı zamanda benim kanunumdur. Şanlı torunlarım, nesilden nesile, buna göre hareket etsinler". Ünlü Sovyet oryantalist A.S. Hüseyin'in de belirttiği gibi, bu çok önemli giriş, Tveretinova, bu kanunlar kodunun daha önce belirlenmiş olan her şeyi içerdiğini ve Osmanlı İmparatorluğu'ndaki hukuk süreçlerinin tüm gelecekteki gelişimini belirlemeyi amaçladığını belirtmelidir[8].

Osmanlı İmparatorluğu'nun kanun yapımında Şeyhülislamlar (Yüksek Müftüler) İbn Kemal, Zenbilli Ali Efendi ve Ebu Su'ud Efendi'nin isimleri özellikle önemlidir.

İbn Kemal (Kemalpaşa zade Ahmet Şemseddin) muhtemelen 1468 yılında Edirne'de doğdu. Babası sipahi (askeri esir) soyundan geliyordu ve babası gibi Kemalpaşa da başlangıçta Osmanlı ordusunda görev yaptı ve birçok ünlü savaşa katıldı. Ancak kısa süre sonra bilgiye olan susuzluğunun askeri işlere olan sevgisinden daha güçlü olduğunu fark etti ve kendini bilime adamaya başladı. Arapça ve Farsça öğrendi. Önce Edirne'de bir medresede öğretmen, sonra da kadı oldu. Daha sonra Rumeli Kadışir (16. yüzyılda Osmanlı İmparatorluğu'ndaki en yüksek yargıçlık makamı) görevine getirildi ve hem I. Selim'in hem de Büyük Süleyman'ın saygısını kazandı. 1525'te İbn Kemal, Şeyhülislam görevine atandı ve bu görevi 1533'teki ölümüne kadar sürdürdü[9]. İbn Kemal yetenekli bir tarihçi, şair ve âlimdi. Kur'an tefsirleri, dini kitaplar ve fetvaların tercümeleriyle tanınır. Fetva derlemesi olan "Muhimmat" ("En Önemli") özel bir yere sahiptir.

Zenbilli Ali Efendi (ö. 1525/6) Osmanlı İmparatorluğu'nun on sekizinci Şeyhülislamıydı. Karaman'da doğdu. Doğum tarihi tam olarak bilinmiyor. İlk eğitimini Karaman ve Konya'da aldıktan sonra İstanbul ve Bursa'da öğrenimine devam etti. Bursa'da hocasının kızıyla evlendi ve Edirne'deki Taşlık Ali Bey Medresesi'nde öğretmen olarak atandı. Burada Ali Efendi, kişisel nitelikleri ve derin bilgisi sayesinde saygı kazandı [10].

II. Mehmed'in (1451-1481) ölümünden sonra, Sultan II. Bayezid (1481-1512) tahta çıktı. Sultan, Ali Efendi'yi saraya davet etti, ancak o reddetti ve bu da uzun bir süre Amasya'daki bir köy okuluna sürgün edilmesine yol açtı. Gözden düşmüş olan Ali Efendi'nin Şeyhülislam makamını nasıl elde ettiği kesin olarak bilinmemektedir.

Zenbilli Ali Efendi, 1525/6 yılında İstanbul'da vefat etti. 24 yıl boyunca Şeyhülislam görevini yürüttü. Dilek sahiplerine fetvalarını hasır bir sepet içinde teslim ettiği için Zenbilli (Türkçe Zembil - hasır kese, sepet) lakabını aldı[11].

Devletin manevi lideri olarak geçirdiği uzun yıllar boyunca Ali Efendi çok sayıda fetva yayınladı. En ünlü hukuk eseri "Mukhtarat ul Fatwa" ("Seçilmiş Fetvalar")'dır. Sultan Bayezid

---

[7] A. S. Tveritinova, *Sultan I. Selim'in Kanun Kitabı*, Moskova: Doğu Edebiyatı Ana Yayın Kurulu, 1969; çevrim içi versiyon: Thietmar, 2005, s.5.
[8] A. S. Tveritinova, 2005, s.5.
[9] Bursalı, cilt 1, 1975, s. 256.
[10] Bursalı, cilt 3, 1975, s. 288.
[11] Bursalı, cilt 3, 1975, s. 289.

II için ahlak, maneviyat ve etik karakter üzerine ayrı bir eser yazdı. Ne yazık ki, başlığı günümüze ulaşmamıştır[12].

Osmanlı hukuku tarihinde Ebu Su'ud Efendi (1490-1574) özel bir yere sahiptir. Hanefi İslam hukuku ile Osmanlı laik kanununu (kanun) uzlaştıran kişi olarak kabul edilir. Ebu Su'ud (aynı zamanda Hoca Çelebi olarak da bilinir) Kur'an tefsircisi, Hanefi âlimi ve Şeyhülislam'dı. 30 Aralık 1490'da İstanbul yakınlarında doğdu. İlk eğitimini evde aldı. Ebu Su'ud, İnegöl'deki medresede müdarris (öğretmen) olarak çalışmaya başladı. Kariyeri kademeli olarak gelişti. İnegöl'den ayrıldıktan sonra Osmanlı İmparatorluğu'nun başkenti İstanbul'a gitti ve 10 ay sonra Daud Paşa Medresesi'nde, birkaç ay sonra da Mahmud Paşa Medresesi'nde günde 40 akçe maaşla öğretmen olarak atandı. 1527'de İstanbul'da II. Mehmed'in (1451-1481) sekiz medresesinden birinde yükseköğretim kurumunda görev aldı. Bu atama, onun öğretim kariyerinin zirvesini işaret etti ve Ebu Su'ud daha yüksek makamlar, yani yargısal makamlar için bir aday haline geldi. 1533'te önce Bursa'da, sonra İstanbul'da kadı olarak atandı. 1537'de Rumeli kadısı görevini üstlendi ve 1545'te I. Süleyman (1520-1566) onu baş müftü veya şeyhülislam olarak atadı. Hayatının sonuna kadar, iki sultanın (I. Süleyman ve II. Selim (1566-1574)) saltanatları boyunca devletin baş manevi şahsiyeti olarak kaldı [13].

Ebu Su'ud öldü ve İstanbul'da Ebu Eyub semtine defnedildi; mezarı bugün hala oradadır. Soyundan gelenlerden bazıları Sultan Selim II, Murad III ve Mehmed III'ün (1595-1603) saraylarında yüksek mevkilere atanmıştır.

Ebu Su'ud, 1533'te Bursa'da kadı olarak atanmasından 1574'teki ölümüne kadar tüm hayatını hukuk mesleğine adamıştır. Hem hukuk eserleri hem de Kur'an tefsiri, kısmen el-Badavi (1199-1276) ve az-Zamakhshari'nin (1075-1144) tefsirlerinden alıntılar içermesine rağmen, oldukça değerlidir. Kur'an tefsirinin adı "İrşad el-Akl el-Salim" ("Sağduyuya Rehber")'dir. Eseri hem Osmanlı İmparatorluğu içinde hem de dışında üne kavuşmuştur. Birçok kez yeniden basılmış ve üzerine yorumlar yapılmıştır. Ebu Suud'un Kur'an tefsiri hayatının 30 yılını aldı.

Kendisi bu uzun çalışma süresini, kadışir ve daha sonra şeyhülislam olarak günlük işleriyle sürekli meşgul olmasına bağladı. Dahası, Sultan'a eşlik ettiği sürekli savaşlar, en sevdiği işle meşgul olmasına fırsat vermedi.[14]

Ebu Suud, Arapça, Farsça ve Osmanlıca dillerine mükemmel derecede hakimdi; bu da ona bu dillerdeki eserleri hem tarihsel, hem hukuki, hem de şiirsel açılardan inceleme olanağı sağladı. En az incelenen eserleri arasında, rivayetlere dayalı dua kitabı Dua Nama yer almaktadır.

Bu tür eserlerin derleyicisi belirli bir ustalık ve edebi yeteneğe ihtiyaç duyuyordu; duaların ezberlenmesi kolay olmalıydı, çünkü ezberlenmesi gerekiyordu[15].

Şeyhülislam olarak Ebu Suud, Osmanlı İmparatorluğu'nun idari hukuku olan kanunu, İslam'ın kutsal hukuku olan şeriatla uyumlu hale getirmekle görevlendirilmişti. Bu çabada önemli ölçüde başarılı oldu. Süleyman I'in desteğiyle, bu alandaki önceki çalışmalarının sonuçlarını tamamladı ve pekiştirdi. Kadıların sultan tarafından atanması ve dahası, kararlarının Şeriat çerçevesiyle sınırlı olması gerektiği ilkesini sağlam ve özlü tanımlarla formüle etti.

Sultanın emriyle kadı olarak görev yaparken, Osmanlı İmparatorluğu'nun Avrupa eyaletlerindeki toprak hukukunu gözden geçirmeye ve revize etmeye başladı, mümkün olduğunca uyarlayarak Şeriat normlarına uygun hale getirdi. Fetvalarının bazıları günümüze kadar yürürlükte kalmıştır. Başlıca amacını takip ederken, Ebu Su'ud, vakıfların***, taşınır

---

[12] Bursalı, cilt 3, 1975, s. 290.
[13] *The Encyclopaedia of Islam*, New Edition, Leiden: E. J. Brill, 1985, s. 152-153.
[14] Leiden: E. J. Brill, 1985, s.153
[15] Leiden: E. J. Brill, 1985, s.153.

malların, özellikle parasal malların, öğretim için ücret ödeme ve alma işlemlerinin ve diğer dini yükümlülüklerin yasallaştırılması uygulamasını dikkate aldı[16]. Osmanlıca olarak sadece bir basılı kaynak mevcuttur ve bu kaynak Ebu Su'ud Efendi'nin iki el yazması koleksiyonuna dayanmaktadır. Bu basılı baskının yazarı M. Ertuğrul Düzdağ'dır. Koleksiyonlar İstanbul'daki Fatih Kütüphanesi ve Bayezid Umûmî Kütüphanesi'nde bulunmaktadır[17].

Modern Türk tarih yazımında, Osmanlı İmparatorluğu'ndaki İslam hukukuna adanmış eserler arasında, İstanbul Üniversitesi Siyasal Bilimler Profesörü T. Z. Tunay'ın "Türkiye'nin Siyasi Hayatında Batılılaşma Süreci" adlı eseri öne çıkmaktadır. Bu eser, modern devlet kurumlarının ve anayasal hukuk düzeninin oluşumunu ve gelişimini analiz etmektedir. Yazar, eserinde Osmanlı hukukunun Batılılaşmasına dikkat çekmekte ve 17. yüzyıldan başlayarak Batı hukukunun Osmanlı hukuku üzerindeki etkisini tartışmaktadır. Tunayya, "durgunluk dönemi" (1579-1683) boyunca Batı ile Osmanlı İmparatorluğu arasındaki ilişkinin "birlikte yaşama" olarak adlandırılması gerektiğini, çünkü her iki tarafın da birbirine müdahale etmeden birlikte var olduğunu yazmaktadır. Viyana'daki yenilgilerine (1683) kadar Türkler "Batılılaşma" (yani Avrupalılaşma) hakkında düşünmemişlerdir: aksine, ülkedeki yaygın inanış, Osmanlı İmparatorluğu'nun kendisinin Batı için bir model olduğu yönündeydi. Viyana Felaketi, Batı'nın teknik ve kültürel açıdan Osmanlı İmparatorluğu'nu geride bıraktığını göstermiştir (T. Z. Tunayya, özellikle "medeniyet" terimini "kültür" olarak yorumlar ve bu terimin Batı tarzında değiştirilmesi gerektiğini belirtir). Herhangi bir toplumda günlük yaşam koşulları yasal normlarla düzenlenir. Osmanlı toplumunda bunlar Şeriat normlarıydı[18].

Herhangi bir reform girişimine İslam ideolojisi şiddetle karşı çıkmıştır. Bu ideolojinin taşıyıcısı olan din adamları ("alim sınıfı"), T. Z. Tunayya tarafından "imparatorluğun en güçlü siyasi gücü" olarak adlandırılır. Yazara göre, 1826'dan önceki yenilikler ancak din adamları veya onlarla yakından ilişkili "askeri sınıf" ile uzlaşma yoluyla mümkündü. Bu iki sınıfın özel rolü, Osmanlı sisteminde, adeta sultan ile halk arasında, halkın genellikle onların yanında yer alması gerçeğiyle belirlenmiştir. Bu nedenle, pratikte yalnızca bu iki sınıf, herhangi bir reformist girişimi destekleme veya yasaklama konusunda gerçek bir yeteneğe sahipti[19].

Osmanlı İmparatorluğu'ndaki yasama tarihine ilişkin verileri analiz eden en önemli çalışmalar, İstanbul Üniversitesi'nde öğretim üyesi olan önde gelen Türk bilim insanı Ömer Lütfi Barkan'a aittir. Barkan, "Osmanlı Kanun İsimleri" [20] adlı eserinde, Orta Çağ Türk yasama sisteminin kapsamlı bir şekilde incelenmesindeki en büyük zorlukların, tarihçilerin çeşitli yayınlardan bildiği kanunlar da dahil olmak üzere resmi metinlerin Türk arşivlerinde bulunmamasından kaynaklandığını belirtmiştir. Yayınlanmış metinlerin niteliğine gelince, bilinen parçalı yapıları, tekrarları ve hatta bazı çelişkileri nedeniyle, bunların o dönemde oldukça yaygın olan, genellikle eğitim amaçlı veya kadıların (hakimlerin) ve adli ve idari işlerle ilgilenen diğer kişilerin hukuki, idari veya mali uygulamaları için gerekli yardımcı araçlar olarak derlenen belge koleksiyonları (munşaat) veya özel kayıtlar olduğu varsayılabilir. Bu nedenle, farklı zamanlarda ortaya çıkan ve çeşitli hukuki, askeri, idari ve mali konularla ilgili olan münferit sultanlık kararnamelerinin ve düzenlemelerinin sistematizasyonunun ana aşamaları hakkında şu anda güvenilir yargılar oluşturmak mümkün değildir[21]. Sultan Süleyman Kanuni'nin

---

[16] Colin Imber, *Ebü's-Suûd: The Islamic Legal Tradition*, Stanford, California: Stanford University Press, 2009, s.18-19

[17] M. Ertuğrul Düzdağ, *Şeyhülislâm Ebussuud Efendi Fetvaları*, İstanbul: Enderun Kitabevi, 1983, s.24-26

[18] A. V. Vitol, *Osmanlı İmparatorluğu (XVIII. Yüzyılın Başları)*, Moskova: Nauka, 1987, s.333

[19] A. V. Vitol, 1987, s. 334.

[20] Ömer Lütfi Barkan, "Osmanlı Kanunnâmeleri", *III. Türk Tarih Kongresi*, Ankara, 1948

[21] A. S. Tveritinova, 2005, s.6.

Kanunname'sinin çok sayıda nüshası Türk ve Avrupa el yazması koleksiyonlarında korunmaktadır. Ancak bu kanunnamenin resmi metni bulunamamıştır. M. Arif tarafından beş el yazmasından derlenen Süleyman I Kanunname'sinin yayımı, bilimsel açıdan yetersiz olup, eksiklikler, yanlış okumalar ve aynı temaların açıklanamayan tekrarlarıyla doludur. Yayınlanmış tek versiyon olarak kalmıştır[22].

Ankara Devlet Üniversitesi profesörü Gülnihal Bozkurt'un Türk hukuku tarihi üzerine yaptığı araştırmalar özellikle ilgi çekicidir. Türk hukuk sisteminin tarihi üzerine çok sayıda eser yazmıştır. En önemli eserlerinden biri "Türk Hukuk Tarihi"dir [23]. G. Bozkurt, eserinde Türk hukukunun oluşum koşullarını ayrıntılı olarak inceler ve onu "İslam öncesi", "İslam hukuku" ve "Türk hukuku" (yani İslam'ın kabulünden sonraki) olarak üç bölüme ayırır. Yazar, Türk hukuk sisteminin oluşumunda coğrafi, psikolojik ve etnik faktörlerin önemini vurgular. Ardından, Tanzimat reformlarının (1839) ilanından sonra meydana gelen hukuki değişiklikleri inceler.

Bir sonraki eseri olan "Gayrimüslim Osmanlı Vatandaôları Hukuki Durumu"nda [24] G. Bozkurt bu konu üzerindeki düşüncelerine devam eder. Eserlerinde, İslam hukuku konuları sıklıkla Türk hukuku bağlamında ele alınır.

Batı Tarih Yazımı- Batı akademik literatüründe İslam hukukuna bir disiplin olarak ilginin yeniden canlanması ancak 20. yüzyılda, özellikle J. Schacht[25], W. Heyd[26] [27], N.J. Coulson[28] ve K. Imber[29] gibi akademisyenlerin çalışmalarında yaşanmıştır. Bununla birlikte, genel olarak İslam hukuku çalışmaları hala gelişiminin erken aşamalarındadır. Osmanlı İmparatorluğu'ndaki aile hukuku, birkaç eser dışında, Batı literatüründe neredeyse bilinmemektedir.

Uriel Heyd (1913–1968), Batı'da Osmanlı hukuku çalışmalarında öncü olarak kabul edilebilir. Heyd, seçkin bir akademisyen, Türkolog ve Osmanlıcıydı. Köln'de doğan Uriel Heyd, Köln, Münih ve Bonn'da hukuk ve ekonomi okuduktan sonra Kudüs'e göç etti ve 1947'de İbrani Üniversitesi'nden doktorasını aldı. 1948'de İsrail Devleti'nin ilanından sonra Washington'daki diplomatik misyona Birinci Sekreter olarak katıldı ve daha sonra Ankara'da müşavir olarak görev yaptı. 1951'de diplomatik kariyerini bırakarak Kudüs'teki İbrani Üniversitesi Doğu Enstitüsü'nde öğretim görevlisi oldu ve burada Osmanlı İmparatorluğu ve Türkiye'deki İslam tarihi konusunda önde gelen bir uzman haline geldi, Orta Doğu Tarihi Bölümü başkanlığını yaptı ve İsrail'deki Doğu Araştırmaları Enstitüsü'nün direktörü oldu. Uriel Heyd Türkçe, Arapça ve Farsça'nın yanı sıra başlıca Avrupa dillerini de konuşuyordu. Eserlerinin çoğu 16. yüzyıldan 20. yüzyıla kadar Osmanlı İmparatorluğu ve Türkiye Cumhuriyeti'ne adanmıştır. Osmanlı İmparatorluğu ve Türkiye'nin tarihi, hukuku ve dili üzerine çalışmalar yayınlayan ilk kişiydi[30]. Osmanlı hukuku alanında, Osmanlı el yazmalarının incelenmesine dayanan fetvalar üzerine çalışması[31] yaygın olarak bilinmektedir. Bu çalışmada yazar, Osmanlı

[22] A. S. Tveritinova, 2005, s.9.
[23] Gülnihal Bozkurt, *Türk Hukuk Tarihi*, Ankara: Turhan Kitabevi, 2008
[24] Gülnihal Bozkurt, *Gayrimüslim Osmanlı Vatandaşlarının Hukuki Durumu*, Ankara: Türk Tarih Kurumu, 1989
[25] Joseph Schacht, *An Introduction to Islamic Law*, Oxford: Clarendon Press, 1964
[26] U. Heyd, "Some Aspects of the Ottoman Fetwa", *Bulletin of the School of Oriental and African Studies*, C. XXXII, Bölüm 1, 1969
[27] U. Heyd, *Studies in Old Ottoman Criminal Law*, ed. V. L. Ménage, Oxford: Clarendon Press, 1973
[28] N. J. Coulson, *A History of Islamic Law*, Cambridge: Cambridge University Press, 1964
[29] Colin Imber, *Ebü's-Suûd: The Islamic Legal Tradition*, Stanford, California: Stanford University Press, 2009
[30] Colin Imber, 2009, s.11.
[31] Bkz: U. Heyd,1969

İmparatorluğu'nda Müslüman hukukunun pratik uygulamasını incelemeye çalışmıştır. W. Heyd'in Osmanlı İmparatorluğu'nda ceza hukuku üzerine çalışması[32] tamamlanmamış olup, el yazmasını yayınlayan V. L. Ménage sayesinde artık erişilebilir durumdadır. Çalışma, çok sayıda kaynağa dayanmaktadır: fetvalar, kanunlar, fermanlar (kararnameler) ve diğerleri. Kitap, Osmanlı ceza hukuku ve ceza usulü tarihini ayrıntılı olarak anlatan iki bölüme ayrılmıştır: kanunlar, mahkemeler, yargılamalar ve cezalar.
Bahsedilmesi gereken iki eser daha var. İlki, Johansen Baber'in[33] eseri, 16. yüzyılda Osmanlı Mısır'ının hukuki statüsünü ele alıyor. Abu Su'ud'dan veya hükümlerinden bahsetmese de, hukuki formülasyonlarının genellikle Abu Su'ud'un Osmanlı Macaristanı, Anadolu ve Balkanlar'daki vergiler ve toprak mülkiyeti hakkındaki görüşleriyle karşılaştırılabilir olması ilginçtir. İkincisi, Jon Mandaville'in[34] eseri, parasal hayırsever bağışların karmaşık sorunlarını inceliyor ve Abu Su'ud'u ana kahraman olarak öne çıkarıyor. Colin Imber'in belirttiği gibi, bu eserin ayırt edici bir özelliği, hem tamamen hukuki konuları hem de bunların sosyal ve tarihsel bağlamını değerlendirmedeki açıklığı ve kesinliğidir. Son yıllarda, Batı'da İslam hukuku konusuna olan ilgi önemli ölçüde arttı. Buna rağmen, Osmanlı İmparatorluğu'ndaki hukuk sorunu yalnızca Müslüman hukukunun teori ve pratiğinin genel sorunları [35] [36] [37] ve tarihi [38] [39] [40] bağlamında ele alınmaktadır. Ancak, 16. yüzyıl Osmanlı İmparatorluğu'ndaki hukuka daha fazla önem veren birkaç çalışma dikkate değerdir. Özellikle Batılı tarihçi Colin Imber'in çalışması ilgi çekicidir. Bu çalışma, Ebu Su'ud Efendi'ye atfedilen Osmanlı fetvalarının çevirisine ve derinlemesine analizine dayanmaktadır[41] (Colin Imber, tanınmış bir Müslüman hukuku ve Osmanlı İmparatorluğu tarihi uzmanıdır ve yakın zamana kadar Manchester Üniversitesi Orta Doğu Çalışmaları Bölümü'nde ders vermiştir). Kitap üç bölümden oluşmaktadır.
Birinci bölümde, Imber K., Osmanlı İmparatorluğu tarihine ve Ebu Su'ud Efendi'nin biyografisine kısa bir genel bakış sunmaktadır (s. 3-23).

Burada ayrıca şeriat ve kanun kavramlarını da ele almaktadır (s. 24-62). İkinci bölümde, Osmanlı İmparatorluğu'nun yönetimini ve yasama faaliyetlerini,
bir yandan Hanefi egemenlik anlayışına (s. 65-97), diğer yandan da İslam tarih yazımı ve teolojisindeki "hilafet" kavramına (s. 98-111) dayanarak aydınlatıyor. Kitabında, Ebu Suud'un, ilahi otoriteye dayalı olarak hem kanunlar (seküler kanunlar) koyma hem de şeriatı yorumlama ve açıklama sorumluluğunu üstlenen "mutlak kudretli" Osmanlı sultan-halifeleri için bir imaj

---

[32] Bkz: U. Heyd, 1973

[33] J. Baber, *The Islamic Law of Tax and Rent*, London: Croom Helm, 1988
[34] J. E. Mandaville, "Usurious Piety: The Cash Waqf Controversy in the Ottoman Empire", *International Journal of Middle East Studies*, C. 10, 1979
[35] Mohammad Hashim Kamali, *Principles of Islamic Jurisprudence*, revised ed., Cambridge, UK: The Islamic Texts Society, 2000
[36] Khaled Abou El Fadl, *Speaking in God's Name: Islamic Law, Authority and Women*, Oxford: Oneworld Publications, 2001
[37] Wael B. Hallaq, *A History of Islamic Legal Theories: An Introduction to Sunni Usul al-Fiqh*, Cambridge: Cambridge University Press, 1997
[38] Wael B. Hallaq, *The Origins and Evolution of Islamic Law*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005
[39] Christopher Melchert, *The Formation of the Sunni Schools of Law, 9th–10th Centuries C.E.*, Leiden: Brill, 1997
[40] G. Haim, *State, Society, and Law in Islam: Ottoman Law in Comparative Perspective*, Albany, NY: State University of New York Press, 1994
[41] Colin Imber, *Ebü's-Suûd: The Islamic Legal Tradition*, Stanford, California: Stanford University Press, 2009

yaratmaya ve yasal ve dini bir temel sağlamaya yardımcı olmak üzere çeşitli hukuki, teolojik ve siyasi fikirleri "ördüğünü" sonucuna varıyor. Böylece Colin Imber, kitabın özünü oluşturan üçüncü bölümün temelini atıyor.

K. Imber, Osmanlı laik hukukunun Hanefi hukukunun ilkeleriyle çatışmış veya bu ilkelerin ötesine geçmiş olabilecek beş alanını vurgulamaktadır. Bunlar: 1) toprak mülkiyeti ve vergiler (s. 118-138), 2) devredilemez mal yönetimi (vakıflar) (s. 139-163), 3) evlilik ve boşanma (s. 164-209), 4) mülkiyete karşı suçlar (s. 210-235) ve 5) kişiye karşı suçlar (s. 236-268). Her beş durumda da K. Imber, öncelikle Hanefi dini hukuk ekolünün konu hakkındaki görüşünü açıklamakta ve Osmanlı İmparatorluğu'ndaki uygulamasını tanımlamaktadır. Daha sonra, müftünün ilkeleri uygulamayla nasıl ve ne ölçüde uzlaştırabildiğini, uyumlu hale getirebildiğini ve bağdaştırabildiğini izlemek için Ebu Su'ud'un ilgili fetvalarını analiz etmektedir. "Hukuk Evi'nde: Osmanlı Suriyesi ve Filistin'inde Cinsiyet ve İslam Hukuku" adlı eser, Katar'daki Georgetown Üniversitesi Dış İlişkiler Okulu'nda profesör olan Judith Tucker'a[42] aittir. Araştırması, 17. ve 18. yüzyıllarda Suriye ve Filistin'deki hukuk teorisi, hukuk uygulaması ve cinsiyetle ilgili konulara odaklanmaktadır. Tucker, aile hukukuyla ilgili hukuki sorunları çözmede hakimlerin kullandığı yöntemleri inceliyor. Araştırmasında mahkeme kayıtlarına ve fetvalara dayanan yazar, bu Osmanlı vilayetlerindeki hukukçuların Müslüman kadınların haklarını mümkün olduğunca doğru bir şekilde tanımlamaya ve korumaya çalıştığını göstermektedir. Kitap beş bölüme ayrılmıştır: 1) Hukuk, Mahkemeler ve Müftüler; 2) Onun Rızasıyla Evlilik; 3) Boşanma: Onu Temiz Bir Kalple Bırakın; 4) Sevginin Doluluğu: Babalık ve Annelik; 5) Eğer Hazırsa: Yakınlık ve Doğum.

SONUÇ: Bu kısa tarihsel genel bakıştan yola çıkarak, 16. yüzyıl Osmanlı İmparatorluğu'nun hukuk sisteminin modern Türk ve Batı tarih yazımında yeterince ele alınmadığı sonucuna varabiliriz; bu da şüphesiz bu alandaki araştırmaların önemini göstermektedir.

KAYNAKÇA

1. **Baber, J.**, *The Islamic Law of Tax and Rent*, London: Croom Helm, 1988.
2. **Barkan, Ömer Lütfi**, “Osmanlı Kanunnâmeleri”, *III. Türk Tarih Kongresi*, Ankara, 1948.
3. **Bozkurt, Gülnihal**, *Gayrimüslim Osmanlı Vatandaşlarının Hukuki Durumu*, Ankara: Türk Tarih Kurumu, 1989.
4. **Bozkurt, Gülnihal**, *Türk Hukuk Tarihi*, Ankara: Turhan Kitabevi, 2008.
5. **Bursalı, Mehmet Tahir**, *Osmanlı Müellifleri (1299–1915)*, C. I, İstanbul: Yaylacık Matbaası, 1975.
6. **Bursalı, Mehmet Tahir**, *Osmanlı Müellifleri (1299–1915)*, C. III, İstanbul: Yaylacık Matbaası, 1975.
7. **Coulson, N. J.**, *A History of Islamic Law*, Edinburgh: Cambridge University Press, 1964.
8. **Düzdağ, M. Ertuğrul**, *Şeyhülislâm Ebussuud Efendi Fetvaları*, İstanbul: Enderun Kitabevi, 1983.
9. **Haim, G.**, *State, Society, and Law in Islam: Ottoman Law in Comparative Perspective*, Albany, NY: State University of New York Press, 1994.
10. **Hallaq, Wael B.**, *A History of Islamic Legal Theories: An Introduction to Sunni Usul al-Fiqh*, Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[42] Judith E. Tucker, *In the House of the Law: Gender and Islamic Law in Ottoman Syria and Palestine*, Berkeley, CA: University of California Press, 1998

11. **Hallaq, Wael B.**, *The Origins and Evolution of Islamic Law*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
12. **Heyd, Uriel**, "Some Aspects of the Ottoman Fetwa", *Bulletin of the School of Oriental and African Studies*, C. XXXII, Bölüm 1, 1969.
13. **Heyd, Uriel**, *Studies in Old Ottoman Criminal Law*, ed. V. L. Ménage, Oxford: Clarendon Press, 1973.
14. **Imber, Colin**, *Ebü's-Suûd: The Islamic Legal Tradition*, Stanford, California: Stanford University Press, 2009.
15. **Kamali, Mohammad Hashim**, *Principles of Islamic Jurisprudence*, revised ed., Cambridge, UK: The Islamic Texts Society, 2000.
16. **Mandaville, J. E.**, "Usurious Piety: The Cash Waqf Controversy in the Ottoman Empire", *International Journal of Middle East Studies*, C. 10, 1979.
17. **Melchert, Christopher**, *The Formation of the Sunni Schools of Law, 9th–10th Centuries C.E.*, Leiden: Brill, 1997.
18. **Schacht, Joseph**, *An Introduction to Islamic Law*, Oxford: Clarendon Press, 1964.
19. **Tucker, Judith E.**, *In the House of the Law: Gender and Islamic Law in Ottoman Syria and Palestine*, Berkeley, CA: University of California Press, 1998.
20. **Vitol, A. V.**, *Osmanlı İmparatorluğu (XVIII. Yüzyılın Başları)*, Moskova: Nauka, 1987.
21. **İslam. Entsiklopediçeskiy slovar**, Moskova: Nauka, 1991.
22. **İslam Ansiklopedisi**, İstanbul: Millî Eğitim Basımevi, 1949.
23. **Osmanlı Tarih Deyimleri ve Terimleri Sözlüğü**, İstanbul: Millî Eğitim Basımevi, 1971.
24. **Syukiyainen, L. R.**, *Müslüman Hukuku*, Moskova: Nauka, 1986.
25. **The Encyclopaedia of Islam**, New Edition, Leiden: E. J. Brill, 1985.
26. **Tveritinova, A. S.**, *Sultan I. Selim'in Kanun Kitabı*, Moskova: Doğu Edebiyatı Ana Yayın Kurulu, 1969. Çevrim içi versiyon: Thietmar, 2005.
27. **Abou El Fadl, Khaled**, *Speaking in God's Name: Islamic Law, Authority and Women*, Oxford: Oneworld Publications, 2001.

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ KULLANARAK SEL-TAŞKIN RİSKİ DEĞERLENDİRMESİ: GAZİANTEP İL MERKEZİ UYGULAMASI

Dr. Öğr. Üyesi Gamze BEDİROĞLU
Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tapu Kadastro Programı, 79000 Kilis University,
ORCID ID: 0000-0003-2755-3206

ÖZET
Sel ve taşkın olayları, iklim değişikliği ve kentleşmenin etkisiyle dünya genelinde artan doğal afetler arasında yer almaktadır. Bu afetlerin olumsuz etkileri, ekonomik kayıplar ve can kaybı açısından oldukça ciddidir. Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yer alan Gaziantep İli, jeolojik konumu, iklim özellikleri ve artan nüfuslu alanlar nedeniyle sel ve taşkın riskine sahip bir bölgedir. İşte bu nedenle, sel ve taşkın tehlikesinin belirlenmesi, risk değerlendirmesi ve harita oluşturulması kritik öneme sahiptir. Çalışmanın amacı, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımı olan ArcGIS kullanarak Gaziantep İl Merkezi ve çevresinde sel taşkın analizi yapmak, tehlikeli bölgeleri belirlemek ve risk haritaları oluşturmaktır. Çalışmada, Gaziantep İline ait topografik haritalar, hidrolojik veriler, arazi kullanım haritaları, jeolojik ve topoğrafik veriler kullanılmıştır. Veri tabanı oluşturulduktan sonra, ArcGIS yazılımı kullanılarak mevcut sel-taşkın risk modeli oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, haritalar halinde sunulmuş ve risk düzeyleri (düşük, orta, yüksek ve çok yüksek) belirlenmiştir. Çalışmanın bulguları, Gaziantep İl Merkezi'nde, özellikle kentsel gelişimin yoğun olduğu bazı bölgelerde yüksek sel taşkın riski olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen sel taşkın haritaları, şehircilik planlaması, afet yönetimi, acil müdahale planlaması ve altyapı tasarımı gibi alanlarda karar vericilere çok değerli bilgiler sunmaktadır. Sonuç olarak, CBS gibi güçlü araçların kullanılması, sel taşkın analizi çalışmalarının daha doğru, hızlı ve ekonomik bir şekilde yapılabilmesini sağlamaktadır.
Anahtar kelimeler: CBS, Sel-Taşkın Analizi, Risk Haritaları, Gaziantep, Doğal Afet Yönetimi

FLOOD RISK ASSESSMENT USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS: A CASE STUDY OF GAZIANTEP CITY CENTER

ABSTRACT
Floods and inundations are among the natural disasters increasing globally due to the impacts of climate change and urbanization. The adverse effects of these disasters are severe, resulting in significant economic losses and loss of life. Gaziantep Province, located in Türkiye's Southeastern Anatolia Region, is prone to flood risks due to its geological location, climatic characteristics, and areas of increasing population density. Therefore, identifying flood hazards, assessing risks, and generating maps are of critical importance. The aim of this study is to conduct a flood analysis for the Gaziantep city center and its surroundings, identify hazardous zones, and create risk maps using ArcGIS, a Geographic Information System (GIS) software. Topographic maps, hydrological data, land-use maps, and geological and topographic data pertaining to Gaziantep Province were utilized in the study. After the database was created, an existing flood risk model was developed using ArcGIS software. The results were presented in map format, and risk levels (low, medium, high, and very high) were determined. The findings indicate a high risk of flooding in the Gaziantep city center, particularly in certain areas characterized by intensive urban development. The flood maps generated in this study provide

invaluable information to decision-makers in fields such as urban planning, disaster management, emergency response planning, and infrastructure design. In conclusion, the use of powerful tools like GIS enables flood analysis to be conducted more accurately, rapidly, and cost-effectively.
Keywords: GIS, Flood Analysis, Risk Maps, Gaziantep, Natural Disaster Management

1. GİRİŞ

Sel ve taşkın olayları, yerleşim alanlarının fiziksel yapısı, topoğrafik özellikleri, yağış rejimi ve yüzeylerin geçirimsizlik düzeyi ile birlikte değerlendirilmesi gereken karmaşık mekânsal süreçlerdir. Kentsel alanlarda kısa süreli ve yüksek şiddetli yağışların yüzey akışına dönüşmesi, doğal drenaj ağlarının yetersiz kalması veya akış koridorlarının yapılaşma ile daralması, taşkınların etkisini artırabilmektedir. Bu nedenle taşkın yönetiminde yalnızca gerçekleşmiş olayların incelenmesi değil, farklı fiziksel ve çevresel göstergelerin birlikte değerlendirilerek mekânsal duyarlılık yüzeylerinin oluşturulması da önem taşımaktadır.

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), çok farklı kaynaklardan elde edilen raster ve vektör verilerin ortak bir coğrafi referans sisteminde işlenmesini, standartlaştırılmasını ve hücre bazında birleştirilmesini mümkün kıldığı için sel-taşkın duyarlılık çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA/MCDA) yaklaşımı, tek bir fiziksel değişkenin açıklayamadığı taşkın süreçlerini çok sayıda göstergeyi aynı karar yüzeyinde birleştirerek temsil etmeye olanak sağlar. Literatürde eğim, yükselti, yağış, akarsuya uzaklık, akış birikimi, drenaj yoğunluğu, arazi kullanımı, jeoloji ve TWI gibi değişkenlerin farklı ağırlıklandırma ve sınıflandırma yöntemleriyle CBS ortamında birleştirildiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Köroğlu ve Akıncı, 2023; Msabi ve Makonyo, 2021; Tang vd., 2018). Yakın tarihli bir sistematik literatür incelemesi, 2014–2024 dönemindeki 75 çalışmayı değerlendirerek kentsel taşkın duyarlılığı araştırmalarında eğim, arazi kullanımı/arazi örtüsü, yükselti ve yağışın en sık kullanılan değişkenler arasında olduğunu; tarihsel taşkın verilerinin ise doğrulamada yaygın biçimde tercih edildiğini göstermektedir (Bouchikhi vd., 2026).

Türkiye'deki çalışmalar da CBS ve ÇKKA yöntemlerinin taşkın duyarlılığı ve riskinin mekânsal değerlendirilmesinde kullanılabildiğini göstermektedir. Dereli (Giresun) için gerçekleştirilen bir çalışmada yağış, eğim, yükselti, akarsuya uzaklık, arazi örtüsü, akış birikimi, drenaj yoğunluğu, TWI, jeoloji/litoloji ve bakı gibi on faktör AHP ile ağırlıklandırılmış ve beş sınıflı taşkın duyarlılık haritası oluşturulmuştur (Köroğlu ve Akıncı, 2023). Susurluk Havzası çalışmasında da yağış, eğim, arazi kullanımı, yükselti, drenaj yoğunluğu ve TWI gibi değişkenler AHP çerçevesinde değerlendirilmiştir (Aytekin vd., 2025). Melet Havzası için geliştirilen daha yeni bir çalışmada ise GIS tabanlı MCDM yaklaşımının taşkın riskinin mekânsal dağılımını ortaya koymadaki rolü vurgulanmıştır (Fıçıcı, 2024).

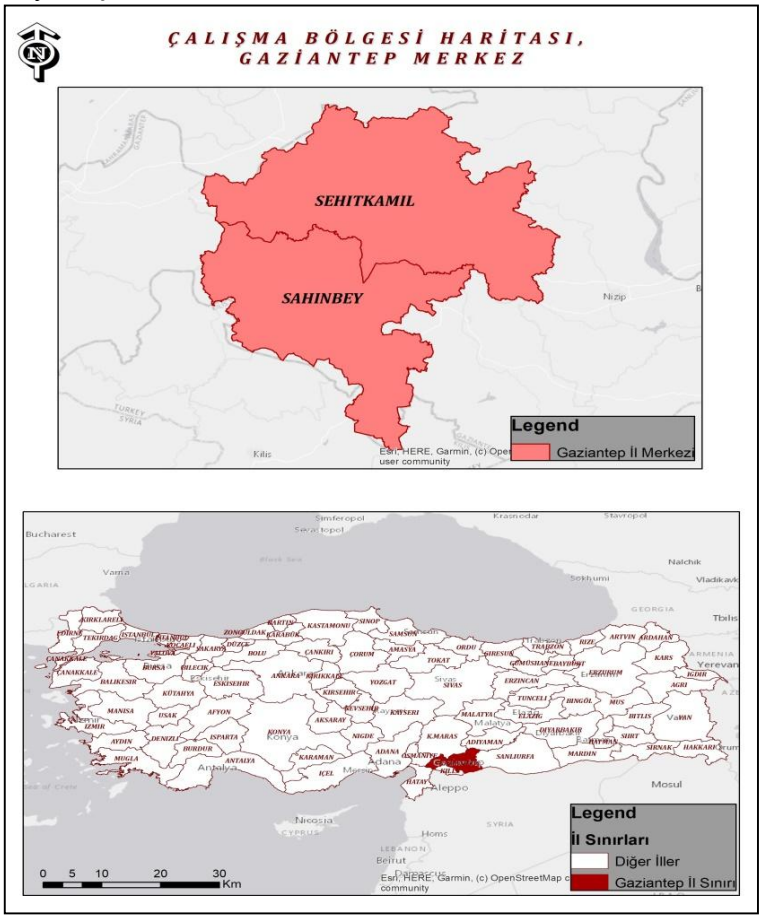
Bu çalışmanın temel amacı, Gaziantep il merkezinde Şehitkamil ve Şahinbey ilçelerini kapsayan alanda sel-taşkın duyarlılığının yedi mekânsal parametre kullanılarak CBS ortamında değerlendirilmesi ve beş sınıflı bir risk/duyarlılık yüzeyinin oluşturulmasıdır. Çalışmanın ikinci amacı, üretilen yüzeyin kent planlaması ve afet yönetimi açısından nasıl yorumlanabileceğini ortaya koymaktır. Çalışmada kullanılan yaklaşım, hidro-topografik göstergeleri öne çıkaran ve farklı veri türlerini ortak 1–5 ölçeğinde birleştiren literatür temelli bir Weighted Overlay (Ağırlıklı Bindirme) modelidir.

2. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı Gaziantep il merkezini (Şehitkamil ile Şahinbey ilçe sınırlarını) kapsamaktadır (Şekil 1). Gaziantep, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan ve yoğun kentsel gelişme

gösteren önemli bir yerleşim alanıdır.



Şekil 1. Çalışma bölgesi haritası

2.2. Metodoloji

Çalışmanın coğrafi çerçevesinde havza tipi topoğrafya, mevsimsel yağış karakteri, doğal akış koridorları ve kentsel yüzeyler birlikte değerlendirilmiştir. Bu bağlam, sel-taşkın duyarlılığının yalnızca akarsu yakınlığıyla değil, yüzey eğimi, akışın toplanması, yağış ve kentsel geçirimsizlik gibi farklı koşulların bileşimiyle ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Çalışmada kullanılan temel veri setleri raster ve vektör formatındaki mekânsal katmanlardan oluşmaktadır. Sayısal Yükseklik Modeli (DEM), 20*20 m analiz çözünürlüğünde eğim, akış birikimi ve TWI göstergelerinin üretilmesinde temel veri olarak kullanılmıştır. Akarsu verisi, her hücrenin en yakın akarsuya Öklid uzaklığının hesaplanmasında; yağış verisi yağış yüzeyinin oluşturulmasında; arazi kullanımı ve jeoloji/litoloji verileri ise yüzey geçirgenliği ve jeolojik koşulların modele dahil edilmesinde kullanılmıştır.

Çalışmanın yöntemsel akışı; veri temini ve hazırlama, koordinat dönüşümleri, ortak raster yapısına dönüştürme, yeniden sınıflandırma, ağırlıklandırma, Weighted Overlay ve sonuçların beş risk/duyarlılık sınıfına ayrılması aşamalarından oluşmaktadır. Analiz çözünürlüğü 20*20 m olarak belirlenmiş ve her hücre için yedi parametrenin katkısı hesaplanmıştır.

Çalışmada veri hazırlama, analiz ve görsel hazırlama işlemleri ArGIS yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. Modelin bütün katmanları ortak bir raster yapısına dönüştürülmüş, ardından her parametre 1–5 arasında yeniden sınıflandırılmıştır. Ayrıca belirlenen her parametre için toplam değer %100 olacak şekilde etki katsayı değerleri belirlenmiştir. Böylece farklı ölçü birimlerine sahip değişkenlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesi sağlanmıştır. Son aşamada ağırlıklı çakıştırma analizi yapılarak her hüzre kendi ağırlık yüzeyiyle çarpılarak ve

hücre bazında toplanarak birleşik risk/duyarlılık skoru hesaplanmış, risk yüzeyi oluşturulmuştur.

2.3. Parametrelerin Seçimi ve Ağırlıklandırılması

Modelde en yüksek ağırlık %25 ile akış birikimine verilmiştir. Eğim ve akarsuya uzaklık değişkenleri %20'şer ağırlığa sahiptir. Bu üç hidro-topografik değişkenin toplam ağırlığı %65'tir. Yağış %15, Topografik Islaklık İndeksi %10, arazi kullanımı ve jeoloji/litoloji ise %5'er ağırlıkla modele dâhil edilmiştir. Dolayısıyla modelin omurgasını yüzey akışının toplanması, topoğrafik eğim ve akarsu koridorlarına yakınlık oluşturmaktadır (Tablo1.).

Tablo 1. Kullanılan parametrelerin ağırlık katsayıları

No	Parametre	Grup	Ağırlık
1	Akış Birikimi (Flow Accumulation)	Hidro-topografik	%25
2	Eğim (Slope)	Hidro-topografik	%20
3	Akarsuya Uzaklık	Hidro-topografik	%20
4	Yağış	Hidro-meteorolojik	%15
5	Topografik Islaklık İndeksi (TWI)	Hidro-topografik	%10
6	Arazi Kullanımı	Arazi/yüzey	%5
7	Jeoloji / Litoloji	Jeolojik	%5

Akış birikimi, DEM üzerinden belirlenen akış yönlerine göre her hücreye ulaşan potansiyel akış miktarını temsil etmektedir. Yüksek akış birikimi değerleri, yüzeysel akışın daha fazla toplandığı kesimleri ifade eder. Böylece yüksek akış birikimine sahip hücreler daha yüksek duyarlılık puanı almıştır.

Eğim, suyun yüzey üzerinde hareket etme ve belirli kesimlerde birikme eğilimini etkileyen temel topoğrafik göstergelerden biridir. Çalışmada düşük eğimli alanların daha yüksek duyarlılık taşıdığı kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, düşük eğimli alanlarda suyun daha uzun süre tutulabileceği ve yüzeysel birikimin artabileceği varsayımına dayanmaktadır.

Akarsuya uzaklık, her hücrenin en yakın akarsuya Öklid uzaklığını ifade etmektedir. Akarsu koridorlarına yakın alanlar potansiyel taşkın etkisine daha açık kabul edilmiştir.

Yağış, yüzey akışını tetikleyen temel hidro-meteorolojik değişkenlerden biri olarak modele dâhil edilmiştir. Böylece daha yüksek yağış alanları daha yüksek duyarlılık puanına sahip olmuştur.

Topografik Islaklık İndeksi (TWI), topoğrafyanın suyu toplama ve doygunluğa ulaşma eğilimini ifade eden bir göstergedir.

TWI değeri hesaplanırken, akış birikimi ve eğim değişkenleri kullanılmıştır. ArcGIS yazılımında Raster Calculater Analizi aracılığı ile hesaplanmıştır. Kullanılan matematiksel formül şu şekildedir:

Hücre Alanı=Akış Birikimi × Hücre Boyutu (20 m) (1)

TWI = Ln(" Hücre_alanı" / Tan("Slope" * 3.14159265 /180)) (2)

Arazi kullanımı, yüzeyin geçirimsizlik ve akış davranışı üzerindeki etkisini temsil etmektedir. Böylece geçirimsizliği daha yüksek olduğu varsayılan kentsel yüzeyler daha yüksek duyarlılık sınıfına taşınmıştır. Orman ve tarım alanları yüzey davranışını farklılaştırarak akışı geciktirir.

Jeoloji, Jeolojik birimlerin geçirgenlik özellikleri, yüzey akışının davranışını etkileyen ikincil bir gösterge olarak kullanılmıştır. Bu sınıflandırma, daha düşük geçirgenliğe sahip birimlerin yüzey akışını artırabileceği varsayımına dayalı göreli bir değerlendirmedir.

Aşağıdaki tabloda modelde kullanılan her bir parametre, bu parametrenin değer aralıkları ve bu değerlerin punları gösterilmiştir (Tablo 2). Şekil 2'de Akış birikimi, Eğim, Akarsu, TWI,

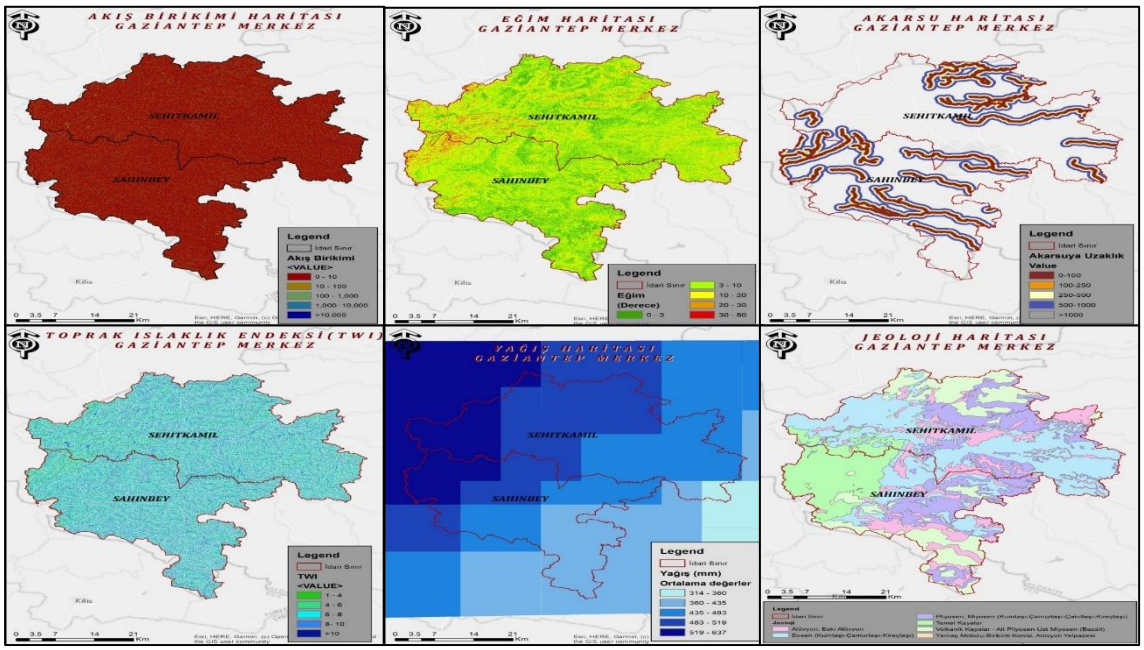
Yağiş ve Jeolojik yapı dağılımı haritası; Şekil 3'te ise Arazi kullanımı dağılımı haritası sunulmuştur.

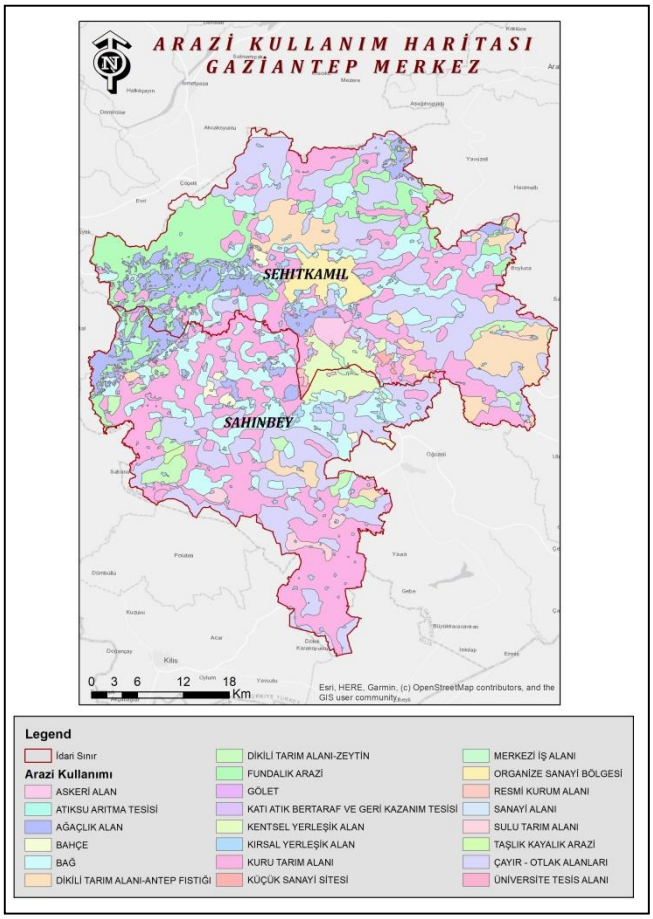
Tablo 2. Kullanılan parametrelerin yeniden sınıflandırma tablosu

Parametre	Sınıf / Değer Aralığı	Puan
Yağış (mm)	314-360	1
	360-435	2
	435-483	3
	483-519	4
	>519	5
Eğim (%)	0–3	5
	3–10	4
	10–20	3
	20–30	2
	>30	1
Flow Accumulation	0–10	1
	10–100	2
	100–1.000	3
	1.000–10.000	4
	>10.000	5
TWI	<4	1
	4–6	2
	6–8	3
	8–10	4
	>10	5
Akarsuya Uzaklık (m)	0–100	5
	100–250	4
	250–500	3
	500–1.000	2
	>1.000	1
Jeoloji	Alüvyon – Eski Alüvyon	5
	Yamaç Molozu – Birikinti Konisi – Alüvyon Yelpazesi	4
	Pliyosen–Miyosen (Kumtaşı–Çamurtaşı–Kiltaşı–Kireçtaşı)	3
	Eosen (Kumtaşı–Çamurtaşı–Kireçtaşı)	3
	Volkanik Kayalar / Bazalt	2
	Temel Kayalar	2
Arazi kullanımı	Ağaçlık Alan	1
	Askeri Alan	4
	Atıksu Arıtma Tesisi	5
	Bağ	3
	Bahçe	3
	Çayır - Otlak Alanları	3
	Dikili Tarım Alanı – Antep Fıstığı	2

	Dikili Tarım Alanı – Zeytin	2
	Fındıklık Arazi	2
	Göl	5
	Katı Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesisi	5
	Kentsel Yerleşik Alan	5
	Kırsal Yerleşik Alan	4
	Kuru Tarım Alanı	3
	Küçük Sanayi Sitesi	5
	Merkezi İş Alanı	5
	Organize Sanayi Bölgesi	5
	Resmî Kurum Alanı	4
	Sanayi Alanı	5
	Sulu Tarım Alanı	4
	Taşlı Kayalık Arazi	1
	Üniversite Tesis Alanı	4

Şekil 2. Akış birikimi, Eğim, Akarsu, TWI, Yağış ve Jeolojik yapı dağılımı haritası, Gaziantep Merkez





Şekil 3. Arazi kullanımı dağılımı haritası, Gaziantep Merkez

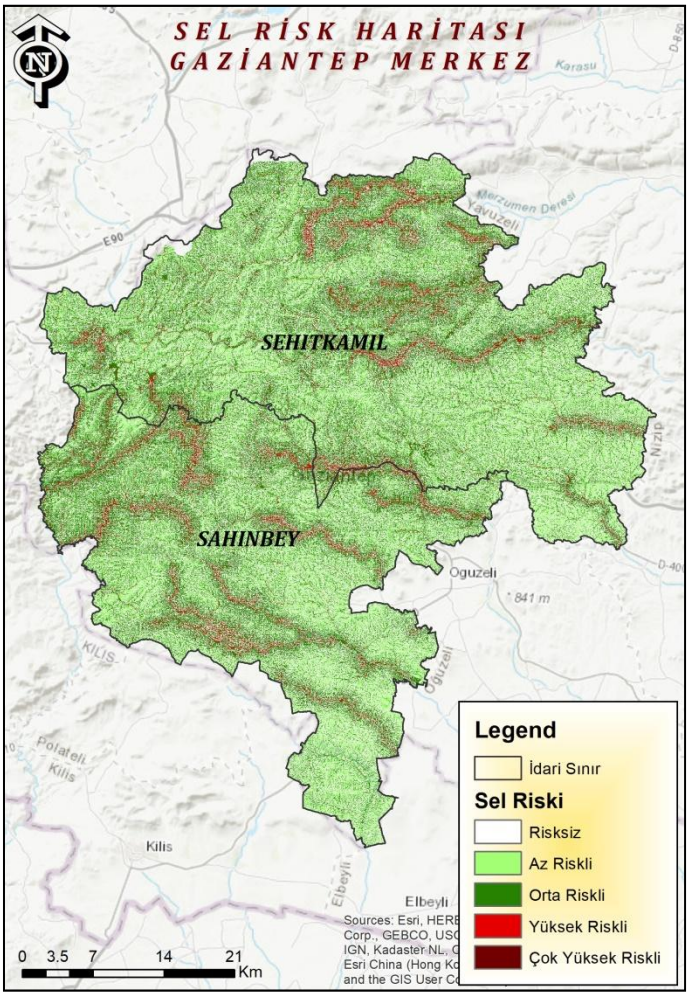
2.4. Weighted Overlay Modeli

Tüm parametreler 1–5 ortak ölçeğine dönüştürüldükten sonra aşağıdaki ağırlıklı toplam modeli uygulanmıştır:

R = 0,25A + 0,20E + 0,20U + 0,15Y + 0,10T + 0,05L + 0,05J (3)

Burada R birleşik risk/duyarlılık skorunu; A akış birikimini; E eğimi; U akarsuya uzaklığı; Y yağışı; T TWI'yi; L arazi kullanımını; J ise jeoloji/litolojiyi temsil etmektedir.

Ağırlıkların toplamı 1,00 (%100)'dür. Son skor, beş sınıflı sonuç yüzeyine dönüştürülerek 'risksiz', 'az riskli', 'orta riskli', 'yüksek riskli' ve 'çok yüksek riskli' kategorileri oluşturulmuştur.



Şekil 4. Sel-taşkın risk yüzeyi haritası, Gaziantep Merkez

Üretilen sonuç haritası, Gaziantep il merkezinde sel-taşkın riskinin mekânsal olarak homojen olmadığını göstermektedir (Şekil 4). Şehitkamil ve Şahinbey ilçelerinde alanın önemli bölümünde düşük/az riskli sınıfların hâkim olduğu; buna karşılık yüksek ve çok yüksek riskli alanların daha çok çizgisel, parçalı ve topoğrafik olarak belirgin akış koridorları boyunca yoğunlaştığı görülmektedir. Bu dağılış, modelde yüksek ağırlık verilen akış birikimi, eğim ve akarsuya uzaklık değişkenlerinin birlikte oluşturduğu mekânsal desen ile uyumludur.

Şehitkamil ilçesinde yüksek riskli alanların özellikle kuzey ve orta kesimlerdeki akış koridorları boyunca belirginleştiği görülmektedir. Şahinbey'de ise riskli alanlar daha çok kentsel alan içerisindeki vadi ve akış hatları boyunca parçalı biçimde ortaya çıkmaktadır. Güney ve güneydoğudaki daha kırsal kesimlerde az riskli alanların daha geniş alanlar kapladığı görülmektedir. Bu durum, kentsel geçirimsizlik ile topoğrafik su toplama özelliklerinin birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Mahalle ölçeğinde incelendiğinde ise benzer bir heterojenlik söz konusudur. Bir mahallenin tamamının aynı risk sınıfında bulunması yerine, belirli alt kesimlerde yüksek veya çok yüksek risk alanları görülebilmektedir. Bu nedenle sonuçların yalnızca mahalle sınırları üzerinden yorumlanması yerine, riskli alt bölgelerin ve bunların akış koridorlarıyla ilişkilerinin dikkate alınması daha uygun olacaktır.

Çalışmanın sonuçları, literatürdeki çok kriterli taşkın duyarlılık çalışmalarında öne çıkan hidro-topografik göstergelerle genel olarak örtüşmektedir. Özellikle akış birikimi, eğim ve akarsuya

uzaklığın model ağırlıklarının toplam %65'ini oluşturması, çalışmanın sel-taşkın duyarlılığını esas olarak suyun nerede toplanabileceği ve hangi kesimlerde akışın yoğunlaşabileceği soruları üzerinden ele aldığını göstermektedir. Literatürde de eğim, akarsuya uzaklık, akış birikimi, yağış ve TWI gibi değişkenler sık kullanılan taşkın koşullandırıcıları arasında yer almaktadır (Köroğlu ve Akıncı, 2023; Tehrany vd., 2014; Bouchikhi vd., 2026).

Akış birikiminin %25 ağırlıkla en yüksek katkıya sahip olması, modelin doğal drenaj ve yüzeysel akışın toplandığı alanları öncelikli olarak değerlendirdiğini göstermektedir. Eğim ve akarsuya uzaklığın %20'şer ağırlıkla takip etmesi ise düşük eğimli ve akarsuya yakın alanların daha yüksek duyarlılık puanı almasına neden olmaktadır. Bu nedenle sonuç haritasında görülen çizgisel risk desenlerinin yalnızca kentsel arazi kullanımından kaynaklandığını söylemek mümkün değildir; söz konusu desen, hidro-topografik göstergelerin ortak etkisinin bir ürünüdür.

Yağış ve TWI'nin birlikte kullanılması modelin iki farklı ölçekli hidrolojik özelliği temsil etmesini sağlamaktadır. Yağış bölgesel ölçekte su girdisini ifade ederken TWI, daha lokal topoğrafik su biriktirme eğilimini temsil etmektedir. Arazi kullanımı ve jeoloji/litolojinin %5'er ağırlıkla kullanılması ise kentsel yüzey özellikleri ve geçirgenlik koşullarının modele ikincil katkı vermesini sağlamaktadır. Güncel çalışmalar da TWI, yağış, akarsuya yakınlık ve arazi kullanımı gibi değişkenlerin birlikte kullanılmasının taşkın duyarlılık yüzeylerinin mekânsal ayrım gücünü artırabildiğini göstermektedir (Fıçıcı, 2024; Aytekin vd., 2025).

Çalışmanın önemli bir sonucu da riskin mahalle veya ilçe sınırları içinde homojen olmamasıdır. Bu bulgu, kent ölçeğinde afet yönetiminin yalnızca idari birimlere göre değil, akış güzergâhları ve topoğrafik alt bölgeler gibi fiziksel mekânsal birimlere göre de tasarlanması gerektiğine işaret etmektedir. Üretilen harita; yağmur suyu drenajı, yeşil alan/tampon alan planlaması, kritik ulaşım bağlantılarının değerlendirilmesi ve acil müdahale önceliklerinin belirlenmesi gibi konularda karar destek verisi olarak kullanılabilir.

3. SONUÇ

Bu çalışmada Gaziantep il merkezinde, Şehitkamil ve Şahinbey ilçelerini kapsayan alanda sel-taşkın duyarlılığı/riski CBS tabanlı çok parametreli bir Weighted Overlay modeli ile değerlendirilmiştir. 20*20 m analiz çözünürlüğünde akış birikimi, eğim, akarsuya uzaklık, yağış, TWI, arazi kullanımı ve jeoloji/litoloji olmak üzere yedi parametre ortak 1–5 ölçeğine dönüştürülmüş ve literatür temelli ağırlıklarla birleştirilmiştir.

Sonuçlar, yüksek ve çok yüksek duyarlılık alanlarının özellikle akarsu koridorları, vadi tabanları, düşük eğimli ve akışın toplandığı kesimlerde yoğunlaştığını göstermektedir. Kentsel alanların da bu hidro-topografik koşullarla çakıştığı bölgelerde duyarlılık seviyeleri yükselmektedir. Risk dağılımının ilçe ve mahalle sınırları içinde homojen olmaması, planlama ve afet yönetimi açısından alt-bölge ölçeğinde mekânsal önceliklendirme yapılmasının önemini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın temel katkısı, farklı veri türlerini ortak bir mekânsal karar yüzeyinde birleştirerek Gaziantep kent merkezinde sel-taşkın açısından göreli öncelikli alanları görünür hale getirmesidir. Bununla birlikte haritanın göreli duyarlılık/önceliklendirme amacı taşıdığı ve doğrudan taşkın derinliği, debi, hız veya olasılık tahmini olarak kullanılmaması gerektiği unutulmamalıdır. Gelecekte tarihsel taşkın envanteriyle doğrulama, duyarlılık analizi ve hidrolojik/hidrolik modelleme ile desteklenen çalışmalar, mevcut yaklaşımın bilimsel ve uygulamalı değerini güçlendirecektir.

4. KAYNAKÇA

Aytekin, M., Serengil, Y., & İnan, M. (2025). A GIS Based Quick Assessment Method of Flood Vulnerability: Susurluk Basin Case. European Journal of Forest Engineering, 11(1), 1-14. https://doi.org/10.33904/ejfe.1527247.

Bouchikhi, S., Chourak, M., Boushaba, F., & El Baida, M. (2026). Flood susceptibility mapping in urban areas based on analytical hierarchy process: A decade-long systematic literature review. Journal of African Earth Sciences, 233, 105903. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2025.105903

Fıçıcı, M. (2024). Flood risk assessment using Neutrosophic Analytical Hierarchy Process (N-AHP) and GIS techniques in the Melet Basin (Türkiye). Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 10(2), 295–313. https://doi.org/10.21324/dacd.1407354

Köroğlu, B., & Akıncı, H. (2023). Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Çok Kriterli Karar Analizi ile Giresun İli Dereli İlçesinin Taşkın Duyarlılık Analizi. Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 1(2), 62–81.

Msabi, M. M., & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 21, 100445. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445

Tang, Z., Zhang, H., Yi, S., & Xiao, Y. (2018). Assessment of flood susceptible areas using spatially explicit, probabilistic multi-criteria decision analysis. Journal of Hydrology, 558, 144–158. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.033

Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. Journal of Hydrology, 512, 332–343. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008

SHOTGUN METAGENOMİK VERİLER KULLANILARAK SAĞLIKLI VE HASTALIKLI MISIR RİZOSFERLERİNDEKİ DİRENÇ PROFİLLERİNİN İNCELENMESİ

Dr. Suzan ŞAHİN DOĞAN
Karamanoğlu Mehmetbey University, Kamil Özdağ Faculty of Science, Department of Biology, Karaman, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-1554-0080

ÖZET

Rizosfer mikrobiyomu, antibiyotik direnç genleri (ARG'ler) ve metal direnç genleri (MRG'ler) dahil olmak üzere çeşitli direnç belirleyicilerinin önemli bir rezervuarıdır. Bu çalışmanın amacı, sağlıklı ve hastalıklı mısır bitkilerinden elde edilen rizosfer mikrobiyomlarının direnç profillerini karşılaştırmak ve resistom ile bakteriyel taksonlar arasındaki ilişkileri araştırmaktır. ARG'ler ve sınırlı sayıda MRG'ler tanımlanmış; direnç belirleyicileri ile bakteriyel taksonlar arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Genel olarak, hastalık örneklerinde AMR sınıfı bolluğu, karşılık gelen sağlıklı örneklerle karşılaştırıldığında genellikle daha yüksek görülmüştür. En belirgin artışlar, ilaç ve biyosit direnci, çoklu ilaç direnci, rifampin direnci ve MLS direncinde gözlemlenmiştir. Özellikle MAD-D, MA-H' ye kıyasla ilaç ve biyosit direnci ile çoklu ilaç direncinde önemli ölçüde daha yüksek bolluk sergilemiştir. Bunlardan 49 ARG her iki grupta da ortak olarak bulunurken, 33 ARG yalnızca hastalıklı örneklerde tespit edilmiş ve sadece üçü sağlıklı örneklere özgü bulunmuştur. drrA, blaSME, vanK, ermO, far1 ve rrsH dahil olmak üzere birkaç ARG, her iki örnekleme konumunda da hastalıklı rizosferlerde tutarlı bir şekilde zenginleşirken, kasA ve tufAB ise sağlıklı rizosferlerde zenginleşmiştir. Bulgular, sağlıklı ve hastalıklı mısır rizosfer mikrobiyomları arasında ARG profillerinde farklılıklar olduğunu ve bu farklılıkların belirli bakteri taksonlarıyla ilişkili olabileceğini ortaya koymuştur. Sağlıklı ve hastalıklı mısır rizosferlerindeki rezistom profillerinin karşılaştırmalı analizi, rizosferdeki hastalıkla ilişkili değişikliklere dair anlayışımızı geliştirebilir ve sürdürülebilir tarım stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Anahtar kelimeler: Antimikrobiyal direnç, shotgun metagenom, mısır rizosferleri, metal direnç genleri

EXPLORING RESISTOME PROFILES IN HEALTHY AND DISEASED MAIZE RHIZOSPHERES USING SHOTGUN METAGENOMIC DATA

ABSTRACT

The rhizosphere microbiome is an important reservoir of various resistance determinants, including antibiotic resistance genes (ARGs) and metal resistance genes (MRGs). The aim of this study was to compare the resistance profiles of rhizosphere microbiomes from healthy and diseased maize plants and to investigate the relationships among resistome and bacterial taxa. ARGs and limited MRGs were identified; the relationships between resistance determinants and bacterial taxa were evaluated. Overall, AMR class abundance was generally higher in disease samples compared with the corresponding healthy samples. The most pronounced increases were observed for drug-and-biocide resistance, multidrug resistance, rifampin resistance, and MLS resistance. Particularly, MAD-D exhibited substantially higher abundances of drug-and-biocide and multidrug resistance compared with MA-H. Of these, 49 ARGs were shared between the two groups, whereas 33 ARGs were detected exclusively in diseased samples and only three were unique to healthy samples. Several ARGs, including drrA,

blaSME, vanK, ermO, far1, and rrsH, showed consistent enrichment in diseased rhizospheres across both sampling locations, whereas kasA and tufAB were enriched in healthy rhizospheres. The findings revealed differences in ARG profiles between healthy and diseased maize rhizosphere microbiomes and suggested that these differences may be associated with specific bacterial taxa. Comparing ARG profiles between healthy and diseased maize rhizospheres may provide insights into disease-associated changes in the rhizosphere resistome.
Keywords: Antimicrobial resistance, shotgun metagenome, maize rhizospheres, metal resistance genes

1. INTRODUCTION

Antimicrobial resistance (AMR) is an increasing environmental and public health concern, and agricultural soils are recognized as important reservoirs of antibiotic resistance genes (ARGs) (ASLANTAŞ and ŞAHİN DOĞAN, 2026; Sun et al., 2020). The rhizosphere, where plant roots interact closely with diverse microbial communities, provides a dynamic environment for the persistence and dissemination of resistance determinants. Agricultural practices and environmental contaminants may further influence the composition of the rhizosphere resistome (Cernava et al., 2019; Yu et al., 2023).

In addition to antibiotics, heavy metals such as cadmium, copper, zinc, and mercury can exert selective pressure on soil microbial communities and contribute to the persistence of resistance determinants. ARGs and metal resistance genes (MRGs) may be associated through co-resistance, cross-resistance, co-regulation, or their localization on mobile genetic elements. Therefore, interactions between antibiotic and metal resistance determinants are increasingly considered an important component of environmental AMR research (Baker-Austin et al., 2006). Understanding the environmental resistome is important for assessing the potential risks of ARGs to human health. The rhizosphere is a major reservoir of ARGs and can facilitate their horizontal transfer and dissemination into other environments, including the food chain (Chen et al., 2017; Yu et al., 2023)

Despite increasing interest in environmental AMR, the relationship between plant health, rhizosphere microbial communities, ARGs, MRGs, and bacterial taxa remains insufficiently characterized. In particular, comparative analyses of healthy and diseased maize rhizospheres may provide insights into whether plant disease-associated changes in microbial community structure are accompanied by alterations in resistance profiles. A previously published shotgun metagenomic dataset from healthy and diseased maize rhizospheres in South Africa provides an opportunity to investigate these relationships. The dataset includes rhizosphere metagenomes from healthy and diseased maize collected at two locations, Lichtenburg and Mafikeng, and is available under BioProject **PRJNA821718 (Babalola et al., 2022)**. Therefore, this study aimed to profile and compare the antimicrobial resistome of healthy and diseased maize rhizosphere microbiomes using shotgun metagenomic data, with particular emphasis on **ARGs, biocide resistance determinants, MRGs, and their associations with bacterial taxa.**

2. MATERIALS AND METHODS

Publicly available metagenomic data were retrieved from the NCBI under BioProject accession number PRJNA821718 (Babalola et al., 2022). The dataset was originally generated by Babalola et al., who collected rhizosphere soil samples from maize plants in Lichtenburg (25°59′40.2″S, 26°31′44.2″E) and Mafikeng (25°47′19.1″S, 25°37′05.1″E), North West Province, South Africa. At each sampling site, the field was divided into two areas, and samples were collected independently from each area by Babalola et al. Raw sequencing data were first

evaluated for sequence quality using FastQC (Wingett and Andrews, 2018). Adapter sequences and low-quality reads were removed with Trimmomatic (Bolger et al., 2014), and the resulting quality-filtered reads were subsequently used for downstream resistome and taxonomic analyses. Antimicrobial resistance genes (ARGs) were identified using the AMR++ pipeline v3, with the MEGARes v3.0 database used as the reference database for resistome profiling (Bonin et al., 2023). Taxonomic classification of the metagenomic reads was performed using Kraken2 (Wood and Salzberg, 2014). An ARG was considered present when at least 80% of the reference gene sequence was covered, with a minimum sequence identity of 90% and an alignment length of 75 bp. These criteria were applied to enhance the specificity and reliability of ARG detection. To enable comparison among samples, the ARG abundance data obtained from the AMR++ analysis was normalized using the counts per million (CPM) method. Statistical analyses and data visualization were performed in RStudio using R version 4.5.1 and STAMP (Parks et al., 2014). Genus-level relative abundance profiles and ARG-level CPM-normalized abundance profiles were used to investigate potential associations between bacterial genera and antimicrobial resistance genes. Spearman's rank correlation coefficient (ρ) was subsequently calculated for each genus–ARG pair. The correlation matrix was visualized using a ggplot2-based heatmap with a diverging color scale centered at zero, where blue and red represented negative and positive associations, respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The distribution of AMR abundance across resistance classes revealed both shared and sample-specific patterns among the analyzed samples. Aminoglycosides, Rifampin, MLS, Fluoroquinolones, and Aminocoumarins represented the major contributors to the overall AMR abundance across samples. AMR class abundance was generally higher in MAD-D (Mafikeng-disease) and LID-D (Lichtenburg-disease) the groups compared with the corresponding healty groups. The Rifampin resistance showed particularly high abundance in all samples, with the highest level observed in MAD-D, followed by LID-D. Similarly, MLS resistance was highly abundant, with LID-D showing the highest abundance, followed by MAD-D and MA-H. Notably, MAD-D exhibited a pronounced increase in multi-drug resistance compared with the other samples, accompanied by higher abundances of multi-biocide resistance. Several additional resistance classes, including Fluoroquinolones, Cationic antimicrobial peptide resistance, Sulfonamides, and Tetracyclines, also showed variation among samples. Overall, while the major resistance classes were broadly shared among the samples, MAD-D displayed a comparatively higher abundance in several resistance categories, resulting in a more distinct AMR abundance profile (Figure 1a).

The heatmap showed distinct patterns in the abundance of resistance-conferring AMR determinants across healthy and diseased maize rhizosphere samples. Several highly abundant AMR gene groups, including MLS23S, RPOB, TUFAB, RPOCR, GYRA and A16S, were consistently detected across all samples, suggesting that these determinants constitute major components of the maize rhizosphere resistome. In contrast, several lower-abundance AMR gene groups, including SME, AMRB, PARC, TLRCM, TLRC and TET64, displayed marked differences between healthy and diseased rhizosphere samples (Figure 1b). The hierarchical clustering further indicated a distinct resistome structure associated with disease status, with the diseased samples showing greater similarity to each other than to the healthy samples (Figure 1b). A total of 85 distinct ARGs were identified across the healthy and diseased maize rhizosphere samples. Of these, 49 ARGs were shared between the two groups, whereas 33 ARGs were detected exclusively in diseased samples and only three were unique to healthy samples (Figure 1c). The substantially higher number of disease-specific ARGs suggests an

expansion or restructuring of the rhizosphere resistome associated with disease status. Spearman correlation analysis revealed distinct associations between bacterial genera and AMR determinants in the maize rhizosphere. Several genera, including *Streptomyces, Pseudomonas, and Pseudocardia*, exhibited positive correlations with multiple AMR determinants, particularly gyrA, gyrBA, MLS23S, proB, and proCR (Figure 1d). *Streptomyces and Stenotrophomonas* exhibited positive associations with tet64, tlrC, and sme. In contrast, several genus–ARG pairs showed negative associations, indicating differential patterns of resistome distribution across bacterial taxa (Figure 1d).

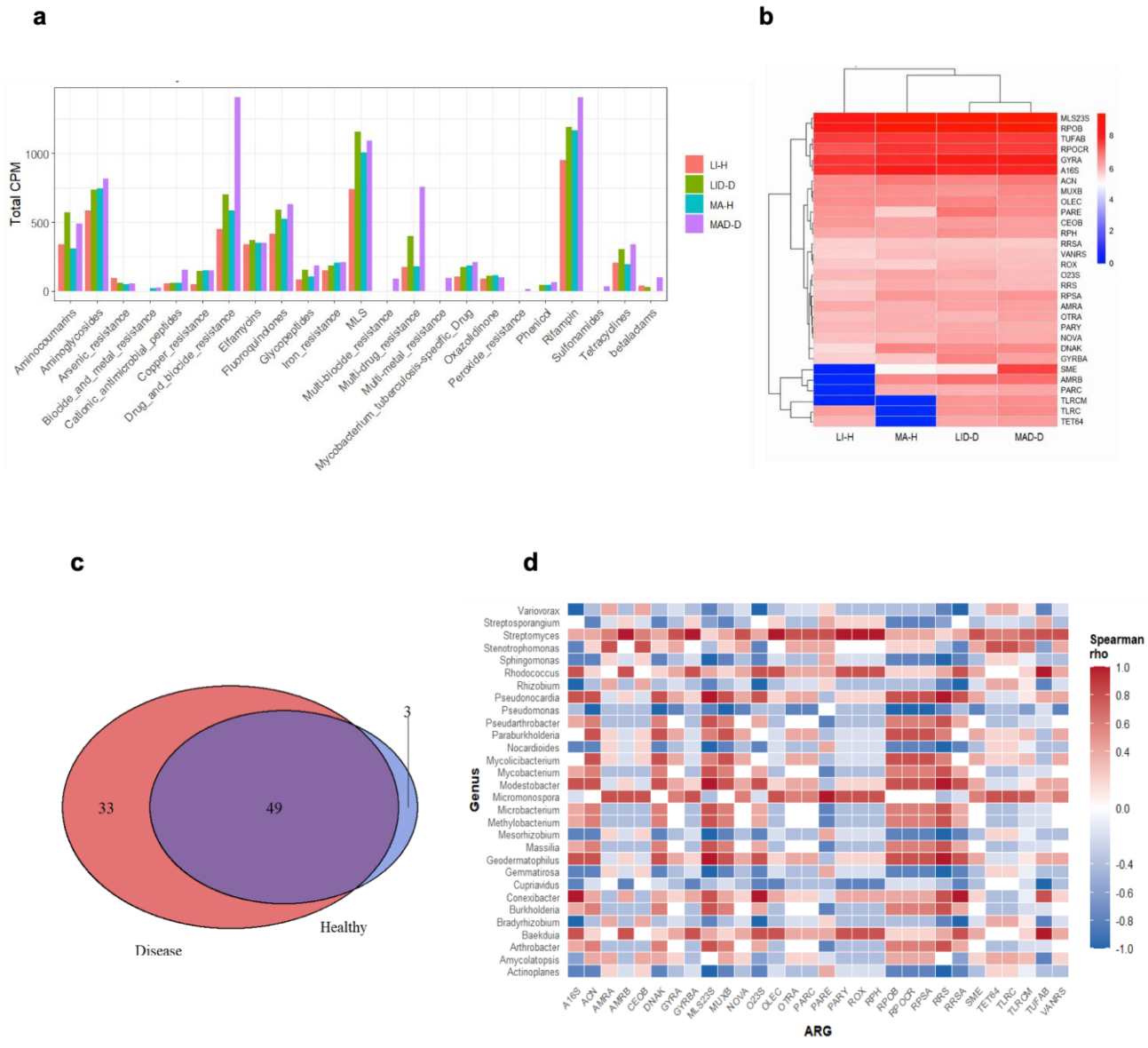


Figure 1. **a**. Class-level resistome abundance across samples **b.** Heatmap illustrating the abundance patterns of the top 30 most abundant ARGs across healthy and diseased maize rhizosphere microbiomes **c.** Venn diagram illustrating the shared and unique resistome identified in healthy and diseased maize rhizosphere microbiomes **e.** The heatmap illustrates Spearman correlation between the 30 most abundant bacterial genera and ARGs across the

analyzed maize rhizosphere samples. Positive correlations were indicated in red, whereas negative correlations are shown in blue.

Several ARGs showed consistent disease-associated enrichment across both maize rhizosphere comparisons. In particular, TLRCM, DRRA, SME, VANK, ERMO, FAR1, and RRSH were enriched in diseased rhizospheres, whereas KASA and TUFAB showed enrichment in healthy rhizospheres. This suggests that disease status may be associated with a reproducible restructuring of the maize rhizosphere resistome rather than a uniform increase or decrease in total ARG abundance (Figure 2a and b).

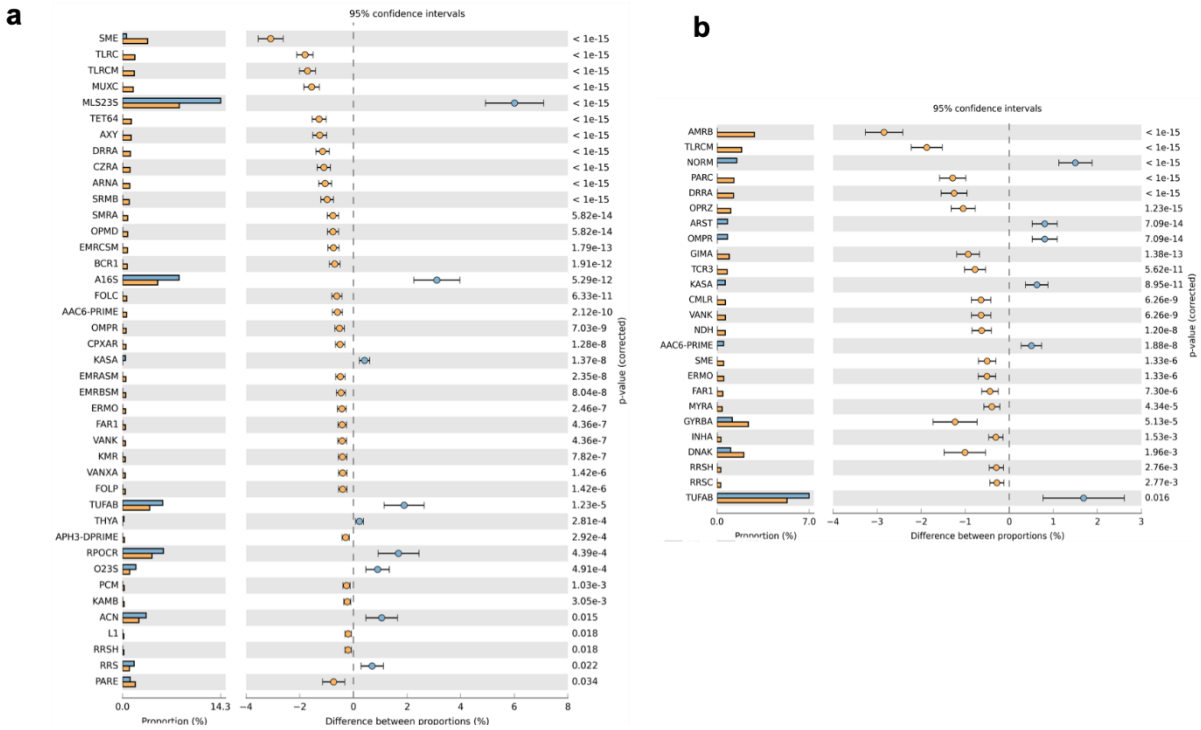


Figure 2. Extended error bar plots comparing resistome profiles between healthy and diseased maize rhizosphere samples: (a) MA-H versus MAD-D and (b) LI-H versus LID-D. Bars indicate the relative proportion (%) of individual resistance gene, with healthy samples shown in blue and diseased samples in orange. Differences between proportions are shown with 95% confidence intervals. Statistical significance was determined using Fisher's exact test with FDR correction ($p < 0.05$).

Plant disease can alter host physiology and root exudation patterns, leading to changes in rhizosphere microbial community structure (Berendsen et al., 2018; Dastogeer et al., 2022; Luo et al., 2022; Wang et al., 2021). Indeed, differences in rhizosphere microbial composition and functional profiles have been reported between healthy and NCLB (northern corn leaf blight)-infected maize plants (Dlamini et al., 2023). Disease-associated microbial shifts may contribute to the differences observed in rhizosphere resistome composition in the present study. Although soil physicochemical properties were not assessed here, they may also represent an important environmental factor influencing microbial and resistome structure. Future studies integrating soil physicochemical characterization with metatranscriptomic analyses could help determine whether disease-associated resistome are actively expressed and clarify how environmental conditions and plant disease status shape the active microbial resistome in the rhizosphere.

4. CONCLUSION

This study revealed clear differences in the resistome profiles of healthy and diseased maize rhizosphere microbiomes. Diseased rhizospheres contained a broader diversity of ARGs, with several genes, including **TLRCM, DRRA, SME, VANK, ERMO, FAR1, and RRSH**, consistently enriched across both sampling locations, while **KASA and TUFAB** were associated with healthy rhizospheres. Correlation analysis also indicated distinct relationships between bacterial taxa and specific resistance determinants. Overall, these findings suggest that maize disease status is associated with a restructuring of the rhizosphere resistome rather than a uniform increase in antimicrobial resistance. Further genomic and metatranscriptomic analyses, together with soil physicochemical characterization, are needed to clarify ARG hosts, potential co-selection, and the activity of disease-associated resistance determinants.

REFERENCES

ASLANTAŞ, Ö., ŞAHİN DOĞAN, S., 2026. Abundance and Diversity of The Faecal Resistome and Microbiome in Broilers. Kafkas Univ. Vet. Fak. Derg.

Babalola, O.O., Dlamini, S.P., Akanmu, A.O., 2022. Shotgun Metagenomic Survey of the Diseased and Healthy Maize (Zea mays L.) Rhizobiomes. Microbiol. Resour. Announc. 11.

Baker-Austin, C., Wright, M.S., Stepanauskas, R., McArthur, J.V., 2006. Co-selection of antibiotic and metal resistance. Trends Microbiol. 14, 176–182.

Berendsen, R.L., Vismans, G., Yu, K., Song, Y., de Jonge, R., Burgman, W.P., Burmølle, M., Herschend, J., Bakker, P.A.H.M., Pieterse, C.M.J., 2018. Disease-induced assemblage of a plant-beneficial bacterial consortium. ISME J. 12, 1496–1507.

Bolger, A.M., Lohse, M., Usadel, B., 2014. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data. Bioinformatics 30, 2114–2120.

Bonin, N., Doster, E., Worley, H., Pinnell, L.J., Bravo, J.E., Ferm, P., Marini, S., Prosperi, M., Noyes, N., Morley, P.S., Boucher, C., 2023. MEGARes and AMR++, v3.0: an updated comprehensive database of antimicrobial resistance determinants and an improved software pipeline for classification using high-throughput sequencing. Nucleic Acids Res. 51, D744–D752.

Cernava, T., Erlacher, A., Soh, J., Sensen, C.W., Grube, M., Berg, G., 2019. Enterobacteriaceae dominate the core microbiome and contribute to the resistome of arugula (Eruca sativa Mill.). Microbiome 7, 13.

Chen, Q.-L., An, X.-L., Zhu, Y.-G., Su, J.-Q., Gillings, M.R., Ye, Z.-L., Cui, L., 2017. Application of Struvite Alters the Antibiotic Resistome in Soil, Rhizosphere, and Phyllosphere. Environ. Sci. Technol. 51, 8149–8157.

Dastogeer, K.M.G., Yasuda, M., Okazaki, S., 2022. Microbiome and pathobiome analyses reveal changes in community structure by foliar pathogen infection in rice. Front. Microbiol. 13.

Dlamini, S.P., Akanmu, A.O., Fadiji, A.E., Babalola, O.O., 2023. Maize rhizosphere modulates the microbiome diversity and community structure to enhance plant health. Saudi J. Biol. Sci. 30, 103499.

Luo, L., Zhang, J., Ye, C., Li, S., Duan, S., Wang, Z., Huang, H., Liu, Y., Deng, W., Mei, X., He, X., Yang, M., Zhu, S., 2022. Foliar Pathogen Infection Manipulates Soil Health through Root Exudate-Modified Rhizosphere Microbiome. Microbiol. Spectr. 10.

Parks, D.H., Tyson, G.W., Hugenholtz, P., Beiko, R.G., 2014. STAMP: statistical analysis of taxonomic and functional profiles. Bioinformatics 30, 3123–3124.

Sun, J., Jin, L., He, T., Wei, Z., Liu, X., Zhu, L., Li, X., 2020. Antibiotic resistance genes (ARGs) in agricultural soils from the Yangtze River Delta, China. Sci. Total Environ. 740, 140001.

Wang, Q., Yang, R., Peng, W., Yang, Y., Ma, X., Zhang, W., Ji, A., Liu, L., Liu, P., Yan, L., Hu, X., 2021. Tea Plants With Gray Blight Have Altered Root Exudates That Recruit a Beneficial Rhizosphere Microbiome to Prime Immunity Against Aboveground Pathogen Infection. Front. Microbiol. 12.

Wingett, S.W., Andrews, S., 2018. FastQ Screen: A tool for multi-genome mapping and quality control. F1000Research 7, 1338.

Wood, D.E., Salzberg, S.L., 2014. Kraken: ultrafast metagenomic sequence classification using exact alignments. Genome Biol. 15, R46.

Yu, Y., Zhang, Q., Zhang, Z., Zhou, S., Jin, M., Zhu, D., Yang, X., Qian, H., Lu, T., 2023. Plants select antibiotic resistome in rhizosphere in early stage. Sci. Total Environ. 858, 159847.

BRAF KİNAZA KARŞI 8-HİDROKSİKİNOLİN SCHIFF BAZI OLAN HQM'NİN MOLEKÜLER KENETLENME VE IN SILICO ADME PROFİLLEMESİ

Dr. Suzan ŞAHİN DOĞAN
Karamanoglu Mehmetbey University, Kamil Özdağ Faculty of Science, Department of Biology, Karaman, Turkiye
ORCID ID: 0000-0002-1554-0080
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇİÇEK
Karamanoglu Mehmetbey University, Kamil Özdağ Faculty of Science, Department of Biology, Karaman, Turkiye
ORCID ID: 0000-0002-7109-6500
Doç. Dr. Duygu AYDIN
Karamanoglu Mehmetbey University, Kamil Özdağ Faculty of Science, Departman of Chemistry, Karaman, Turkiye
ORCID ID: 0000-0003-0436-1869
Dr. Öğr. Üyesi. Meliha Kutluca Alıcı
Niğde Ömer Halisdemir University, Bor Vocational School Department of Veterinary Medicine, Laboratory Technician and Veterinary Health Program, 51240 Niğde, Turkiye
ORCID ID: 0000-0002-6302-3416
Doç. Dr. Aytaç KOCABAŞ
Karamanoglu Mehmetbey University, Kamil Özdağ Faculty of Science, Department of Biology, Karaman, Turkiye
ORCID ID: 0000-0001-7622-1932

Özet
Bu çalışmada, daha önce floresan sensör HQM olarak bildirilen, 8-hidroksikinolin türevi bir Schiff baz olan HQM'nin BRAF kinaz etki alanına öngörülen bağlanması araştırılmış ve bunun in silico ADME profili değerlendirilmiştir. R509H ikamesi içeren vemurafenib bağlı BRAF yapısının B zincirine karşı, HQM için 30 ve vemurafenib için 50 deneme kullanılarak kör kenetlenme gerçekleştirilmiştir. Pozlar, kenetlenme enerjileri ve referans ligand merkezinden bildirilen mesafeler kullanılarak değerlendirilmiştir. HQM enerjileri −8,92 ile −5,95 kcal/mol arasında değişmiştir. En düşük enerjili poz olan 8. denemede, tahmini inhibisyon sabiti 0,29 µM olarak hesaplanmıştır. Rapor edilen merkez uzaklığı en küçük olan (0,195 Å) 26. deneme, etkileşim analizi için seçilmiş olup, −8,10 kcal/mol enerji ve 1,15 µM tahmini inhibisyon sabiti göstermiştir. Etkileşim profili, Lys483 ve Asp594'ü içeren üç hidrojen bağı teması, Trp531 ve Phe583 ile aromatik temaslar ve Lys483'ü içeren elverişsiz bir donör-donör temasını içeriyordu. Seçilen vemurafenib pozunun enerjisi −10,03 kcal/mol ve merkez noktası mesafesi 1,362 Å idi. SwissADME, yüksek gastrointestinal emilim, kan-beyin bariyerinden geçiş olmaması ve beş ilaç benzeri özellik filtresine uygunluk öngördü. Bununla birlikte, CYP1A2 ve CYP3A4 inhibisyonu ile iki Brenk yapısal uyarısı öngörüldü. Bu sonuçlar, vemurafenib ile ilişkili cep içinde HQM'nin uyum sağladığına dair test edilebilir bir hipotezi desteklemektedir. Merkez noktasına yakınlık, atom düzeyinde poz doğruluğunu garanti etmez ve kenetlenme yoluyla elde edilen inhibisyon sabitleri, biyokimyasal inhibisyonu kanıtlamaz. Daha fazla poz doğrulaması, kinaz analizleri ve deneysel ADME değerlendirmesi gereklidir.
Anahtar kelimeler: HQM, Schiff bazı, BRAF, moleküler kenetlenme, SwissADME

MOLECULAR DOCKING AND IN SILICO ADME PROFILING OF HQM, AN 8-HYDROXYQUINOLINE SCHIFF BASE, AGAINST BRAF KINASE

Abstract

This study explored the predicted binding of HQM, an 8-hydroxyquinoline-derived Schiff base previously reported as the fluorescent sensor, to the BRAF kinase domain and assessed its in silico ADME profile. Blind docking was performed against chain B of the vemurafenib-bound BRAF structure containing the R509H substitution (PDB ID: 4RZV), using 30 runs for HQM and 50 runs for vemurafenib. Poses were evaluated using docking energies and reported distances from the reference ligand centroid. HQM energies ranged from −8.92 to −5.95 kcal/mol. The lowest-energy pose, Run 8, had an estimated inhibition constant of 0.29 μM. Run 26, selected for interaction analysis because it had the smallest reported centroid distance (0.195 Å), showed an energy of −8.10 kcal/mol and an estimated inhibition constant of 1.15 μM. Its interaction profile included three hydrogen-bond contacts involving Lys483 and Asp594, aromatic contacts with Trp531 and Phe583, and an unfavorable donor–donor contact involving Lys483. The selected vemurafenib pose had an energy of −10.03 kcal/mol and a centroid distance of 1.362 Å. SwissADME predicted high gastrointestinal absorption, no blood–brain barrier permeation, and compliance with five drug-likeness filters. However, CYP1A2 and CYP3A4 inhibition and two Brenk structural alerts were predicted. These results support a testable hypothesis of HQM accommodation within the vemurafenib-associated pocket. Centroid proximity does not establish atom-level pose accuracy, and docking-derived inhibition constants do not demonstrate biochemical inhibition. Further pose validation, kinase assays, and experimental ADME evaluation are required.

Keywords: Molecular docking; BRAF; Schiff base; Molecular interactions; ADME.

1. Introduction

BRAF is a serine/threonine kinase whose signaling behavior has motivated extensive investigation of small-molecule inhibitors. The biological effects of RAF inhibitors depend on receptor conformation and cellular context, including RAF dimerization. Accordingly, the structural accommodation of a compound within a BRAF pocket is an initial mechanistic observation that requires functional follow-up before an inhibitory or anticancer effect can be assigned (Karoulia et al., 2016).

HQM, 2-amino-3-(((E)-(8-hydroxyquinolin-7-yl)methylene)amino)maleonitrile, contains an 8-hydroxyquinoline scaffold linked to an aminomaleonitrile moiety through an imine group. The same compound was previously described as a study of selective fluorescence-based Cd^{2+} detection (Kutluca, 2025). That work established a synthetic route and spectroscopic characterization, providing a chemical basis for investigating additional molecular interactions. The earlier sensing application does not itself establish BRAF binding or enzyme inhibition.

Blind docking explores ligand placement without restricting the initial search to a preselected binding pocket. A crystallographic ligand can subsequently provide a spatial reference for interpreting the resulting poses. This distinction is important: identifying a pose close to a known ligand site after docking does not make the original search site-directed, but it introduces a reference-dependent selection step. Furthermore, scoring performance and pose recovery are separate issues in docking assessment (Warren et al., 2006).

The present study therefore examined HQM by blind docking against chain B of PDB entry 4RZV, with vemurafenib as the crystallographic reference ligand. The objectives were to describe the distribution of docking scores, distinguish the minimum-energy pose from the pose selected for interaction analysis, characterize predicted receptor contacts, and assess physicochemical and ADME properties using SwissADME (Daina et al., 2017).

2. Materials and Methods

2.1. Compound identity and previously reported synthesis

HQM has the molecular formula $C_{14}H_9N_5O$ and a calculated molecular weight of 263.25 g/mol. In the previously published synthesis, 8-hydroxyquinoline-7-carbaldehyde was reacted with diaminomaleonitrile in ethanol for 24 h. The resulting precipitate was isolated and washed with anhydrous ethanol, giving a reported yield of 59%. The compound was characterized by FT-IR, NMR, and mass spectrometry (Kutluca, 2025). These synthesis and characterization results are cited as prior work; the present investigation concerns computational binding and ADME assessment.

2.2. Receptor and ligand preparation

Chain B of the human BRAF kinase-domain structure 4RZV was used as the receptor. This X-ray structure was determined at 2.99 Å resolution and is described as the BRAF R509H kinase-domain monomer bound to vemurafenib, ligand code 032 (Karoulia et al., 2016; Wu et al., 2016). The receptor is an engineered crystallographic construct; its results should not be generalized directly to full-length wild-type BRAF or other BRAF variants. HQM and vemurafenib were represented in pdbqt format. The HQM pdbqt file contains explicit polar hydrogens, atomic partial charges, atom types, and four active torsions.

Receptor and ligand preparation was performed using UCSF ChimeraX (Pettersen et al., 2021) and AutoDockTools 4.2.6 (Morris et al., 2009); protonation states were assigned at physiological pH (pH 7.4) and standard tautomers were verified; Gasteiger partial atomic charges were added to the systems; crystallographic water molecules and heteroatoms were removed, and the native ligand was extracted; ligand geometry was optimized; and the receptor was treated as rigid while the ligand was kept fully flexible during the docking process.

2.3. Blind docking and selection of representative poses

Blind docking was conducted using AutoDock 4 (via AutoDockTools 4.2.6) with the Lamarckian Genetic Algorithm (LGA); the grid box was configured to cover the entire macromolecule (blind docking) with a grid spacing of 0.5 Å, grid center coordinates encompassing the global structure (x, y, z dimensions set accordingly). The search was not restricted in advance to the crystallographic vemurafenib pocket. Thirty docking runs were performed for HQM and fifty for vemurafenib. Each run was summarized by a docking-derived binding energy in kcal/mol, an estimated inhibition constant in μM, and a reported reference-centroid distance in Å.

The lowest-energy pose and the pose with the smallest reference-centroid distance were considered separately. Vemurafenib Run 1 and HQM Run 26 were selected by the centroid criterion for spatial interpretation; HQM Run 26 was used for the detailed interaction analysis. This selection was made after the blind search and did not represent a claim that these poses had the minimum docking energy. Reference-centroid distances describe ligand-center proximity and were not treated as heavy-atom root-mean-square deviations (RMSDs). The centroid reference and atom-selection convention were calculated using a custom Python script, utilizing specific reference coordinates of active-site residues and standard atom-selection conventions (such as alpha-carbons or center of mass) for distance and spatial relationship analyses (Python Software Foundation, 2023).

2.4. Interaction analysis and descriptive summaries

The selected HQM complex was examined using the molecular interaction diagrams and the corresponding non-bonded contact export. Interaction visualization and contact assignment were performed in Discovery Studio Visualizer (Dassault Systèmes BIOVIA, 2021) with default contact-detection parameters for identifying hydrogen bonds, hydrophobic interactions, and electrostatic contacts. Hydrogen-bond contact distances were read as hydrogen-to-acceptor distances, following the explicitly named atoms in the export. The three reported distances were independently checked against the selected complex coordinates. Aromatic and hydrophobic interaction distances were retained according to the visualization software's geometric definitions.

Energy ranges and arithmetic means were calculated across all reported runs. Standard deviations describe variability among computational runs rather than experimental uncertainty. As an additional descriptive summary, poses with reported centroid distances of 3 Å or less were counted after docking; this cutoff was not a pose-validation threshold or a clustering criterion. No inferential comparison of the two ligands was performed because the search sizes differed and docking runs were not biological replicates.

2.5. Physicochemical and ADME prediction

SwissADME was used to evaluate the molecular structure represented by the SMILES string N#C/C(=C(\C#N)/N)/N=C/c1ccc2c(c1O)nccc2 (Daina et al., 2017). Outputs included molecular descriptors, lipophilicity, solubility, gastrointestinal absorption, blood–brain barrier permeation, P-glycoprotein substrate status, cytochrome P450 inhibition predictions, drug-likeness filters, and medicinal chemistry alerts. These outputs were interpreted as computational predictions. The bioavailability score was not interpreted as a measured percentage of systemic bioavailability.

3. Results

3.1. Blind docking scores and reference-ligand localization

Across the 30 HQM runs, binding energies ranged from −8.92 to −5.95 kcal/mol, with a mean ± standard deviation of −8.04 ± 0.80 kcal/mol. Run 8 produced the minimum energy of −8.92 kcal/mol, an estimated K_i of 0.29 µM, and a reference-centroid distance of 1.436 Å. In contrast, Run 26 had the smallest centroid distance, 0.195 Å, but an energy of −8.10 kcal/mol and an estimated K_i of 1.15 µM. The selected pose was therefore 0.82 kcal/mol less favorable by the scoring function than the minimum-energy pose (Table 1).

For vemurafenib, 50 runs yielded energies from −10.66 to −5.25 kcal/mol, with a mean ± standard deviation of −7.79 ± 1.37 kcal/mol. The selected Run 1 had an energy of −10.03 kcal/mol, an estimated K_i of 0.04 µM, and a centroid distance of 1.362 Å. Run 9 was the energy minimum at −10.66 kcal/mol, with an estimated K_i of 0.02 µM and a centroid distance of 1.865 Å.

Table 1. Summary of blind docking results and the distinction between selected and minimum-energy poses.

Metric	HQM	Vemurafenib
Number of runs	30	50
Energy range (kcal/mol)	−8.92 to −5.95	−10.66 to −5.25
Mean ± SD (kcal/mol)	−8.04 ± 0.80	−7.79 ± 1.37
Minimum-energy run	8	9
Minimum energy (kcal/mol)	−8.92	−10.66
K_i of minimum-energy run (μM)	0.29	0.02
Centroid distance of minimum-energy run (Å)	1.436	1.865
Selected run	26	1
Selected-pose energy (kcal/mol)	−8.10	−10.03
Selected-pose estimated K_i (μM)	1.15	0.04
Selected-pose centroid distance (Å)	0.195	1.362
Runs with centroid distance ≤3 Å	22/30 (73.3%)	9/50 (18.0%)

K_i values are docking-derived estimates, rounded as in the run reports. SD describes variation among docking runs. The ≤3 Å summary is descriptive and is not an RMSD criterion.

The joint distributions of energy and reference-centroid distance are shown in Figure 1. Twenty-two of 30 HQM poses (73.3%) and nine of 50 vemurafenib poses (18.0%) had reported distances of 3 Å or less. These counts describe spatial localization relative to the reference center, rather than a formally defined conformational cluster or a probability of binding. Poses were also found farther from the reference center, with maximum distances of 22.652 Å for HQM and 30.610 Å for vemurafenib.

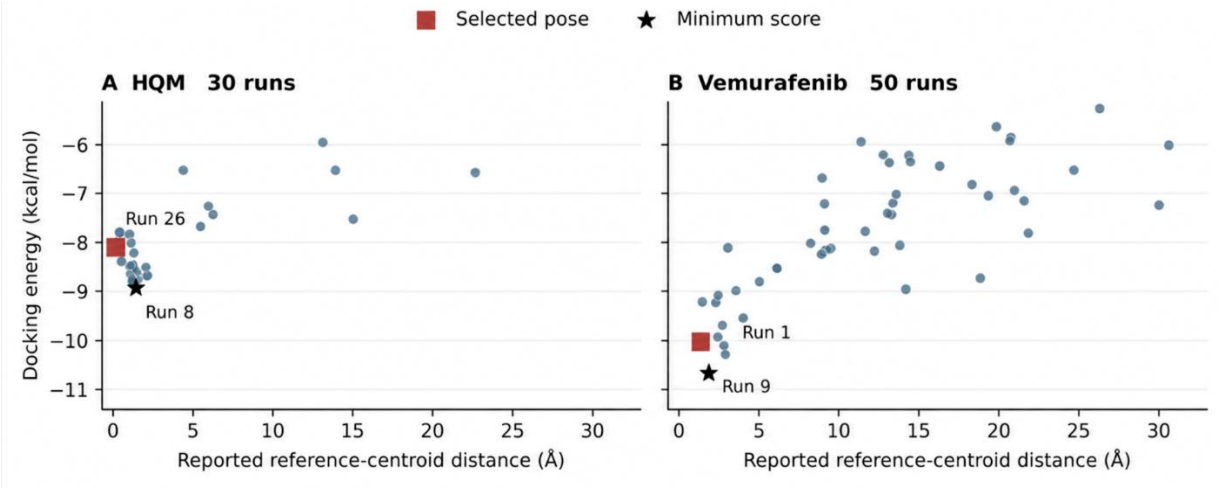


Figure 1. Docking energy versus reported reference-centroid distance for HQM (A) and vemurafenib (B). Each point represents one run. Red squares identify the poses selected by the centroid criterion; black stars identify the minimum-energy poses. Distances are reference-centroid distances, not atom-level RMSDs. The unequal run counts should be considered when comparing the panels.

3.2. Predicted contacts of the selected HQM pose

The interaction export identified three conventional hydrogen-bond contacts in HQM Run 26 (**Table 2**). Two involved Lys483 hydrogen atoms HN and HZ2 interacting with ligand nitrogen atoms at 2.731 and 2.755 Å, respectively. A ligand hydrogen contacted Asp594 OD1 at 2.215 Å. These hydrogen-to-acceptor distances were reproduced from the selected complex coordinates to the reported precision.

Additional contacts included π–π stacking assignments involving Trp531 and Phe583, a π–sulfur contact with Cys532, and π–alkyl contacts with Ala481, Cys532, and Ile463. The two stacking entries for each aromatic residue represent separate geometric contacts in the export, not four different interacting residues. The two-dimensional diagram also marked an unfavorable donor–donor contact involving Lys483 and the ligand amino region (**Figure 2**). This contact was absent from the tabulated favorable-contact export and was therefore retained as a qualitative observation without assigning an unreported distance.

Table 2. Non-bonded contacts assigned to HQM Run 26 in BRAF chain B.

Interaction	Residue or atom	Reported distance (Å)
Conventional hydrogen bond	Lys483 HN → ligand N	2.731
Conventional hydrogen bond	Lys483 HZ2 → ligand N	2.755
Conventional hydrogen bond	Ligand H → Asp594 OD1	2.215
π–sulfur	Cys532 SG	5.495
π–π stacked	Trp531	5.651; 4.975
π–π stacked	Phe583	3.993; 4.167
π–alkyl	Ala481	4.040
π–alkyl	Cys532	4.754
π–alkyl	Ile463	5.328
Unfavorable donor–donor	Lys483 and ligand amino region	Not tabulated; diagram annotation

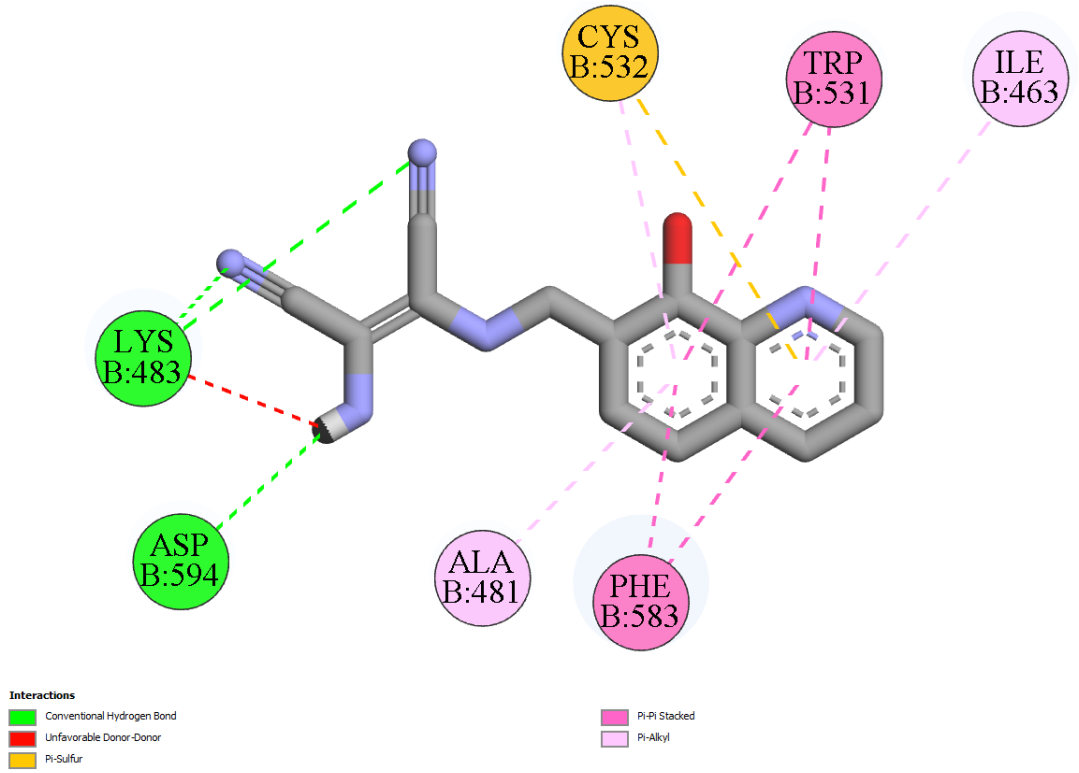


Figure 2. Interaction diagram of HQM Run 26 with BRAF chain B. Green dashed lines denote conventional hydrogen-bond contacts; magenta, light pink, and yellow lines denote π–π, π–alkyl, and π–sulfur assignments, respectively. The red dashed line marks an unfavorable donor–donor contact involving Lys483. The diagram describes a predicted static pose and does not establish persistence of these contacts during molecular motion.

The hydrogen-bond donor/acceptor surface representation provided spatial context for the polar contacts identified in the selected HQM–BRAF complex (**Figure 3A**). The donor and acceptor regions visualized around the docked ligand were consistent with a binding environment accommodating the hydrogen-bond contacts listed in Table 2, including donation from Lys483 to ligand nitrogen atoms and from a ligand hydrogen to Asp594. However, the unfavorable donor–donor contact involving Lys483, also visible in the interaction diagrams, indicated that polar complementarity was not uniform throughout the selected pose. The surface visualization therefore supports a qualitative interpretation of the contact geometry rather than an independent measure of interaction strength.

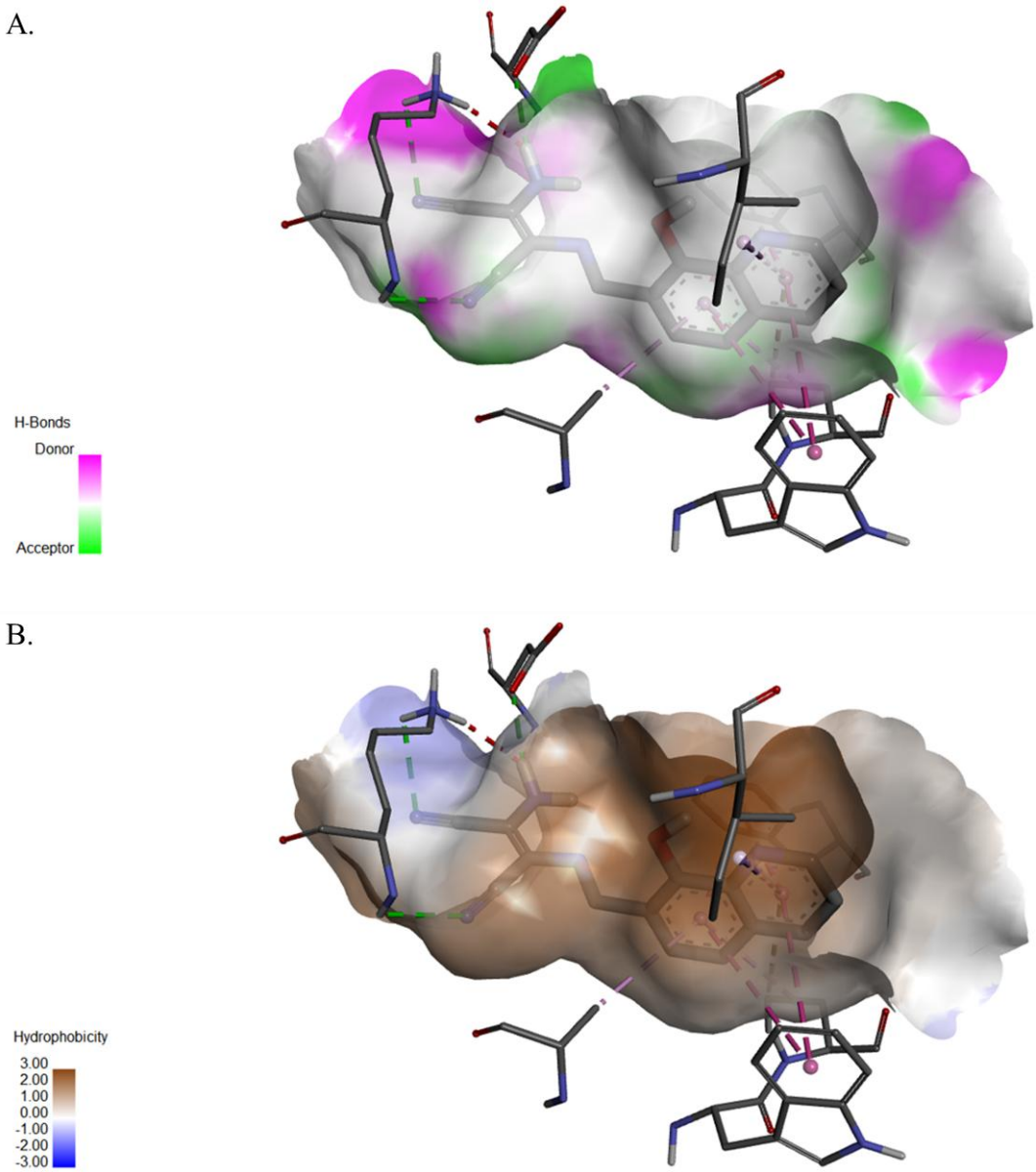


Figure 3. Hydrogen-bonding and hydrophobic surface representations of the selected HQM–BRAF docking pose. (A) Hydrogen-bond donor/acceptor surface, with magenta and green indicating donor and acceptor regions, respectively. (B) Hydrophobicity surface, with brown indicating more hydrophobic regions and blue indicating more hydrophilic regions, according to the displayed scale. HQM and neighboring receptor residues are shown as sticks, and dashed

lines indicate software-assigned non-bonded contacts. The red dashed contact denotes an unfavorable donor–donor interaction involving Lys483. Both panels depict the selected Run 26 pose in chain B of PDB entry 4RZV and provide qualitative surface information rather than quantitative interaction energies.

The hydrophobicity representation showed that the aromatic portion of HQM occupied a region containing hydrophobic surface patches (**Figure 3B**). This distribution was consistent with the π–π contacts assigned to Trp531 and Phe583 and the π–alkyl contacts involving Ala481, Cys532, and Ile463 (Table 2). Together, the two surface views suggest that the selected pose accommodates both polar contacts and aromatic or hydrophobic interactions within the same binding environment. These observations provide a structural rationale for the predicted placement of HQM, but the surface colors and contact assignments do not quantify energetic contributions or establish the stability of the complex under dynamic conditions.

The structural comparison placed HQM and reference ligand vemurafenib in an overlapping region of the receptor (**Figure 4**). This spatial overlap, together with the contact pattern, is consistent with accommodation in the vemurafenib-associated pocket. It does not demonstrate identical atomic placement, competitive inhibition, or a shared pharmacological mechanism.

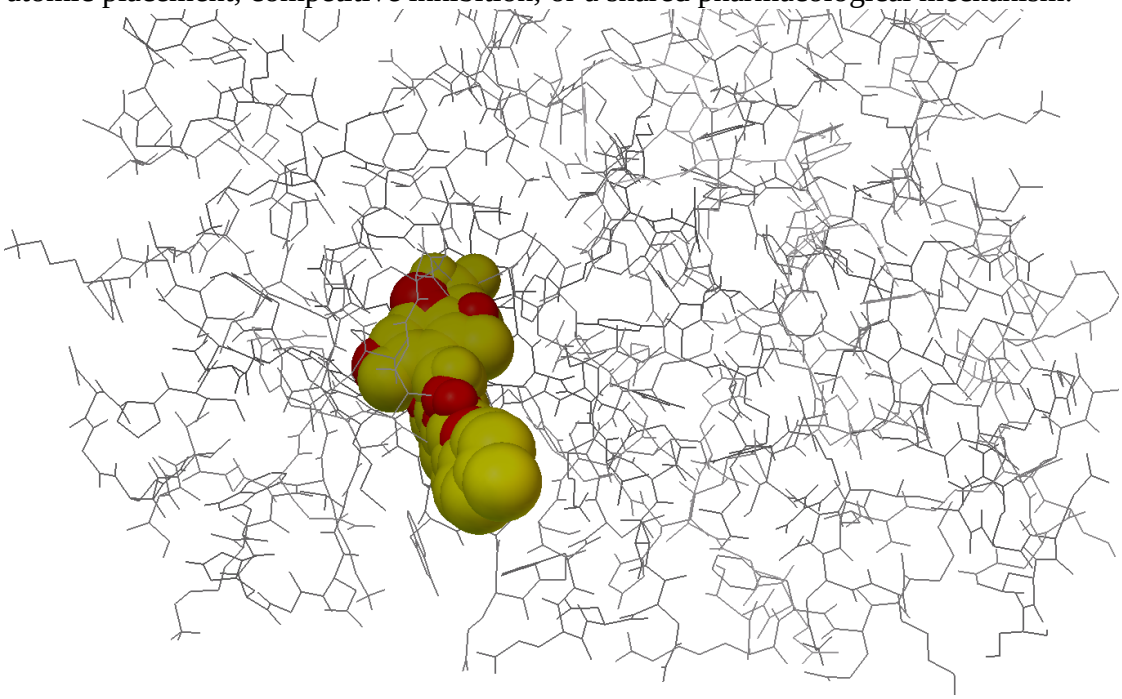


Figure 4. Spatial comparison of HQM (red) and reference ligand vemurafenib (yellow) within the receptor shown in gray.

3.3 Predicted physicochemical and ADME profile

HQM had five hydrogen-bond acceptors, two donors, two rotatable bonds by the SwissADME descriptor definition, and a topological polar surface area of 119.08 $Å^2$. Its fraction of sp^3 carbon atoms was 0.00. The five lipophilicity estimates ranged from −1.09 to 1.58, with a consensus logP of 0.88. ESOL, Ali, and SILICOS-IT each classified HQM as soluble, predicting concentrations of 1.41, 0.279, and 0.197 mg/mL, respectively (**Table 3**).

High gastrointestinal absorption, no blood–brain barrier permeation, and non-substrate status for P-glycoprotein were predicted. HQM was predicted to inhibit CYP1A2 and CYP3A4, but not CYP2C19, CYP2C9, or CYP2D6. All five evaluated drug-likeness filters were satisfied, including Lipinski's rule with zero violations. No PAINS alerts were identified, whereas two Brenk alerts concerned the conjugated nitrile and imine groups. Lead-likeness was satisfied, the bioavailability score was 0.55, and the synthetic accessibility score was 2.66.

Table 3. Selected SwissADME outputs for HQM.

Property	Prediction or descriptor
Molecular formula; molecular weight	$C_{14}H_9N_5O$; 263.25 g/mol
Hydrogen-bond acceptors / donors	5 / 2
Rotatable bonds; fraction Csp^3	2; 0.00
Topological polar surface area	119.08 $Å^2$
iLOGP1.5; XLOGP3; WLOGP	1.48; 0.89; 1.58
MLOGP; SILICOS-IT logP; consensus logP	−1.09; 1.54; 0.88
ESOL logS; predicted solubility	−2.27; 1.41 mg/mL
Ali logS; predicted solubility	−2.98; 0.279 mg/mL
SILICOS-IT logS; predicted solubility	−3.12; 0.197 mg/mL
Gastrointestinal absorption	High
Blood–brain barrier permeation	No
P-glycoprotein substrate	No
Predicted CYP inhibition	CYP1A2 and CYP3A4: yes; CYP2C19, CYP2C9 and CYP2D6: no
Lipinski; Ghose; Veber; Egan; Muegge	All satisfied; zero Lipinski violations
Bioavailability score	0.55
PAINS; Brenk alerts	0; 2 (conjugated nitrile and imine)
Lead-likeness; synthetic accessibility	Yes; 2.66
Skin permeation logKp (Kp in cm/s)	−7.27

4. Discussion

The principal finding is that a blind search generated HQM poses near the vemurafenib-associated region of BRAF, including both the lowest-energy pose and the pose chosen by centroid proximity. Because the pocket was considered during interpretation rather than used to define a restricted initial search, the workflow supports a site-localization hypothesis. However, choosing the nearest pose after docking inherently favors agreement with the reference location. The near-zero centroid distance of Run 26 should therefore not be presented as independent evidence of exceptional binding accuracy.

The distinction between Run 8 and Run 26 changes how the results should be described. The −8.92 kcal/mol score and 0.29 μM estimated K_i belong to Run 8, whereas the detailed interaction diagram belongs to Run 26, which scored −8.10 kcal/mol. The score and contact pattern of each pose therefore require separate interpretation. Likewise, the reference ligand's selected Run 1 was not its minimum-energy pose. Both selected-pose and minimum-energy comparisons favored vemurafenib energetically: the corresponding differences were 1.93 and 1.74 kcal/mol, respectively. These scoring differences do not establish a quantitative difference in experimental potency.

The cross-run mean energy for HQM was somewhat more negative than the corresponding vemurafenib mean, but this does not reverse the interpretation of the selected or minimum-energy poses. The means summarize different sampled distributions, including poses outside the reference region, with unequal numbers of runs. They are not estimates of a thermodynamic ensemble average or a valid basis for claiming that HQM binds more strongly than vemurafenib. Benchmarking has shown that generating plausible poses and accurately ranking affinity are distinct challenges for docking methods (Warren et al., 2006).

The Run 26 contact pattern offers specific hypotheses for experimental and computational follow-up. Hydrogen-bond contacts involving Lys483 and Asp594, together with the aromatic contacts, provide a plausible geometrical basis for pocket accommodation. Nevertheless, the unfavorable donor–donor annotation indicates that the model should not be described as uniformly complementary. Protonation, atom typing, ligand geometry, and local relaxation should be examined before interpreting individual contacts as persistent stabilizing interactions. The four active torsions recorded in the docking file and the two SwissADME rotatable bonds reflect different descriptor definitions.

The reference-ligand exercise is best regarded as evidence of regional localization. A small centroid distance can occur even when a ligand is rotated or adopts a different conformation. A heavy-atom RMSD analysis with an explicit atom mapping against the crystal ligand is needed to assess vemurafenib pose recovery. For chemically distinct HQM and vemurafenib, centroid proximity provides a spatial comparison but cannot substitute for such a validation. The engineered receptor construct also limits biological generalization; RAF inhibitor responses depend on conformational and dimerization context (Karoulia et al., 2016).

The ADME predictions identify both favorable descriptors and potential liabilities. Low molecular weight, predicted solubility, and compliance with drug-likeness filters make experimental evaluation reasonable, but do not demonstrate oral exposure. The zero sp^3-carbon fraction reflects the extensively unsaturated scaffold and is not captured by a simple statement that all drug-likeness filters were passed. The CYP1A2 and CYP3A4 inhibition predictions warrant enzyme-inhibition testing, while the Brenk alerts motivate evaluation of chemical stability and nonspecific reactivity. Absence of PAINS alerts does not establish selectivity or safety.

Experimental priorities include a biochemical BRAF activity assay with concentration–response analysis, an orthogonal binding assay, and controls for assay interference. Because HQM was originally developed as a fluorescent sensor, controls should test whether its optical properties affect any chosen assay readout (Kutluca, 2025). Computational follow-up should compare multiple plausible poses and receptor conformations and assess contact persistence, while measured solubility, stability, permeability, and CYP inhibition would test the ADME predictions. None of these outcomes can be inferred solely from the current docking scores.

5. Conclusion

Blind docking supports a preliminary hypothesis that HQM can occupy the vemurafenib-associated pocket of the BRAF kinase-domain construct 4RZV. HQM Run 8 provided the lowest docking energy, whereas Run 26 was selected for its proximity to the reference centroid and displayed a mixed pattern of favorable contacts and an unfavorable donor–donor interaction. The SwissADME profile combined drug-likeness filter compliance with predicted CYP inhibition and structural alerts. These findings justify targeted validation, but do not establish BRAF inhibition, anticancer efficacy, or drug suitability.

References

Daina A, Michielin O, Zoete V. SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. Scientific Reports. 2017;7:42717. https://doi.org/10.1038/srep42717

Dassault Systèmes BIOVIA. (2021). Discovery Studio Visualizer (Release 2021) [Computer software]. Dassault Systèmes.

Karoulia Z, Wu Y, Ahmed TA, et al. An integrated model of RAF inhibitor action predicts inhibitor activity against oncogenic BRAF signaling. Cancer Cell. 2016;30(3):485–498. https://doi.org/10.1016/j.ccell.2016.06.024

Kutluca Alici M. 8-Hydroxyquinoline based novel fluorogenic sensor for Sensitive and selective Cd^{2+} detection and its Applications: Soil, Foodstuffs, smartphone and living cell. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2025;464:116336. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2025.116336

Morris, G. M., Huey, R., Lindstrom, W., Sanner, M. F., Belew, R. K., Goodsell, D. S., & Olson, A. J. (2009). AutoDock4 and AutoDockTools4: Automated docking with selective receptor flexibility. Journal of Computational Chemistry, 30(16), 2785–2791. https://doi.org/10.1002/jcc.21256

Pettersen, E. F., Goddard, T. D., Huang, C. C., Meng, E. C., Couch, G. S., Croll, T. I., Morris, J. H., & Ferrin, T. E. (2021). UCSF ChimeraX: Structure visualization for researchers, educators, and developers. Protein Science, 30(1), 70–82. https://doi.org/10.1002/pro.3943

Python Software Foundation. (2023). Python Language Reference (Version 3.10) [Computer software]. https://www.python.org/

Warren GL, Andrews CW, Capelli AM, et al. A critical assessment of docking programs and scoring functions. Journal of Medicinal Chemistry. 2006;49(20):5912–5931. https://doi.org/10.1021/jm050362n

Wu Y, Gavathiotis E. Crystal structure of the BRAF (R509H) kinase domain monomer bound to vemurafenib. Protein Data Bank entry 4RZV. Released 2016. https://doi.org/10.2210/pdb4RZV/pdb

COĞRAFİ İŞARETLİ GIDA ÜRÜNLERİNE YÖNELİK TÜKETİCİ TUTUMLARI: AHLAT ÖRNEĞİ

Yüksek Lisans Öğrencisi Büşra Nur YORULMAZ GÜLER
Van Yüzüncü Yıl University, Graduate School of Social Sciences, Department of Gastronomy and Culinary Arts, 65090 Tuşba, Van
ORCID ID: *0009-0009-4097-4938*
Dr. Öğr. Üyesi Erol GEÇGİN
Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Tourism, Department of Gastronomy and Culinary Arts, 65090 Tuşba, Van
ORCID ID: *0000-00001-8375-9343*

ÖZET
Bu araştırmanın amacı, Bitlis ili Ahlat ilçesinde yaşayan tüketicilerin coğrafi işaretli gıda ürünlerine yönelik tutumlarını belirlemek ve bu tutumların demografik değişkenlere göre farklılık gösterip göstermediğini incelemektir. Araştırma nicel araştırma yaklaşımı çerçevesinde tasarlanmış olup, veriler anket yöntemiyle 415 katılımcıdan elde edilmiştir. Veri analizinde tanımlayıcı istatistikler, açımlayıcı faktör analizi, bağımsız örneklem t-testi ve tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen faktör analizi sonucunda ölçeğin beş boyutlu bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Bu boyutlar; duygusal tatmin ve imaj, satın alma eğilimi ve güven, özgünlük ve yerellik, farkındalık ile standart ve kalite bilinci olarak adlandırılmıştır. Araştırma bulguları, tüketici tutumlarının bazı demografik değişkenlere göre anlamlı farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle yaş, eğitim düzeyi, meslek ve gelir değişkenlerinin çeşitli tutum boyutları üzerinde belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın cinsiyet değişkenine göre anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Elde edilen sonuçlar, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici değerlendirmelerinin çok boyutlu bir yapıya sahip olduğunu ve bu değerlendirmelerin demografik özelliklere bağlı olarak farklılaşabildiğini göstermektedir. Çalışma, yerel tüketici perspektifine odaklanarak literatürdeki boşluğa katkı sunmakta ve coğrafi işaretli ürünlerin pazarlanması ile sürdürülebilirliğine yönelik uygulayıcılara yol gösterici bulgular sağlamaktadır.
Anahtar kelimeler: Coğrafi işaret, tüketici tutumları, yerel tüketici, satın alma eğilimi, Ahlat

CONSUMER ATTITUDES TOWARD GEOGRAPHICAL INDICATION FOOD PRODUCTS: THE CASE OF AHLAT

ABSTRACT
The aim of this study is to examine the attitudes of consumers living in Ahlat district of Bitlis province toward geographical indication (GI) food products and to determine whether these attitudes differ according to demographic variables. The study was designed within the framework of a quantitative research approach, and the data were collected from 415 participants a survey method. Descriptive statistics, exploratory factor analysis, independent samples t-test, and one-way analysis of variance (ANOVA) were used for data analysis. The results of the factor analysis revealed a five-dimensional structure of the scale. These dimensions were identified as emotional satisfaction and image, purchase intention and trust, authenticity and locality, awareness, and standard and quality consciousness. The findings indicated that consumer attitudes significantly differ across certain demographic variables. In particular, age, education level, occupation, and income were found to have significant effects on various attitude dimensions, whereas no significant difference was observed based on gender. The results demonstrate that consumer evaluations of GI products have a

multidimensional structure and vary depending on demographic characteristics. By focusing on the local consumer perspective, this study contributes to the existing literature and provides practical implications for the marketing and sustainability of geographical indication products.
Keywords: Geographical indication, consumer attitudes, local consumers, purchase intention, Ahlat

1. GİRİŞ

Gastronomi turizmi literatüründe yerel ürünler, destinasyon kimliğinin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Acar, 2023, s. 165). Coğrafi işaretler ise belirli bir coğrafi alanla özdeşleşmiş ürünlerin köken, kalite ve üretim özelliklerini koruyan hukuki araçlar olarak tanımlanmaktadır (Belletti ve Marescotti, 2011, s. 76). Bu sistemin, gastronomik mirasın korunması ve destinasyon markalaşması açısından stratejik bir işlev gördüğü belirtilmektedir (Tregear vd., 2007, s. 14). Türkiye'de coğrafi işaret tescillerindeki artış, bu yapının yerel ürün politikalarında daha görünür hâle geldiğini göstermektedir (Türk Patent ve Marka Kurumu, 2023).

Gıda ürünleri, tüketiciler açısından kalite belirsizliğinin yüksek olduğu ürün grupları arasında yer almaktadır (Grunert, 2005, s. 372). Bu bağlamda, coğrafi işaretler kaliteye ilişkin belirsizliği azaltan önemli göstergeler olarak değerlendirilmektedir (Aprile vd., 2012, s. 159). Güvenilir kalite işaretlerinin, tüketicilerin ürünlere yönelik değerlendirmelerini ve tutumlarını şekillendirdiği ifade edilmektedir (Erdem ve Swait, 2004, s. 192). Bu çerçevede, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarının anlaşılması, söz konusu ürünlerin pazardaki konumunun değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Tüketici davranışı literatüründe tutum, bireylerin belirli bir ürüne ya da hizmete yönelik genel değerlendirmelerini ifade etmektedir (Ajzen, 1991, s. 181). Bu değerlendirmeler, tüketicilerin algıları, deneyimleri ve bilgi düzeyleri doğrultusunda şekillenmektedir. Literatürde, algılanan kalite ve güven düzeyinin tüketici tutumları üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Konuk, 2018, s. 306).

Literatürdeki çalışmaların önemli bir bölümü turistlerin destinasyon deneyimi ve ödeme istekliliği üzerine yoğunlaşmaktadır (Aprile vd., 2012, s. 160). Yerli turistlere yönelik araştırmalar da mevcut olmakla birlikte (Çekiç vd., 2023, s. 247), yerel tüketicilerin coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutumlarının incelendiği çalışmalar sınırlıdır. Oysa yerel tüketiciler, kültürel aidiyet ve bölgesel kimlik bağlamında bu ürünlere farklı anlamlar yükleyebilmektedir (Tregear vd., 2007, s. 18). Bu durum, yerel tüketici perspektifinin ayrı bir çerçevede ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Bu araştırmanın temel amacı, Ahlat ilçesinde yaşayan tüketicilerin coğrafi işaretli gıda ürünlerine yönelik tutumlarını belirlemek ve bu tutumların demografik özelliklere göre farklılık gösterip göstermediğini incelemektir. Bu doğrultuda tüketici tutumları; duygusal tatmin ve imaj, satın alma eğilimi ve güven, özgünlük ve yerellik, farkındalık ile standart ve kalite bilinci boyutları çerçevesinde ele alınmıştır.

Literatürde coğrafi işaretli ürünlere yönelik çalışmaların büyük ölçüde turist tüketicilere ve ödeme istekliliğine odaklandığı görülmektedir. Buna karşın üretim coğrafyasında yaşayan yerel tüketicilerin tutumlarını çok boyutlu olarak ele alan çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu çalışma, yerel tüketici perspektifine odaklanarak ve tutumları farklı boyutlar çerçevesinde inceleyerek literatürdeki bu boşluğa katkı sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca çalışma, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarının demografik değişkenlere göre nasıl farklılaştığını ortaya koyarak, yerel ürünlerin pazarlanması ve sürdürülebilirliği açısından uygulayıcılara yol gösterici bulgular sunmaktadır.

Araştırma alanı olarak seçilen Ahlat, tarihsel kimliği ve geleneksel üretim yapısıyla öne çıkan bir yerleşimdir. Yerel üretim ile yerel tüketim arasındaki ilişkinin daha görünür olduğu bu tür

bağlamlar, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarının daha bütüncül biçimde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Bu yönüyle Ahlat, çalışmanın amacıyla uyumlu bir araştırma ortamı sunmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Coğrafi İşaretler ve Yerel Tüketici Bağlamı

Coğrafi işaretler (Cİ), belirli bir coğrafi alanla özdeşleşmiş ürünlerin kökenini ve ayırt edici özelliklerini koruyan kolektif fikri mülkiyet araçlarıdır. Bu sistem, ürünün belirli bir yerle bağlantılı kalite, ün veya diğer karakteristik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir (Bramley vd., 2009, s. 109-111). Avrupa Birliği mevzuatında coğrafi işaretler menşe adı (PDO) ve mahreç işareti (PGI) olarak iki temel kategori altında ele alınmaktadır. Menşe adında üretim sürecinin tamamı ilgili coğrafi alanda gerçekleşirken, mahreç işaretinde bu süreçlerin en az bir aşamasının ilgili bölgede gerçekleşmesi yeterli görülmektedir (Gangjee, 2012, s.24-25). Bu ayrım, ürünün coğrafi bağının derecesini belirlemektedir.

Coğrafi işaretler yalnızca hukuki bir koruma mekanizması değil, aynı zamanda üreticiler arasında ortak standartların oluşturulmasını sağlayan kolektif bir yapı olarak da değerlendirilmektedir (Giovannucci vd., 2009, s. 15–17). Bu yönüyle sistem hem piyasa düzenleyici bir araç hem de yerel üretim ağlarını güçlendiren bir unsur olarak öne çıkmaktadır (Bowen ve Zapata, 2009, s. 111).

Gastronomi literatüründe coğrafi işaretli ürünler, destinasyon kimliğinin önemli bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu ürünler, yerel kimliği ve otantiklik algısını güçlendirerek tüketici değerlendirmelerini etkileyebilmektedir (Sims, 2013, s. 327–329). Ayrıca menşe bilgisinin, tüketicilerin ürünleri daha kaliteli ve güvenilir algılamasına katkı sağlayabildiği belirtilmektedir (Verbeke ve Ward, 2006, s. 170). Bu çerçevede coğrafi işaretli ürünler yalnızca hukuki ve ekonomik bir araç değil, aynı zamanda tüketici algılarını ve değerlendirmelerini şekillendiren önemli bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır.

Coğrafi işaretli ürünlerin ekonomik boyutu ise yerel ürün–yerel ekonomi ilişkisi çerçevesinde tartışılmaktadır. Barham (2003), coğrafi işaretlerin yerel bilgi birikimini ekonomik değere dönüştürdüğünü ve kırsal alanlarda katma değer yaratma potansiyeline sahip olduğunu ifade etmektedir (s. 131–132). Benzer şekilde Bowen (2010), yerel üretim sistemlerinin küresel piyasalara entegrasyonunda coğrafi işaretlerin bir araç olarak işlev gördüğünü belirtmektedir (s. 214). Bu yönüyle Cİ sistemi, yalnızca ürün farklılaştırma değil, aynı zamanda bölgesel ekonomik sürdürülebilirlik aracı olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte literatürdeki ampirik çalışmaların önemli bir kısmı turist tüketicilere odaklanmaktadır. Özellikle gastronomi turizmi bağlamında yapılan araştırmalar, coğrafi işaretli ürünlerin ziyaretçilerin destinasyona yönelik tutumlarını ve ödeme istekliliklerini nasıl etkilediğini incelemektedir (Sims, 2013, s. 330). Ancak üretim coğrafyasında yaşayan yerel halkın coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutumlarını ele alan çalışmalar görece sınırlıdır. Bu durum, coğrafi işaretli ürünlerin asıl yerel pazar dinamiklerinin yeterince analiz edilmediğini göstermektedir.

Yerel tüketicinin rolü, üretim coğrafyasında tüketim dinamikleri bağlamında farklılaşmaktadır. Grunert (2005), gıda tüketiminde alışkanlıkların ve yerleşik tercihlerinin belirleyici olduğunu vurgulamaktadır (s. 374). Üretim bölgesinde yaşayan bireyler, ürünü yalnızca kalite göstergesi olarak değil, gündelik yaşamın doğal bir parçası olarak değerlendirebilmektedir. Bu durum, coğrafi işaret etiketinin yerel tüketici açısından algısal etkisinin turist tüketicilere kıyasla farklılaşabileceğini düşündürmektedir.

Yerel kimlik ve kültürel aidiyet boyutu da bu farklılaşmanın önemli bir bileşenidir. Guerrero ve arkadaşları (2009), geleneksel gıda ürünlerinin tüketiminde kültürel miras ve bölgesel bağlılığın belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır (s. 348–349). Coğrafi işaretli ürünler,

belirli bir topluluğun kolektif hafızasını ve üretim geleneğini temsil edebilmektedir. Dolayısıyla yerel tüketicinin coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutumları, yalnızca ekonomik rasyonaliteye değil, sembolik ve kimlik temelli değerlendirmelere de dayanabilmektedir.

Coğrafi işaret literatürü; hukuki koruma, kırsal kalkınma ve gastronomi turizmi ekseninde gelişmiş; ancak üretim coğrafyasında yaşayan yerel tüketicinin rolü sınırlı ölçüde incelenmiştir. Menşe ve mahreç ayrımı, hukuki yapı ve destinasyon kimliği gibi kavramsal boyutlar literatürde güçlü biçimde yer alırken; yerel kimlik, kültürel aidiyet ve yerel tüketim dinamikleri bağlamında bütüncül analizler görece yetersizdir. Bu nedenle coğrafi işaretli ürünlerin yerel tüketici perspektifinden ele alınması, literatürde tamamlayıcı bir araştırma alanı sunmaktadır.

2.2. Tüketici Tutumları ve Değerlendirme Boyutları

Satın alma niyeti, tüketicinin belirli bir ürünü gelecekte satın alma yönündeki bilinçli eğilimini ifade etmektedir ve davranışın en güçlü öncüllerinden biri olarak kabul edilmektedir. Fishbein ve Ajzen (1972), niyetin davranışla ilişkili olduğunu ve bireyin tutumsal değerlendirmelerine dayandığını belirtmektedir (s. 288–289). Bu yaklaşım daha sonra Planlı Davranış Teorisi çerçevesinde geliştirilmiş ve niyetin tutum, öznel norm ve algılanan davranışsal kontrol tarafından şekillendiği ileri sürülmüştür (Ajzen, 2002, s. 3–5). Davranış Teorisi, özellikle tüketim kararlarının açıklanmasında yaygın biçimde kullanılan kuramsal bir modeldir.

Tüketici davranışı literatüründe tutumun oluşumu büyük ölçüde bilişsel değerlendirmelere dayanmaktadır. Bagozzi ve diğerleri (1989), tutumun inançlar ve değerlendirmeler aracılığıyla şekillendiğini ve niyet ile ilişkili olduğunu göstermektedir (s. 46–48). Gıda ürünleri bağlamında kalite algısı ve güven düzeyi, bu bilişsel inançların temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle algılanan kalite ve güven, satın alma niyetinin öncülleri olarak değerlendirilmektedir.

Güven kavramı, özellikle belirsizlik içeren piyasalarda niyet oluşumunun kritik bir bileşenidir. Morgan ve Hunt (1994), güvenin ilişkisel değişim süreçlerinde temel bir yapı taşı olduğunu ve davranışsal bağlılığı güçlendirdiğini belirtmektedir (s. 23–25). Tüketici bağlamında güven, ürünün vaat ettiği faydayı sağlayacağına yönelik beklentiyi ifade etmektedir. Chaudhuri ve Holbrook (2001) ise marka güveninin hem tekrar satın alma niyeti hem de davranışsal sadakat üzerinde anlamlı etkisi olduğunu göstermektedir (s. 82–84). Bu bulgular, güvenin yalnızca algısal bir değişken değil, niyetin doğrudan belirleyicisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Fiyat değerlendirmesi de tüketici değerlendirmeleri sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Oxenfeldt (1980), tüketicinin fiyatı hem fedakârlık göstergesi hem de kalite ipucu olarak değerlendirdiğini ifade etmektedir (s. 107). Eğer fiyat, algılanan kalite ile tutarlı bulunursa, niyet güçlenebilmektedir; ancak fiyatın aşırı yüksek algılanması durumunda satın alma eğilimi zayıflayabilmektedir. Lichtenstein ve arkadaşları (1993), fiyat bilincinin ve fiyat adaleti algısının satın alma kararını anlamlı biçimde etkilediğini göstermektedir (s. 235–237). Bu bağlamda fiyat algısı, kalite ve güvenin niyet üzerindeki etkisini düzenleyici bir unsur olarak değerlendirilebilmektedir.

Gıda tüketiminde niyet modellerini inceleyen çalışmalar, kalite ve güven değişkenlerinin niyet üzerinde dolaylı ve doğrudan etkiler üretebildiğini göstermektedir. Chen ve Chen (2010), algılanan kalite ve algılanan değerin satın alma niyetini pozitif yönde etkilediğini ve güvenin bu ilişkide aracılık rolü oynayabileceğini ortaya koymaktadır (s. 32–34). Benzer şekilde Teng ve Wang (2015), gıda ürünlerinde algılanan değerin ve güvenin niyet oluşumunda belirleyici olduğunu belirtmektedir (s. 45–47). Bu bulgular, niyetin çok boyutlu bir değerlendirme yapısı çerçevesinde şekillendiğini göstermektedir.

Planlı Davranış Teorisi bağlamında değerlendirildiğinde, algılanan kalite ve güven bireyin ürüne yönelik tutumunu güçlendirmekte; fiyat değerlendirmesi ise davranışsal kontrol algısıyla ilişkilendirilebilmektedir. Eğer tüketici fiyatı ulaşılabilir bulursa, niyet artmakta; aksi durumda

sınırlayıcı bir etki ortaya çıkabilmektedir (Ajzen, 2002, s. 6). Bu nedenle satın alma niyeti, bilişsel değerlendirmelerin (kalite ve güven) ve ekonomik değerlendirmeler (fiyat algısı) ile birlikte değerlendirilmektedir.

Mevcut literatür incelendiğinde, coğrafi işaretli ürünlere yönelik çalışmaların büyük ölçüde turist tüketicilere, ödeme istekliliğine ve ürünlerin ekonomik değerine odaklandığı görülmektedir. Buna karşın üretim coğrafyasında yaşayan yerel tüketicilerin bu ürünlere yönelik tutumlarının çok boyutlu bir yapı içerisinde ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Oysa yerel tüketiciler, coğrafi işaretli ürünlerin sürdürülebilirliği ve yerel ekonomiye katkısı açısından kritik bir paydaş konumundadır.

Bu bağlamda, tüketici tutumlarının yalnızca tek boyutlu olarak değil; çok boyutlu bir yapı içerisinde değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca bu tutumların demografik değişkenler açısından nasıl farklılaştığının ortaya konulması hem akademik literatüre katkı sunmakta hem de uygulayıcılar açısından stratejik çıkarımlar üretmektedir.

Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlayarak, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarını çok boyutlu bir yapı içerisinde ele almakta ve bu tutumların demografik değişkenlere göre farklılaşıp farklılaşmadığını incelemektedir.

2.3. Literatür Sentezi ve Araştırma Boşluğu

Coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici değerlendirmelerini inceleyen çalışmalar, ağırlıklı olarak algılanan kalite ve ödeme istekliliği gibi değişkenler üzerine yoğunlaşmaktadır. Örneğin Loureiro ve McCluskey (2000), menşe etiketinin tüketicilerin ödeme istekliliğini artırabildiğini göstermiştir (s. 312–314). Benzer biçimde Saïdi ve arkadaşları (2020), coğrafi işaret etiketlerinin ürün değerlemesini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur (s. 105-107). Bu çalışmalar, coğrafi işaretlerin ekonomik değer yaratma potansiyelini ortaya koymakla birlikte, tüketici değerlendirmelerinin çok boyutlu yapısını bütüncül bir çerçevede ele almamaktadır.

Kalite algısı ve güven değişkenlerine odaklanan araştırmalar, bu unsurların tüketici değerlendirmelerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Janssen ve Hamm (2012), Avrupa'da organik ve coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici değerlendirmelerini incelemiş ve güven düzeyi ile satın alma eğilimi arasında anlamlı ilişkiler bulunduğunu ortaya koymuştur (s. 429–431). Ancak bu çalışmaların önemli bir kısmı, farklı tüketici grupları arasındaki değerlendirme farklılıklarını sınırlı biçimde ele almaktadır. Özellikle fiyat algısı, kalite ve güven gibi değişkenlerin birlikte nasıl değerlendirildiği konusu literatürde yeterince bütüncül bir yaklaşımla incelenmemektedir.

Fiyat değişkenine ilişkin bulgular ise literatürde homojen değildir. Teuber (2011), coğrafi işaretli şarapların premium fiyat algısının kalite değerlendirmesini güçlendirdiğini ileri sürmektedir (s. 906–908). Buna karşılık Bonnet ve Simioni (2001), belirli bağlamlarda fiyat artışlarının talebi sınırlayabileceğini göstermiştir (s. 25–27). Bu çelişkili bulgular, fiyat algısının tüketici segmentine ve bağlamsal koşullara bağlı olarak farklı etkiler üretebileceğini düşündürmektedir. Özellikle üretim coğrafyasında yaşayan yerel tüketicilerin fiyat hassasiyeti, turist tüketicilere kıyasla daha belirleyici olabilmektedir.

Turist odaklı literatür incelendiğinde, coğrafi işaretli ürünlerin destinasyon deneyimiyle ilişkilendirildiği görülmektedir. Björk ve Kauppinen-Räisänen (2016), gastronomi deneyiminin destinasyon bağlılığını artırdığını belirtmektedir (s. 181–183). Bununla birlikte bu çalışmalar, yerel halkın gündelik tüketim pratiklerini analiz etmemektedir. Yerel tüketici, ürünü deneyimsel bir yenilik olarak değil, rutin bir tüketim unsuru olarak değerlendirebilmektedir. Bu bağlam farklılığı, satın alma niyetinin oluşum sürecini de etkileyebilmektedir.

Farkındalık değişkeni üzerine yapılan çalışmalar da sınırlı bir çerçeve sunmaktadır. Vecchio ve Annunziata (2011), coğrafi işaret etiketine aşinalığın ürün tercihlerini etkilediğini göstermiştir (s. 86–88); ancak farkındalığın kalite algısı ve güven üzerinden niyete nasıl dönüştüğünü

bütüncül biçimde modellememiştir. Dolayısıyla literatürde genellikle tekil ilişkiler test edilmekte; farkındalık, kalite, güven ve fiyat değişkenlerinin ardışık bir mekanizma oluşturup oluşturmadığı yeterince analiz edilmemektedir.

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde üç temel boşluk dikkat çekmektedir. İlk olarak, mevcut araştırmalar çoğunlukla tek yönlü ilişkileri ele almakta; değişkenlerin tüketici değerlendirmeleri içerisindeki göreli önemini sınırlı biçimde incelemektedir. İkinci olarak, turist örneklemleri baskın olup, üretim coğrafyasında yaşayan yerel tüketicilerin değerlendirmeleri görece ihmal edilmektedir. Üçüncü olarak ise fiyat, kalite ve güven gibi değişkenlerin farklı tüketici grupları açısından nasıl algılandığına yönelik karşılaştırmalı analizler yeterince geliştirilmemiştir.

Bu bağlamda, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarının çok boyutlu bir yapıda ele alınması ve bu tutumların demografik değişkenler açısından farklılaşıp farklılaşmadığının incelenmesi hem teorik hem de uygulamalı açıdan önem taşımaktadır. Özellikle yerel tüketicilerin bu ürünlere yönelik değerlendirmelerinin ortaya konulması, coğrafi işaretli ürünlerin sürdürülebilirliği ve yerel kalkınma açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu ihtiyaca yanıt vererek literatürdeki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı, Bitlis ilinin Ahlat ilçesinde yaşayan tüketicilerin coğrafi işaretli gıda ürünlerine yönelik tutumlarını belirlemek ve bu tutumların demografik değişkenlere göre farklılık gösterip göstermediğini incelemektir. Bu kapsamda tüketici tutumları; duygusal tatmin ve imaj, satın alma eğilimi ve güven, özgünlük ve yerellik, farkındalık ile standart ve kalite bilinci boyutları çerçevesinde değerlendirilmiştir. Çalışma ayrıca, üretim coğrafyasında yaşayan yerel tüketicilerin coğrafi işaretli ürünlere yönelik algılarını ortaya koyarak literatürde sınırlı incelenen yerel tüketici perspektifine katkı sunmayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular doğrultusunda coğrafi işaretli ürünlerin pazarlanması, sürdürülebilirliği ve yerel kalkınma süreçlerine yönelik uygulayıcılara yol gösterici öneriler geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu araştırma, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarını incelemek amacıyla nicel araştırma yaklaşımı çerçevesinde tasarlanmıştır. Araştırmada, veriler anket tekniği kullanılarak toplanmış olup çalışma kesitsel bir araştırma niteliği taşımaktadır. Elde edilen veriler, tüketici tutumlarının demografik değişkenlere göre farklılaşıp farklılaşmadığını belirlemek amacıyla istatistiksel analizlere tabi tutulmuştur (Lim, 2025, s. 3).

Araştırma tasarımı olarak kesitsel betimsel nicel araştırma deseni kullanılmıştır. Kesitsel araştırmalar, belirli bir zaman diliminde bir örneklemden veri toplayarak mevcut durumu ortaya koymayı amaçlayan araştırmalardır (Edmonds ve Kennedy, 2016, s. 87). Bu çalışmada da Ahlat ilçesinde yaşayan bireylerin coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumları mevcut durum itibarıyla incelenmiştir. Bu nedenle kesitsel nicel araştırma deseni çalışmanın amacı ile uyumlu görülmektedir.

Araştırmada veri toplama aracı olarak anket yöntemi kullanılmıştır. Anket yöntemi, geniş katılımcı gruplarından kısa sürede veri toplanmasına olanak sağlayan ve özellikle tutum ve algıların ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan bir veri toplama tekniğidir (Harwell, 2011, s. 154). Araştırmada kullanılan ölçek, Yüce ve Korucuk (2021) tarafından geliştirilen Coğrafi İşaretli Ürünleri Satın Almaya Yönelik Tutum Ölçeğidir. Bu ölçek üç boyuttan oluşmaktadır: davranış boyutu, bilgi boyutu ve duygu boyutu. Araştırmada kullanılan ölçek her ne kadar üç boyutlu olarak geliştirilmiş olsa da, bu çalışmada elde edilen veriler üzerinde gerçekleştirilen açımlayıcı faktör analizi sonucunda ölçeğin beş faktörlü bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle analizler, orijinal boyutlar yerine elde edilen faktör yapısı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında ayrıca katılımcıların demografik özelliklerini

belirlemek amacıyla cinsiyet, yaş, medeni durum, eğitim düzeyi, meslek, aylık gelir düzeyi ve Ahlat'ta ikamet süresine yönelik sorular da ankette yer almaktadır.
Bu çalışma değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri test etmeyi amaçlamamakta olup, teorik çerçeve bulguların yorumlanmasına rehberlik eden kavramsal bir temel olarak kullanılmıştır.

3.1. Evren ve Örneklem

Araştırmanın evrenini, Bitlis ili Ahlat ilçesinde yaşayan tüketiciler oluşturmaktadır. Araştırmada zaman ve maliyet kısıtları nedeniyle olasılıklı olmayan örnekleme yöntemlerinden kolayda örnekleme yöntemi tercih edilmiştir. Bu kapsamda toplam 415 katılımcıdan veri toplanmıştır.
Örneklem büyüklüğü, nicel araştırmalar için önerilen asgari örneklem büyüklüklerinin üzerinde olup, gerçekleştirilen istatistiksel analizler açısından yeterli kabul edilmektedir. Bununla birlikte, kullanılan örnekleme yönteminin doğası gereği elde edilen bulguların genellenebilirliğinin sınırlı olduğu dikkate alınmalıdır (Etikan vd., 2015, s. 2).

3.2. Geçerlik ve Güvenirlik

Araştırmada kullanılan ölçek Yüce ve Korucuk (2021) tarafından geliştirilmiş ve geçerlik ile güvenirlik analizleri yapılmış bir ölçektir. Ölçek geliştirme çalışmalarında geçerlik, ölçme aracının ölçmek istediği kavramı ne derece doğru ölçtüğünü ifade ederken; güvenirlik ise ölçme aracının tutarlı sonuçlar üretme düzeyini ifade etmektedir (Misra vd., 2021, s. 3).
Bu araştırmada ölçeğin güvenirliğini test etmek amacıyla Cronbach Alpha katsayısı hesaplanacaktır. Cronbach Alpha katsayısı, ölçek maddelerinin iç tutarlılığını değerlendirmek amacıyla kullanılan en yaygın istatistiksel yöntemlerden biridir (Gliem ve Gliem, 2003, s. 87). Alpha değerinin 0,953 olması ölçeğin güvenilir olduğunu göstermektedir.

Boyut	Madde Sayısı	Cronbach Alpha
Duygusal Tatmin ve İmaj	9	,928
Satın Alma Eğilimi ve Güven	7	,891
Özgünlük ve Yerellik	6	,873
Farkındalık	4	,821
Standart ve Kalite Bilinci	3	,784
Genel Ölçek	**29**	**,953**

Alt boyutlara ilişkin Cronbach Alpha katsayıları incelendiğinde tüm boyutların kabul edilebilir güvenilirlik düzeyinin üzerinde olduğu görülmektedir. Özellikle Duygusal Tatmin ve İmaj boyutunun yüksek iç tutarlılık gösterdiği, diğer alt boyutların da güvenilir ölçüm sonuçları sunduğu belirlenmiştir. Genel ölçek için elde edilen ,953 Cronbach Alpha değeri ise ölçeğin oldukça yüksek düzeyde güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.
Ayrıca veri setinin parametrik testlere uygun olup olmadığını belirlemek amacıyla normallik analizi yapılmıştır. Normallik testleri, verilerin normal dağılıma uygunluğunu belirlemek için kullanılmakta olup parametrik testlerin uygulanabilmesi için önemli bir aşamadır (Field, 2024, s. 184). Bu araştırmada normallik değerlendirmesi çarpıklık ve basıklık değerleri dikkate alınarak yapılmıştır.

Tablo 1. Değişkenlere Ait Çarpıklık ve Basıklık (Normallik Testi) Değerleri

Boyutlar	Skewness (Çarpıklık ± S.H)	Kurtosis (Basıklık ± S.H)
Duygusal Tatmin ve İmaj	-1,581 ± ,120	3,247 ± ,239
Satın Alma Eğilimi ve Güven	-,224 ± ,120	-,272 ± ,239
Özgünlük ve Yerellik	-1,010 ± ,120	,962 ± ,239
Farkındalık	-,674 ± ,120	,010 ± ,239
Standart ve Kalite Bilinci	-,305 ± ,120	-,058 ± ,239

Tablo 1' de yer alan çarpıklık ve basıklık değerleri incelendiğinde, tüm değişkenlerin çarpıklık katsayılarının negatif olduğu ve dağılımların genel olarak sola çarpık bir yapı sergilediği görülmektedir. Bu durum, katılımcıların ilgili ifadelere yüksek düzeyde katılım gösterdiğini ve yanıtların ölçeğin üst değerlerinde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Basıklık değerleri açısından değerlendirildiğinde, özellikle Duygusal Tatmin ve İmaj boyutunun yüksek pozitif basıklık değeri (kurtosis=3,247) ile daha sivri (leptokurtik) bir dağılım sergilediği, diğer değişkenlerin ise daha ılımlı ve normale yakın dağılım özellikleri gösterdiği anlaşılmaktadır.
Normallik varsayımının değerlendirilmesinde çarpıklık ve basıklık değerlerinin ±2 aralığında olması genellikle kabul edilebilir sınırlar olarak değerlendirilmektedir (George & Mallery, 1999). Bu bağlamda, Duygusal Tatmin ve İmaj değişkeninin basıklık değeri bu sınırı aşmakla birlikte, diğer tüm değişkenlerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, daha esnek bir değerlendirme yaklaşımı benimseyen Tabachnick ve diğerlerine (2007) göre, çarpıklık ve basıklık değerlerinin ±3 sınırları içerisinde kalmasının normallik açısından ciddi bir ihlal oluşturmadığını belirtmektedir.
Ayrıca, örneklem büyüklüğünün 415 gibi yüksek bir düzeyde olması, merkezi limit teoremi kapsamında dağılımın normalden sapmalarının parametrik testlerin uygulanabilirliğini önemli ölçüde sınırlamadığını göstermektedir (Field, 2024). Duygusal Tatmin ve İmaj boyutunda normallikten sapma gözlenmekle birlikte, örneklem büyüklüğünün yüksek olması nedeniyle parametrik testlerin uygulanmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir.

3.3. Veri Analizi

Araştırmada elde edilen veriler istatistiksel analiz programı kullanılarak analiz edilmiştir. Öncelikle katılımcıların demografik özelliklerini belirlemek amacıyla frekans ve yüzde analizleri yapılmıştır. Bu analizler, örneklemin genel özelliklerini ortaya koymak amacıyla sosyal bilim araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Harwell, 2011, s. 158).
Araştırmada katılımcıların coğrafi işaretli ürünleri satın almaya yönelik tutumlarının demografik değişkenlere göre farklılaşıp farklılaşmadığını belirlemek amacıyla bağımsız örneklem t-testi ve tek yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanacaktır. Bağımsız örneklem t-testi iki grup arasındaki ortalama farkını incelemek amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Tek yönlü varyans analizi ise ikiden fazla grup arasında ortalama farklarının anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir (Field, 2024, s. 325- 431). Bu analizlerin yapılmasının temel amacı, coğrafi işaretli ürünlere yönelik satın alma niyetinin bireylerin demografik özelliklerine göre farklılaşıp farklılaşmadığını ortaya koymaktır.
Tek yönlü varyans analizi (ANOVA) öncesinde varyansların homojenliği Levene Testi ile kontrol edilmiştir. Levene testi sonucunda varyansların homojen dağılım göstermediği ($p < 0,05$) boyutlarda gruplar arası ortalama farklarının tespiti için Welch ANOVA testi uygulanmıştır. Homojenlik varsayımının ihlal edildiği durumlar dikkate alınarak, anlamlı farkların hangi spesifik gruplardan kaynaklandığını belirlemek amacıyla Post-Hoc testlerinden Games-Howell testi tercih edilmiştir. Varyans homojenliğinin sağlandığı durumlarda ise Post-Hoc analizlerinde Tukey HSD testi sonuçları esas alınmıştır.

3.4. Çalışma Modeli ve Hipotezler

Bu araştırmanın temel amacı, Ahlat ilçesinde yaşayan bireylerin coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutumlarını incelemek ve bu tutumların demografik özelliklere göre farklılık gösterip göstermediğini belirlemektir. Bu kapsamda, tüketici tutumları farklı boyutlar çerçevesinde ele alınarak değerlendirilmiştir.
Araştırmada kullanılan ölçek her ne kadar literatürde üç boyutlu bir yapı olarak geliştirilmiş olsa da, bu çalışmada elde edilen veriler üzerinde gerçekleştirilen açımlayıcı faktör analizi

sonucunda ölçeğin beş faktörlü bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle analizler, orijinal boyutlar yerine elde edilen faktör yapısı dikkate alınarak yürütülmüştür.

Araştırma kapsamında, tüketici tutumlarının demografik özelliklere göre farklılık gösterip göstermediğini incelemek amacıyla bir ana hipotez oluşturulmuştur. Bununla birlikte, her bir demografik değişkenin tutum boyutları üzerindeki farklılıklarını belirlemek amacıyla alt hipotezler geliştirilmiştir.

H1: Tüketici tutumları demografik değişkenlere göre anlamlı farklılık göstermektedir.
H1a: Tüketici tutumları cinsiyete göre anlamlı farklılık göstermektedir.
H1b: Tüketici tutumları yaşa göre anlamlı farklılık göstermektedir.
H1c: Tüketici tutumları eğitim düzeyine göre anlamlı farklılık göstermektedir.
H1d: Tüketici tutumları mesleğe göre anlamlı farklılık göstermektedir.
H1e: Tüketici tutumları gelir düzeyine göre anlamlı farklılık göstermektedir.
H1f: Tüketici tutumları ikamet süresine göre anlamlı farklılık göstermektedir.

3.5. Sınırlılıklar

Bu araştırmanın metodolojik açıdan dikkat çekilmesi gereken temel kısıtlılığı, Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) sonucunda elde edilen model uyum indekslerinin (özellikle RMSEA ve CFI/TLI) ideal kabul eşiklerinin sınırında kalmış olmasıdır. Bu durum, veri toplama aracının yerel/homojen bir tüketici grubuna uygulanmasından ve ölçeğin alt boyutlarındaki madde yapılandırmalarından etkilenebilir. Gelecekte yapılacak araştırmalarda, coğrafi işaretli ürün tüketim tutumlarını ölçen ölçeklerin farklı coğrafi bölgelerde, daha heterojen örneklem grupları üzerinde ve alternatif modelleme yaklaşımlarıyla (örneğin Yapısal Eşitlik Modellemesi) yeniden test edilerek model uyumunun güçlendirilmesi önerilmektedir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, araştırma kapsamında elde edilen verilerin analizine ilişkin bulgular sunulmaktadır. Öncelikle katılımcıların demografik özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistiklere yer verilmiş, ardından ölçeğin yapı geçerliliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen faktör analizi sonuçları ortaya konulmuştur. Son aşamada ise, faktör analizi sonucunda elde edilen boyutların demografik değişkenlere göre farklılık gösterip göstermediği t-testi ve varyans analizi (ANOVA) ile incelenmiştir.

4.1. Katılımcılara Ait Demografik Özelliklerine İlişkin Bulgular

Tablo 2. Katılımcılara Ait Demografik Özelliklerine İlişkin Bulgular

Değişken	Kategori	Frekans (n)	Yüzde (%)
Cinsiyet	Kadın	234	56,4
	Erkek	175	42,2
	Belirtmek istemiyorum	6	1,4
Yaş	18–24	114	27,5
	25–34	159	38,3
	35–44	56	13,5
	45–54	59	14,2
	55 ve üzeri	27	6,5
Medeni Durum	Evli	181	43,6
	Bekar	234	56,4
Eğitim Düzeyi	İlkokul	31	7,5
	Ortaokul	18	4,3
	Lise	68	16,4
	Ön Lisans	51	12,3
	Lisans	219	52,8

	Lisansüstü	28	6,7
Meslek	Öğrenci	127	30,6
	Kamu çalışanı	94	22,7
	Özel sektör çalışanı	76	18,3
	Esnaf/Serbest meslek	38	9,2
	Ev hanımı	64	15,4
	Emekli	9	2,2
	Diğer	7	1,7
Aylık Gelir	10.000–30.000 TL	183	44,1
	30.001–50.000 TL	66	15,9
	50.001–70.000 TL	93	22,4
	70.000 TL ve üzeri	73	17,6
Ahlat'ta İkamet Süresi	1 yıldan az	145	34,9
	1–5 yıl	109	26,3
	6–10 yıl	67	16,1
	11 yıl ve üzeri	37	8,9
	Doğduğumdan beri	57	13,7

Tablo 2'de araştırmaya katılan bireylerin demografik özelliklerine ilişkin bulgular yer almaktadır. Katılımcıların %56,4'ünün kadın, %42,2'sinin erkek olduğu görülmektedir. Katılımcıların yaş dağılımı incelendiğinde, en yüksek oranın %38,3 ile 25–34 yaş aralığında olduğu, bunu %27,5 ile 18–24 yaş grubunun takip ettiği belirlenmiştir. Bu durum, örneklemin ağırlıklı olarak genç bireylerden oluştuğunu göstermektedir.

Medeni durum açısından katılımcıların %56,4'ünün bekar, %43,6'sının evli olduğu görülmektedir. Eğitim düzeyi incelendiğinde ise katılımcıların büyük bir kısmının %52,8 ile lisans mezunu olduğu dikkat çekmektedir. Bu oran, örneklemin eğitim düzeyinin görece yüksek olduğunu göstermektedir.

Meslek dağılımına bakıldığında, katılımcıların %30,6'sının öğrenci olduğu, bunu %22,7 ile kamu çalışanlarının izlediği görülmektedir. Aylık gelir düzeyine göre en yüksek oran %44,1 ile 10.000–30.000 TL aralığında yer almaktadır. Bu durum, katılımcıların önemli bir kısmının orta gelir grubunda yer aldığını göstermektedir.

Ahlat'ta ikamet süresi incelendiğinde ise katılımcıların %34,9'unun 1 yıldan az süredir bölgede bulunduğu, %13,7'sinin ise doğduğundan beri Ahlat'ta yaşadığı görülmektedir. Bu dağılım, örneklemin hem yeni yerleşen hem de uzun süredir bölgede yaşayan bireyleri kapsadığını göstermektedir.

4.2. Faktör Analizi

Araştırma kapsamında kullanılan 33 maddelik ölçeğin yapı geçerliliğini test etmek amacıyla Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis) ve Varimax döndürme (Rotation) yöntemi kullanılarak Açımlayıcı Faktör Analizi (AFA) uygulanmıştır. Analiz öncesinde verilerin faktörleşmeye uygunluğunu belirlemek amacıyla yapılan KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) testi sonucu ,936 olarak bulunmuş; bu değerin 0,90'ın üzerinde olması örneklem büyüklüğünün "mükemmel" derecede yeterli olduğunu göstermiştir. Bartlett Küresellik Testi sonuçlarının ise istatistiksel olarak anlamlı olduğu (X^2= 9964,169; df= 406; p <,001) ve veri setinin faktör analizi için uygun bir korelasyon yapısına sahip olduğu saptanmıştır.

Tablo 3. Faktör Analizi Sonuçları

Faktörler	Maddeler	Faktör Yükleri	Özdeğer	Açıklanan Varyans (%)	KMO / Bartlett
Duygusal Tatmin ve İmaj	S12, S13, S14, S10, S9, S11, S19, S8, S15	,514- ,828	6,389	22,031	,936
Satın Alma Eğilimi ve Güven	S26, S22, S24, S30, S27, S17, S25	,588- ,823	4,900	16,897	X^2: 9964,169
Özgünlük ve Yerellik	S31, S33, S28, S29, S16	,608- ,792	4,041	13,933	df: 406
Farkındalık	S1, S2, S4, S3	,592- ,849	3,380	11,654	p: < ,001
Standart ve Kalite Bilinci	S7, S6, S5, S20	,476- ,789	2,056	7,090	
Toplam				71,605	

Yapılan analiz neticesinde öz değeri (eigenvalue) 1'in üzerinde olan 5 faktörlü bir yapı elde edilmiştir. Bu beş faktör, toplam varyansın %71,605'ini açıklayarak ölçeğin güçlü bir yapı geçerliliğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Açıklanan toplam varyans oranının %60'ın üzerinde olması, sosyal bilimler açısından güçlü bir yapı geçerliliğine işaret etmektedir (Hair, vd., 2019). Faktör yükleri incelendiğinde, maddelerin kendi faktörleri altındaki yüklerinin ,476 ile ,849 arasında değiştiği görülmektedir. Birinci faktör "Duygusal Tatmin ve İmaj" (%22,031), ikinci faktör "Satın Alma Eğilimi ve Güven" (%16,897), üçüncü faktör "Özgünlük ve Yerellik" (%13,933), dördüncü faktör "Farkındalık" (%11,654) ve beşinci faktör "Standart ve Kalite Bilinci" (%7,090) olarak isimlendirilmiştir. Faktör yüklerinin ,40'ın üzerinde olması, maddelerin ilgili faktörleri yeterli düzeyde temsil ettiğini göstermektedir (Hair, vd., 2019). Elde edilen bu yapı, tüketicilerin coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarının çok boyutlu bir yapıda ele alınabileceğini göstermektedir. Faktör yapısının belirlenmesinde Scree Plot grafiği de incelenmiş ve kırılma noktasının beş faktörlü yapıyı desteklediği gözlemlenmiştir.

4.2.1. Doğrulayıcı Faktör Analizi

Ölçüm aracının yapı geçerliliğini ve teorik alt boyut doğruluğunu test etmek amacıyla Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) uygulanmıştır. İçerik geçerliliğini ve ölçeğin kapsayıcılığını korumak adına modelden herhangi bir madde elenmemiştir. Ancak modifikasyon indeksleri incelenerek, yalnızca aynı alt boyut çatısı altında yer alan ve yüksek kalıntı kovaryansı sergileyen ifadelerin hata terimleri arasında serbestleştirme (kovaryans) yapılmıştır. Kurulan DFA modeline ilişkin uyum istatistikleri Tablo 4'te detaylandırılmıştır.

Tablo 4: Doğrulayıcı Faktör Analizi Uyum İndeksleri

Uyum İndeksi (Fit Metric)	Kısaltma	Araştırma Modeli (Değer)	Mükemmel Uyum Sınırı	Kabul Edilebilir Uyum Sınırı	Uyum Düzeyi
Ki-Kare / Serbestlik Derecesi	χ^2/df	6.136 (2236.10/364)	≤ 3.00	≤ 5.00	*Kısıtlar Alanında*
Karşılaştırmalı Uyum İndeksi	**CFI**	0.8098	≥ 0.95	≥ 0.85 / ≥ 0.80	*Kabul Edilebilir*
Tucker-Lewis İndeksi	**TLI**	0.7878	≥ 0.95	≥ 0.85 / ≥ 0.80	*Yakın / Kabul Edilebilir*
Tahminin Kök Ortalama Kare Hatası	**RMSEA**	0.1113	≤ 0.05	≤ 0.08	*Kısıtlar Alanında*
Standardize Edilmiş Kalıntı Hata Kareleri Ortalama Kökü	**SRMR**	0.0905	≤ 0.05	≤ 0.08	*Kabul Edilire Yakın*

Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) sonucunda elde edilen uyum indeksleri ($\chi^2/df = 6.136$, $RMSEA = 0.111$, $CFI = 0.810$, $TLI = 0.788$) incelendiğinde; ki-kare değerinin örneklem büyüklüğüne ($N = 415$) hassasiyeti göz önüne alınmalıdır (Kline, 2016). Uyum indekslerinin kabul edilebilir eşik değerlerin bir miktar altında kalması, ölçeğin orijinal 3 boyutlu yapısından 5 boyutlu yapıya uyarlanması ve yerel örneklemin homojen yapısından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, tüm maddelerin faktör yüklerinin yüksek (> 0.50) ve p değerlerinin anlamlı ($p < 0.001$) olması sebebiyle yapının kapsam geçerliliği korunmuştur.

Analiz Dışında Bırakılan (Çıkarılan) İfadeler

Analiz sürecinde bazı maddeler, binişiklik göstermesi ve faktör yapısının ayrışmasını zayıflatması nedeniyle ölçekten çıkarılmıştır. Özellikle birden fazla faktörde benzer yük değerlerine sahip olan ve faktörler arası ayrımı netleştirmeyen maddeler analiz dışında bırakılmıştır:

1. **Soru 18**: "Coğrafi işaretli ürünleri tüketmek isterim." (Binişiklik nedeniyle çıkarıldı).
2. **Soru 21**: "Coğrafi işaretli ürünleri satın almak isterim." (Binişiklik ve yüksek korelasyon nedeniyle çıkarıldı).
3. **Soru 23**: "Coğrafi işaretli ürünlerin ilin tanıtımına katkı sağladığını düşündüğüm için satın alırım." (Birden fazla faktörde birbirine çok yakın yük aldığı için çıkarıldı).
4. **Soru 32**: "Coğrafi işaretli ürünleri çevremdeki insanlara tavsiye ederim." (Faktörler arası ayrışmayı zayıflattığı için çıkarıldı).

Tablo 5. Ölçeğe İlişkin Güvenilirlik İstatistikleri

Cronbach's Alpha	N of Items	Mean
0,953	29	3,7673

Araştırma kapsamında 29 maddeden oluşan ölçeğin iç tutarlılığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen güvenilirlik analizi sonucunda Cronbach's Alpha katsayısı α = 0,953 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, ölçeğin oldukça yüksek düzeyde iç tutarlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Literatürde Cronbach's Alpha katsayısının 0,70'in üzerinde olması kabul edilebilir, 0,80'in üzerinde olması iyi ve 0,90'ın üzerindeki değerlerin ise çok yüksek (mükemmel) güvenilirlik düzeyine işaret ettiği belirtilmektedir (Hair vd., 2019; Nunnally, 1975). Bu bağlamda elde edilen bulgu, ölçeğin ölçmek istediği yapıyı son derece tutarlı ve güvenilir bir biçimde yansıttığını ortaya koymaktadır.

Ölçeğe ait ortalama değerin 3,7673 olması, katılımcıların ilgili yapıya yönelik algılarının orta düzeyin üzerinde ve genel olarak olumlu yönde olduğunu göstermektedir. Bu durum, coğrafi işaretli ürünlere ilişkin değerlendirmelerin yalnızca farkındalık düzeyiyle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda olumlu tutum ve davranışsal eğilimlerle de desteklendiğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular doğrultusunda ölçeğin yüksek düzeyde güvenilir olduğu, iç tutarlılığının güçlü olduğu ve ileri istatistiksel analizlerde kullanılmasının metodolojik açıdan uygun olduğu değerlendirilmektedir.

4.3. Farklılık Testleri

4.3.1. T Testleri Bulguları

Katılımcıların medeni durumlarına göre coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarını belirlemek amacıyla yapılan bağımsız örneklemler t-testi analizi sonucunda, beş alt boyuttan dördünde gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir (p <0,05). Analiz bulgularına göre; Farkındalık (t=2,642; p=,009), Duygusal Tatmin ve İmaj (t=2,895; p=,004), Özgünlük ve Yerellik (t=2,947; p=,003) ve Standart ve Kalite Bilinci (t=2,529; p=,012) boyutlarında evli katılımcıların aritmetik ortalamalarının, bekar katılımcılara oranla anlamlı derecede daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum, evli bireylerin coğrafi işaretli

ürünlerin geleneksel değeri, bölgesel aidiyeti ve kalite standartları konusunda bekarlara kıyasla daha yüksek bir bilişsel farkındalık ve olumlu bir imaj algısına sahip olduklarını ortaya koymaktadır.

Tablo 6. Medeni Duruma Göre Araştırma Değişkenlerinin Farklılıkları (t-testi)

Faktörler	Medeni Durum	N	Ortalama	t değeri	p değeri
Farkındalık	Evli	181	3,6616	2,642	,009*
	Bekar	234	3,4327		
Duygusal Tatmin ve İmaj	Evli	181	4,1903	2,895	,004*
	Bekar	234	3,9886		
Satın Alma Eğilimi ve Güven	Evli	181	3,4483	-0,458	,647
	Bekar	234	3,4853		
Özgünlük ve Yerellik	Evli	181	4,1470	2,947[1]	,003*
	Bekar	234	3,9214		
Standart ve Kalite Bilinci	Evli	181	3,5663	2,529	,012*
	Bekar	234	3,3718		

Öte yandan, Satın Alma Eğilimi ve Güven boyutu incelendiğinde, medeni durumun bu değişken üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık yaratmadığı görülmektedir (t=-0,458; p=,647). Evli (3,44) ve bekar (3,48) katılımcıların bu boyuttaki ortalamalarının birbirine oldukça yakın olması, coğrafi işaretli ürünleri tercih etme, satın alma istekliliği ve bu ürünlere duyulan güven düzeyinin katılımcıların medeni durumlarından bağımsız bir seyir izlediğini göstermektedir. Özetle; evli bireyler ilgili boyutlarda daha yüksek değerlendirmelere sahip olduklarını göstermektedir. Ancak somut satın alma eğilimi noktasında bu boyutta anlamlı bir farklılık bulunmamıştır.

4.3.2. Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) Bulguları

Araştırmaya katılan tüketicilerin cinsiyetlerine göre coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutum ve algılarını belirlemek amacıyla yapılan Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) sonuçları incelendiğinde; Farkındalık (F=1,613; p=,200), Duygusal Tatmin ve İmaj (F=1,338; p=,264), Satın Alma Eğilimi (F=,272; p=,762), Özgünlük ve Yerellik (F=2,123; p=,121) ve Standart ve Kalite Bilinci (F=,954; p=,386) boyutlarının tamamında gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmadığı tespit edilmiştir (p>0,05). Analiz öncesinde yapılan Levene testi sonuçları, tüm boyutlarda varyansların homojen dağıldığını (p>0,05) ve ANOVA analizi için gerekli olan temel varsayımların karşılandığını teyit etmektedir.

Tablo 7. Cinsiyet Grubu ile Araştırma Değişkenleri Arasında ANOVA Testi

Faktörler	Cinsiyet Grubu	N	F	p	Varyans Homojenliği	Farklılıklar
Farkındalık	Kadın	234	1,613	,200	,063	-
	Erkek	175				
	Belirtmek İstemiyorum	6				
Duygusal Tatmin ve İmaj	Kadın	234	1,338	,264	,672	-
	Erkek	175				
	Belirtmek İstemiyorum	6				
Satın Alma Eğilimi	Kadın	234	,272	,762	,437	-
	Erkek	175				
	Belirtmek İstemiyorum	6				
Özgünlük ve Yerellik	Kadın	234	2,123	,121	,876	-
	Erkek	175				
	Belirtmek İstemiyorum	6				

Standart ve Kalite Bilinci	Kadın	234	,954	,386	,693	-
	Erkek	175				
	Belirtmek İstemiyorum	6				

Elde edilen bulgular, coğrafi işaretli ürünlere yönelik bilgi düzeyi, duygusal bağlılık, satın alma motivasyonu ve kalite algısı gibi kritik değişkenlerin katılımcıların cinsiyetinden bağımsız bir seyir izlediğini ortaya koymaktadır. Kadın, erkek ve cinsiyetini belirtmek istemeyen katılımcı gruplarının aritmetik ortalamalarının birbirine yakın olması, coğrafi işaretli ürün pazarında cinsiyet temelinde belirgin bir tutum farklılaşmasının olmadığını göstermektedir. Bu bağlamda, ilgili ürünlerin pazarlama ve iletişim stratejilerinde cinsiyet odaklı bir segmentasyondan ziyade, genel tüketici algısını ve bilincini hedefleyen daha kapsayıcı yaklaşımların benimsenmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Katılımcıların yaş gruplarına göre coğrafi işaretli ürünlere yönelik algılarını belirlemek amacıyla yapılan Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) sonucunda, incelenen tüm boyutlarda gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir ($p < 0,05$). Analiz bulguları; Farkındalık ($F=2,835$; $p=,024$), Duygusal Tatmin ve İmaj ($F=2,553$; $p=,039$), Satın Alma Eğilimi ($F=2,937$; $p=,020$), Özgünlük ve Yerellik ($F=3,863$; $p=,004$) ve Standart ve Kalite Bilinci ($F=4,736$; $p=,001$) puanlarının yaşa göre değiştiğini kanıtlamaktadır.

Tablo 8. Yaş düzeyi ile Araştırma Değişkenleri Arasında ANOVA Testi

Faktörler	Yaş Grubu	N	F	p	Varyans Homojenliği (Levene p)	Farklılıklar (Post-Hoc)*
Farkındalık	18-24	114	2,835	,024	,011	45-54 > 55+
	25-34	159				
	35-44	56				
	45-54	59				
	55 ve üzeri	27				
Duygusal Tatmin ve İmaj	18-24	114	2,553	,039	,028	35-44 > 18-24
	25-34	159				
	35-44	56				
	45-54	59				
	55 ve üzeri	27				
Satın Alma Eğilimi ve Güven	18-24	114	2,937	,020	,056	18-24 > 55+
	25-34	159				
	35-44	56				
	45-54	59				
	55 ve üzeri	27				
Özgünlük ve Yerellik	18-24	114	3,863	,004	,002	35-44 > 18-24
	25-34	159				
	35-44	56				
	45-54	59				
	55 ve üzeri	27				
Standart ve Kalite Bilinci	18-24	114	4,736	,001	,094	35-44 > 25-34
	25-34	159				
	35-44	56				
	45-54	59				
	55 ve üzeri	27				

Özellikle 35-44 yaş aralığındaki katılımcıların; Duygusal Tatmin ve İmaj (X=4,28), Özgünlük ve Yerellik (X=4,29) ve Standart ve Kalite Bilinci (X=3,71) boyutlarında en yüksek ortalamalara sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, orta yaş grubundaki tüketicilerin coğrafi işaretli ürünlerin taşıdığı geleneksel ve niteliksel değerlere karşı daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Öte yandan, 55 yaş ve üzeri grubun Farkındalık (X=3,02) ve Satın Alma Eğilimi (X=3,15) boyutlarında en düşük puanları alması dikkat çekicidir.

Varyansların homojenliği testi (Levene) incelendiğinde, bazı boyutlarda (Farkındalık, İmaj, Özgünlük) varyansların eşit dağılmadığı ($p < 0,05$) görülmüştür. Bu boyutlar için daha güçlü bir test olan Welch testi sonuçları kontrol edilmiş ve anlamlılığın devam ettiği saptanmıştır ($p < 0,05$). Elde edilen sonuçlar, yaş değişkeninin coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumları üzerinde belirleyici bir demografik faktör olduğunu, özellikle genç ve orta yaş gruplarının bu ürünlere yönelik farkındalık ve ilginin odak noktasını oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Katılımcıların eğitim düzeylerine göre coğrafi işaretli ürünlere yönelik algılarını inceleyen ANOVA sonuçları; Farkındalık (F=8,712; p=,000), Duygusal Tatmin ve İmaj (F=11,206; p=,000), Satın Alma Eğilimi (F=7,108; p=,000), Özgünlük ve Yerellik (F=6,730; p=,000) ve Standart ve Kalite Bilinci (F=6,714; p=,000) olmak üzere tüm boyutlarda gruplar arasında istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Analiz sonuçları, eğitim seviyesi yükseldikçe coğrafi işaretli ürünlere yönelik farkındalığın ve olumlu tutumun doğrusal bir artış gösterdiğine işaret etmektedir.

Tablo 9. Eğitim Düzeyleri ile Araştırma Değişkenleri Arasında ANOVA Testi

Faktör	Eğitim Düzeyi	N	$\bar{X}$	S.S.	F	p	Levene (p)	Fark (Post-Hoc)
Farkındalık	İlkokul	31	2,62	,82	8,712	,000	,098	Lisansüstü, Lisans, Önlisans > İlkokul
	Ortaokul	18	3,61	,80				
	Lise	68	3,49	,94				
	Önlisans	51	3,57	,58				
	Lisans	219	3,60	,85				
	Lisansüstü	28	3,91	,92				
Duygusal Tatmin ve İmaj	İlkokul	31	3,45	,99	11,206	,000	,000	Lisansüstü, Lisans, Önlisans > İlkokul & Ortaokul
	Ortaokul	18	3,66	1,02				
	Lise	68	3,88	,80				
	Önlisans	51	4,03	,55				
	Lisans	219	4,23	,54				
	Lisansüstü	28	4,34	,63				
Satın Alma Eğilimi ve Güven	İlkokul	31	2,76	,89	7,108	,000	,193	Lisans, Önlisans, Lise > İlkokul
	Ortaokul	18	3,10	,85				
	Lise	68	3,38	,89				
	Önlisans	51	3,57	,66				
	Lisans	219	3,59	,74				
	Lisansüstü	28	3,54	,87				
Özgünlük ve Yerellik	İlkokul	31	3,41	,96	6,730	,000	,000	Lisans, Lisansüstü, Önlisans > İlkokul
	Ortaokul	18	3,84	,92				
	Lise	68	3,82	,96				
	Önlisans	51	3,98	,66				
	Lisans	219	4,17	,66				

	Lisansüstü	28	4,07	,78				
Standart ve Kalite Bilinci	İlkokul	31	2,80	,90	6,714	,000	,075	Lisansüstü, Lisans > İlkokul
	Ortaokul	18	3,06	,98				
	Lise	68	3,47	,90				
	Önlisans	51	3,46	,60				
	Lisans	219	3,54	,68				
	Lisansüstü	28	3,71	,80				

Betimsel istatistikler incelendiğinde, en yüksek ortalamaların genellikle lisans ve lisansüstü mezunlarında toplandığı görülmektedir. Özellikle Duygusal Tatmin ve İmaj boyutunda lisansüstü mezunları (X=4,34) ve lisans mezunları (X=4,23), ilkokul mezunlarına (X=3,45) göre çok daha yüksek bir memnuniyet ve değer algısına sahiptir. Benzer şekilde, coğrafi işaret farkındalığı noktasında lisansüstü seviyesindeki katılımcılar (X=3,91) en bilinçli grubu oluşturmaktadır. İlkokul mezunu katılımcıların tüm boyutlarda en düşük ortalamalara sahip olması, coğrafi işaret sisteminin eğitim düzeyi düşük kitlelere yeterince nüfuz edemediğini göstermektedir.

Duygusal Tatmin ve İmaj ile Özgünlük boyutlarında varyansların homojen dağılmadığı ($p < ,05$) saptanmış, ancak bu durum için uygulanan Welch testi de anlamlılığın devam ettiğini ($p = ,000$) teyit etmiştir. Bu bulgular, eğitim düzeyinin coğrafi işaretli ürün pazarında en belirleyici demografik değişkenlerden biri olduğunu; ürünlerin yüksek eğitimli kitleler nezdinde bir "kalite ve özgünlük simgesi" olarak karşılık bulduğunu göstermektedir.

Katılımcıların meslek gruplarına göre coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutumlarını belirlemek amacıyla yapılan ANOVA sonuçları; Duygusal Tatmin ve İmaj (F=2,297; p=,034), Satın Alma Eğilimi (F=6,930; p=,000) ve Standart ve Kalite Bilinci (F=4,181; p=,000) boyutlarında gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşın Farkındalık ve Özgünlük boyutlarında mesleki açıdan anlamlı bir farklılaşma saptanmamıştır ($p>0,05$).

Tablo 10. Meslek Grubu ile Araştırma Değişkenleri Arasında ANOVA Testi

Faktör	Meslek Grubu	N	$\bar{X}$	S.S.	F	p	Levene (p)	Fark (Post-Hoc)
Farkındalık	Öğrenci	127	3,56	,83	1,084	,371	,001	-
	Kamu Çalışanı	94	3,52	,96				
	Özel Sektör	76	3,55	,86				
	Esnaf/Serbest Meslek	38	3,25	,76				
	Ev Hanımı	64	3,52	1,00				
	Emekli	9	3,94	,34				
	Diğer	7	3,78	,26				
Duygusal Tatmin ve İmaj	Öğrenci	127	4,06	,67	2,297	,034	,008	Kamu Çal. > Esnaf
	Kamu Çalışanı	94	4,22	,59				
	Özel Sektör	76	3,95	,90				
	Esnaf/Serbest Meslek	38	3,82	,53				
	Ev Hanımı	64	4,11	,76				
	Emekli	9	4,30	,34				
	Diğer	7	4,33	,46				
Satın Alma Eğilimi ve Güven	Öğrenci	127	3,66	,67	6,930	,000	,000	Öğrenci, Kamu Çal. > Esnaf
	Kamu Çalışanı	94	3,50	,87				
	Özel Sektör	76	3,25	,73				
	Esnaf/Serbest Meslek	38	2,87	,52				
	Ev Hanımı	64	3,52	1,01				
	Emekli	9	3,73	,62				
	Diğer	7	4,10	,64				
Özgünlük ve Yerellik	Öğrenci	127	3,99	,80	1,113	,354	,066	-
	Kamu Çalışanı	94	4,10	,68				
	Özel Sektör	76	3,87	,91				
	Esnaf/Serbest Meslek	38	3,94	,76				
	Ev Hanımı	64	4,14	,80				
	Emekli	9	4,02	,65				
	Diğer	7	4,34	,47				
Standart ve Kalite Bilinci	Öğrenci	127	3,55	,71	4,181	,000	,000	Öğrenci, Kamu Çal. > Esnaf
	Kamu Çalışanı	94	3,51	,75				
	Özel Sektör	76	3,28	,74				
	Esnaf/Serbest Meslek	38	2,99	,49				
	Ev Hanımı	64	3,55	1,03				
	Emekli	9	3,86	,43				
	Diğer	7	3,78	,46				

Analiz bulguları detaylı incelendiğinde; özellikle Satın Alma Eğilimi ve Standart ve Kalite Bilinci boyutlarında "Öğrenci" ve "Kamu Çalışanı" gruplarının ortalamalarının, "Esnaf ve Serbest Meslek" grubuna göre anlamlı derecede yüksek olduğu görülmektedir. Esnaf grubunun

Satın Alma Eğilimi (X=2,87) ve Standart ve Kalite Bilinci (X=2,99) puanları, ölçek genelindeki en düşük değerler olarak dikkat çekmektedir. Duygusal Tatmin ve İmaj boyutunda ise Kamu Çalışanları (X=4,22) en yüksek olumlu algıya sahip gruptur.

Birçok boyutta varyansların homojen dağılmadığı (Levene p <,05) saptanmış, bu nedenle analiz sonuçları Welch testi ile çapraz kontrol edilmiştir. Welch testi sonuçları, özellikle Farkındalık (p=,007), Duygusal Tatmin ve İmaj (p=,006), Satın Alma Eğilimi (p=,000) ve Standart ve Kalite Bilinci (p=,000) boyutlarındaki farklılıkların istatistiksel olarak son derece dirençli ve anlamlı olduğunu doğrulamıştır. Bu sonuçlar, mesleki statünün ve çalışma hayatındaki konumun, coğrafi işaretli ürünlerin kalite standartlarına duyulan güven ve bu ürünleri tercih etme motivasyonu üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

Katılımcıların aylık gelir düzeylerine göre coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutumlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) sonuçları; Satın Alma Eğilimi ve Güven (F=10,069; p=,000), Özgünlük ve Yerellik (F=3,385; p=,018) ve Standart ve Kalite Bilinci (F=2,992; p=,031) boyutlarında gelir grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğunu saptamıştır. Buna karşın, Farkındalık ve Duygusal Tatmin ve İmaj boyutlarında gelir düzeyine bağlı anlamlı bir değişim gözlenmemiştir (p>0,05).

Tablo 11. Gelir Grubu ile Araştırma Değişkenleri Arasında ANOVA Testi

Faktör	Gelir Grubu	N	$\bar{X}$	S.S.	F	p	Levene (p)	Fark (Post-Hoc)
Farkındalık	10.000-30.000 TL	183	3,51	,88	1,562	,198	,560	-
	30.001-50.000 TL	66	3,45	,80				
	50.001-70.000 TL	93	3,47	,95				
	70.000 TL ve Üzeri	73	3,72	,84				
Duygusal Tatmin ve İmaj	10.000-30.000 TL	183	4,01	,73	1,763	,154	,042	-
	30.001-50.000 TL	66	4,01	,84				
	50.001-70.000 TL	93	4,13	,52				
	70.000 TL ve Üzeri	73	4,21	,70				
Satın Alma Eğilimi ve Güven	10.000-30.000 TL	183	3,65	,80	10,069	,000	,343	10-30k > 50-70k
	30.001-50.000 TL	66	3,36	,80				
	50.001-70.000 TL	93	3,11	,77				
	70.000 TL ve Üzeri	73	3,55	,77				
Özgünlük ve Yerellik	10.000-30.000 TL	183	3,94	,80	3,385	,018	,039	50-70k > Diğerleri
	30.001-50.000 TL	66	3,94	,93				
	50.001-70.000 TL	93	4,24	,66				
	70.000 TL ve Üzeri	73	3,98	,72				
Standart ve Kalite Bilinci	10.000-30.000 TL	183	3,52	,83	2,992	,031	,145	70k+ > 50-70k

	30.001-50.000 TL	66	3,41	,73				
	50.001-70.000 TL	93	3,26	,66				
	70.000 TL ve Üzeri	73	3,57	,77				

Bulgular detaylandırıldığında, gelir düzeyi ile tutumlar arasında doğrusal olmayan, ilginç bir etkileşim göze çarpmaktadır. Satın Alma Eğilimi boyutunda en yüksek ortalamaya 10.000-30.000 TL gelir grubundaki katılımcıların (X=3,65) sahip olduğu, en düşük eğilimin ise 50.001-70.000 TL grubunda (X=3,11) toplandığı görülmektedir. Buna tezat olarak Özgünlük ve Yerellik algısında 50.001-70.000 TL gelir grubu (X=4,24) en yüksek duyarlılığı sergilemektedir. Bu durum, orta-üst gelir grubunun ürünlerin özgünlüğüne değer vermesine rağmen, satın alma noktasında daha temkinli veya seçici olabileceğine işaret etmektedir. En yüksek gelir grubu olan 70.000 TL ve üzeri katılımcılar ise ürünün standart ve kalitesine en fazla güvenen (X=3,57) kitleyi oluşturmaktadır.

Varyansların homojenliği testi sonucunda Duygusal Tatmin ve İmaj ve Özgünlük boyutlarında homojenlik sağlanamamış (Levene p<,05), ancak bu boyutlar için uygulanan Welch testi özellikle Özgünlük (p=,007) ve Satın Alma Eğilimi (p=,000) boyutlarındaki anlamlılığın istatistiksel olarak güçlü olduğunu doğrulamıştır. Özetle, ekonomik gücün artması veya azalması tüketicilerin coğrafi işaretli ürünlerden beklentilerini (özgünlük vs. güven) ve bu ürünlere yönelik haruma motivasyonlarını farklı yönlerde etkilemektedir.

Katılımcıların Ahlat'ta ikamet sürelerine göre coğrafi işaretli ürünlere yönelik algılarını belirlemek amacıyla yapılan ANOVA analizi sonucunda; Farkındalık (F=3,173; p=,014), Duygusal Tatmin ve İmaj (F=5,058; p=,001), Satın Alma Eğilimi (F=3,140; p=,015), Özgünlük ve Yerellik (F=9,463; p=,000) ve Standart ve Kalite Bilinci (F=2,765; p=,027) boyutlarının tamamında gruplar arası anlamlı farklılıklar saptanmıştır.

Tablo 12. Ahlatta İkamet Süresi ile Araştırma Değişkenleri Arasında ANOVA Testi

Faktör	İkamet Süresi	N	X⁻	S.S.	F	p	Levene (p)	Fark (Post-Hoc)
Farkındalık	1 yıldan az	145	3,51	,77	3,173	,014	,000	6-10 Yıl > Doğduğundan Beri
	1-5 yıl	109	3,56	,79				
	6-10 yıl	67	3,75	,92				
	11 yıl ve üzeri	37	3,62	,99				
	Doğduğundan beri	57	3,21	1,08				
Duygusal Tatmin ve İmaj	1 yıldan az	145	4,03	,74	5,058	,001	,000	1-5 & 6-10 Yıl > Doğduğundan Beri
	1-5 yıl	109	4,21	,55				
	6-10 yıl	67	4,25	,42				
	11 yıl ve üzeri	37	3,94	,73				
	Doğduğundan beri	57	3,78	,98				
Satın Alma Eğilimi	1 yıldan az	145	3,63	,75	3,140	,015	,013	1 Yıldan Az > Doğduğundan Beri
	1-5 yıl	109	3,46	,73				
	6-10 yıl	67	3,41	,79				
	11 yıl ve üzeri	37	3,27	,99				
	Doğduğundan beri	57	3,25	,93				
Özgünlük / Yerellik	1 yıldan az	145	3,86	,80	9,463	,000	,000	6-10 Yıl > Tüm Gruplar
	1-5 yıl	109	4,03	,63				

	6-10 yıl	67	4,51	,58				
	11 yıl ve üzeri	37	3,98	1,00				
	Doğduğundan beri	57	3,82	,86				
Standart ve Kalite Bilinci	1 yıldan az	145	3,52	,69	2,765	,027	,000	6-10 Yıl > Doğduğundan Beri
	1-5 yıl	109	3,44	,76				
	6-10 yıl	67	3,54	,65				
	11 yıl ve üzeri	37	3,52	,99				
	Doğduğundan beri	57	3,15	,95				

Analiz bulguları, bölgeye dışarıdan gelip belirli bir süre ikamet edenler ile yerleşik halk arasında ters yönlü bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 6-10 yıl arası ikamet eden katılımcıların; Farkındalık (X=3,75), Duygusal Tatmin ve İmaj (X=4,25) ve Özgünlük (X=4,51) boyutlarında en yüksek ortalamalara sahip olduğu görülmektedir. Buna karşın, doğduğundan beri Ahlat'ta yaşayan katılımcıların tüm boyutlarda en düşük aritmetik ortalamaları sergilemesi dikkat çekicidir. Bu durum, yerel halkın coğrafi işaretli ürünleri "olağan/günlük" görmesi nedeniyle kanıksadığını, ancak bölgeye sonradan gelen ve orta vadeli ikamet edenlerin bu ürünlerin katma değerini ve özgünlüğünü daha yüksek algıladığını göstermektedir.

Varyansların homojenliği testi (Levene) tüm boyutlarda anlamlı çıkmış (p<,05), yani varyansların eşit dağılmadığı belirlenmiştir. Bu sebeple baz alınan Welch testi sonuçları incelendiğinde; Duygusal Tatmin ve İmaj (p=,001), Satın Alma Eğilimi (p=,028) ve Özgünlük (p=,000) boyutlarındaki anlamlılığın istatistiksel olarak korunduğu görülmüştür. Ancak Farkındalık (p=,061) ve Standart ve Kalite Bilinci (p=,091) boyutları Welch testine göre sınırda kalarak anlamlılığını yitirmiştir. Bu durum, ikamet süresinin özellikle ürünün imajı ve özgünlük algısı üzerinde ikna edici bir belirleyici olduğunu, ancak teknik bilgi ve genel farkındalık düzeyinde farkların daha homojen olabileceğini kanıtlamaktadır.

Araştırma kapsamında geliştirilen temel hipotez (H_1) ve demografik değişkenlere ilişkin alt hipotezlerin ($H_{1a} - H_{1f}$) test edilmesine yönelik gerçekleştirilen t-Testi, ANOVA ve Welch ANOVA analizlerinin sonuçları toplu olarak Tablo 13'te sunulmuştur.

Tablo 13. Araştırma Hipotezlerinin Test Sonuçları

Hipotez	Hipotez İfadesi	Kullanılan Analiz Yöntemi	p Değeri	Karar
H_1	Tüketici tutumları demografik değişkenlere göre anlamlı farklılık göstermektedir.	t-Testi / Welch ANOVA	$p < 0,05$	**Kısmen Kabul**
H_{1a}	Tüketici tutumları cinsiyete göre anlamlı farklılık göstermektedir.	Bağımsız Örneklem t-Testi	$p > 0,05$	**Red**
H_{1b}	Tüketici tutumları yaşa göre anlamlı farklılık göstermektedir.	Welch ANOVA (Games-Howell)	$p < 0,05$	**Kabul**
H_{1c}	Tüketici tutumları eğitim düzeyine göre anlamlı farklılık göstermektedir.	Welch ANOVA (Games-Howell)	$p < 0,05$	**Kabul**
H_{1d}	Tüketici tutumları mesleğe göre anlamlı farklılık göstermektedir.	Tek Yönlü ANOVA (Tukey)	$p < 0,05$	**Kabul**
H_{1e}	Tüketici tutumları gelir düzeyine göre anlamlı farklılık göstermektedir.	Welch ANOVA (Games-Howell)	$p < 0,05$	**Kabul**
H_{1f}	Tüketici tutumları ikamet süresine göre anlamlı farklılık göstermektedir.	Welch ANOVA (Games-Howell)	$p < 0,05$	**Kısmen Kabul**

5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu araştırmada Ahlat ilçesinde yaşayan tüketicilerin coğrafi işaretli (Cİ) gıda ürünlerine yönelik tutumları incelenmiş ve tüketici değerlendirmelerinin çok boyutlu bir yapı sergilediği ortaya konulmuştur. Gerçekleştirilen açımlayıcı faktör analizi sonucunda tüketici tutumlarının "duygusal tatmin ve imaj", "satın alma eğilimi ve güven", "özgünlük ve yerellik", "farkındalık" ile "standart ve kalite bilinci" olmak üzere beş boyut altında toplandığı belirlenmiştir. Bu bulgu, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici değerlendirmelerinin yalnızca kalite algısıyla sınırlı olmadığını; aynı zamanda kültürel aidiyet, güven, yerellik ve sembolik anlamlar üzerinden şekillendiğini göstermektedir. Literatürde coğrafi işaretli ürünlerin tüketici zihninde kalite göstergesi, güven unsuru ve kültürel kimlik taşıyıcısı olarak değerlendirildiği belirtilmektedir (Aprile vd., 2012; Fernández-Zarza vd., 2021). Bu çalışmanın sonuçları da söz konusu çok boyutlu yapıyı desteklemektedir.

Demografik değişkenler açısından elde edilen bulgular, tüketici tutumlarının homojen bir yapı sergilemediğini ve belirli gruplar arasında anlamlı farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. Cinsiyet değişkenine göre herhangi bir anlamlı farklılık tespit edilmemesi, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutumların toplumsal cinsiyetten bağımsız olarak benzer bir eğilim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Buna karşın yaş değişkeni, tüm tutum boyutları üzerinde anlamlı farklılık yaratan önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Özellikle orta yaş grubundaki bireylerin coğrafi işaretli ürünlere yönelik daha yüksek düzeyde olumlu tutumlara sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, geleneksel değerler ile kalite algısı arasındaki ilişkinin yaşla birlikte güçlenebileceğine işaret etmektedir.

Eğitim düzeyi değişkeni, araştırmanın en dikkat çekici bulgularından birini oluşturmaktadır. Eğitim seviyesi yükseldikçe, coğrafi işaretli ürünlere yönelik farkındalık, kalite algısı ve olumlu tutumların artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, coğrafi işaret sisteminin daha çok bilinçli tüketici grupları tarafından benimsendiğini ve eğitim düzeyinin bu süreçte belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Benzer şekilde meslek grupları arasında da özellikle kamu çalışanları ve öğrencilerin, esnaf ve serbest meslek grubuna kıyasla daha yüksek satın alma eğilimi ve kalite bilincine sahip oldukları belirlenmiştir.

Gelir düzeyi açısından elde edilen bulgular ise doğrusal olmayan bir yapı ortaya koymaktadır. Düşük ve orta gelir grubundaki bireylerin satın alma eğiliminin daha yüksek olduğu, buna karşın orta-üst gelir grubunun özgünlük ve yerellik boyutuna daha fazla önem verdiği görülmektedir. En yüksek gelir grubundaki bireylerin ise kalite ve standartlara yönelik güven düzeylerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, farklı gelir gruplarının coğrafi işaretli ürünlerden beklentilerinin farklılaştığını ve tüketici davranışlarının yalnızca ekonomik güçle açıklanamayacağını göstermektedir.

Medeni durum değişkenine göre yapılan analizlerde, evli bireylerin farkındalık, duygusal tatmin ve kalite bilinci gibi boyutlarda daha yüksek ortalamalara sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak satın alma eğilimi ve güven boyutunda anlamlı bir farklılık bulunmaması, bilişsel ve duygusal değerlendirmelerin davranışsal eğilimlere her zaman doğrudan yansımadığını ortaya koymaktadır.

Araştırmada ortaya çıkan "duygusal tatmin ve imaj" boyutunun yüksek ortalamalara sahip olması, tüketicilerin coğrafi işaretli ürünleri yalnızca fonksiyonel ürünler olarak değil, aynı zamanda kimlik ve aidiyet unsuru olarak değerlendirdiğini göstermektedir. Bu sonuç, yerel ürünlerin kültürel temsil gücüne vurgu yapan Sims (2009) ve Guerrero vd. (2009) ile paralellik göstermektedir. Özellikle üretim coğrafyasında yaşayan bireylerin coğrafi işaretli ürünlere yönelik olumlu duygusal bağ geliştirmesi, yerel kimlik ve kültürel miras ile ilişkilendirilebilir. Ahlat gibi tarihsel ve kültürel kimliği güçlü bölgelerde bu bağın daha belirgin olması beklenen

bir durumdur. Nitekim Merle vd. (2016), ürünlerin yerel köken bilgisinin tüketici algısında otantiklik ve güven hissini artırdığını belirtmektedir.

Araştırmada "satın alma eğilimi ve güven" boyutunun önemli bir faktör olarak ortaya çıkması, coğrafi işaretlerin tüketici açısından bir güven mekanizması olarak işlev gördüğünü göstermektedir. Bu bulgu, tüketicilerin kalite belirsizliğini azaltmak amacıyla coğrafi işaret etiketlerini bir kalite sinyali olarak değerlendirdiğini ileri süren Dimara ve Skuras (2003) ile uyumludur. Benzer şekilde Chen (2021), coğrafi işaret etiketlerinin davranışsal niyet üzerinde pozitif etkiler oluşturduğunu belirtmektedir. Araştırmada güven unsurunun satın alma eğilimiyle birlikte aynı faktörde toplanması, tüketicilerin coğrafi işaretli ürünleri tercih ederken kalite güvencesine önem verdiğini göstermektedir. Bu durum Planlı Davranış Teorisi çerçevesinde değerlendirildiğinde, güven unsurunun tutumları güçlendirerek davranışsal niyet üzerinde etkili olduğu şeklinde yorumlanabilir (Ajzen, 1991).

Araştırma sonuçlarında "özgünlük ve yerellik" boyutunun güçlü biçimde ortaya çıkması da dikkat çekicidir. Coğrafi işaretli ürünlerin belirli bir coğrafi bölgeyle özdeşleşmiş olması, tüketicilerin bu ürünleri daha otantik ve geleneksel olarak değerlendirmesine yol açmaktadır. Fernández-Ferrín vd. (2019), coğrafi işaretli ürünlerin geleneksellik ve bölgesel kimlik ile ilişkilendirildiğini belirtmektedir. Bu araştırmada da tüketicilerin özgünlük algısının yüksek olması, Ahlat'taki yerel tüketicilerin ürünleri kültürel mirasın bir parçası olarak değerlendirdiğini düşündürmektedir. Özellikle üretim coğrafyasında yaşayan bireylerin ürünlerle kurduğu kültürel bağın daha güçlü olması, yerel tüketici perspektifinin önemini ortaya koymaktadır.

Araştırmada cinsiyet değişkenine göre anlamlı farklılık bulunmaması, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tutumların kadın ve erkek tüketiciler arasında benzer biçimde şekillendiğini göstermektedir. Bu sonuç, Bryła (2017) ve Likoudis vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarla paralellik göstermektedir. Literatürde bazı araştırmalar kadın tüketicilerin gıda kalite işaretlerine daha duyarlı olduğunu belirtse de, bu araştırmada cinsiyet temelinde anlamlı bir ayrışma görülmemesi dikkat çekicidir. Bu durum, coğrafi işaretli ürünlerin toplumsal olarak geniş kabul gören kalite göstergeleri hâline geldiğini düşündürmektedir.

Araştırmada yaş değişkenine göre anlamlı farklılıkların ortaya çıkması ise dikkat çekici bulgulardan biridir. Özellikle 35–44 yaş grubunun duygusal tatmin, özgünlük ve kalite bilinci boyutlarında daha yüksek ortalamalara sahip olması, orta yaş grubunun geleneksel ve yerel ürünlere yönelik daha güçlü değerlendirmeler geliştirdiğini göstermektedir. Bu sonuç, Hristov vd. (2023) ve Kovács vd. (2022) tarafından elde edilen bulgularla örtüşmektedir. Orta yaş grubundaki bireylerin hem ekonomik satın alma gücüne sahip olması hem de geleneksel değerlere daha duyarlı olması bu sonucu açıklayabilir. Buna karşılık ileri yaş grubunda farkındalık düzeyinin düşük olması, coğrafi işaret sisteminin tanıtım eksikliğiyle ilişkili olabilir.

Eğitim düzeyine ilişkin bulgular, araştırmanın en belirgin sonuçlarından birini oluşturmaktadır. Eğitim düzeyi yükseldikçe coğrafi işaretli ürünlere yönelik farkındalık, kalite algısı ve olumlu tutumların arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç, Janssen ve Hamm (2012), Bryła (2017) ve Muça vd. (2021) tarafından elde edilen bulgularla tutarlıdır. Eğitim seviyesi yüksek bireylerin ürün etiketlerini daha bilinçli değerlendirmesi ve kalite işaretlerine daha fazla önem vermesi beklenen bir durumdur. Özellikle lisans ve lisansüstü mezunlarının coğrafi işaretli ürünleri kalite ve özgünlük göstergesi olarak algılaması, bilinçli tüketim davranışlarıyla ilişkilendirilebilir. Bu bulgu aynı zamanda coğrafi işaret sisteminin düşük eğitim düzeyine sahip tüketicilere yeterince ulaşamadığını göstermektedir.

Meslek değişkenine göre elde edilen farklılıklar da önemli sonuçlar sunmaktadır. Kamu çalışanları ve öğrencilerin satın alma eğilimi ile kalite bilinci boyutlarında daha yüksek

ortalamalara sahip olması, bilgi düzeyi ve kurumsal farkındalık ile ilişkili olabilir. Buna karşılık esnaf ve serbest meslek grubunun daha düşük ortalamalara sahip olması, fiyat hassasiyeti ve pragmatik tüketim yaklaşımıyla açıklanabilir. Bonnet ve Simioni (2001), fiyat artışlarının bazı tüketici gruplarında talebi azaltabileceğini belirtmektedir. Bu çalışmada da özellikle esnaf grubunun kalite yerine ekonomik değerlendirmeleri öncelemiş olabileceği düşünülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarının çok boyutlu ve demografik özelliklere duyarlı bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, özellikle eğitim, yaş ve meslek gibi değişkenlerin tüketici davranışlarının şekillenmesinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, coğrafi işaretli ürünlerin tanıtım ve pazarlama stratejilerinde hedef kitleye özgü yaklaşımların geliştirilmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Özellikle düşük eğitim düzeyine sahip gruplara yönelik farkındalık artırıcı bilgilendirme faaliyetlerinin önemi ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, coğrafi işaretli ürünlere yönelik tüketici tutumlarını yerel tüketici perspektifinden ele alarak literatüre katkı sunmakta ve bu ürünlerin sürdürülebilirliği ile yerel kalkınma açısından önemli çıkarımlar sağlamaktadır. Gelecek araştırmalarda, tüketici tutumlarının davranışsal sonuçlarla ilişkisini inceleyen nedensel modellerin geliştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Acar, Y. (2023). Evaluation of Geographical Indication Products in Turkey within the Scope of Destination Branding. *Journal of Tourism & Gastronomy Studies*, *6*(2), 163–177. Retrieved from https://jotags.net/index.php/jotags/article/view/390

Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational behavior and human decision processes*, *50*(2), 179-211. https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T

Ajzen, I. (2002). Perceived behavioral control, self-efficacy, locus of control, and the theory of planned behavior 1. *Journal of applied social psychology*, *32*(4), 665-683. https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.2002.tb00236.x

Ajzen, I., & Fishbein, M. (1972). Attitudes and normative beliefs as factors influencing behavioral intentions. *Journal of personality and social psychology*, *21*(1), 1. https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/h0031930

Aprile, M. C., Caputo, V., & Nayga Jr, R. M. (2012). Consumers' valuation of food quality labels: the case of the European geographic indication and organic farming labels. *International Journal of Consumer Studies*, *36*(2), 158-165. https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2011.01092.x

Bagozzi, R. P., Baumgartner, J., & Yi, Y. (1989). An investigation into the role of intentions as mediators of the attitude-behavior relationship. *Journal of Economic psychology*, *10*(1), 35-62. https://doi.org/10.1016/0167-4870(89)90056-1

Barham, E. (2003). Translating terroir: the global challenge of French AOC labeling. *Journal of rural studies*, *19*(1), 127-138. https://doi.org/10.1016/S0743-0167(02)00052-9

Barroga, E., & Matanguihan, G. J. (2022). A practical guide to writing quantitative and qualitative research questions and hypotheses in scholarly articles. *Journal of Korean medical science*, *37*(16). https://doi.org/10.3346/jkms.2022.37.e121

Belletti, G., & Marescotti, A. (2011). Origin products, geographical indications and rural development. In *Labels of origin for food: Local development, global recognition* (pp. 75-91). Wallingford UK: CAB International.

Björk P, Kauppinen-Räisänen H (2016), "Local food: a source for destination attraction". *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, Vol. 28 No. 1 pp. 177–194, doi: https://doi.org/10.1108/IJCHM-05-2014-0214

Bonnet, C., & Simioni, M. (2001). Assessing consumer response to protected designation of origin labelling: a mixed multinomial logit approach. *European Review of Agricultural Economics*, *28*(4), 433-449. https://doi.org/10.1093/erae/28.4.433

Bowen, S. (2010). Embedding local places in global spaces: Geographical indications as a territorial development strategy. *Rural Sociology*, *75*(2), 209-243. https://doi.org/10.1111/j.1549-0831.2009.00007.x

Bowen, S., & Zapata, A. V. (2009). Geographical indications, terroir, and socioeconomic and ecological sustainability: The case of tequila. *Journal of rural studies*, *25*(1), 108-119. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2008.07.003

Bramley, C., Biénabe, E., & Kirsten, J. (2009). The economics of geographical indications: towards a conceptual framework for geographical indication research in developing countries. *The economics of intellectual property*, *1*, 109-141.

Bryła, P. (2017). The perception of EU quality signs for origin and organic food products among Polish consumers. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, *9*(3), 345-355. https://doi.org/10.3920/QAS2016.1038

Chaudhuri, A., & Holbrook, M. B. (2001). The chain of effects from brand trust and brand affect to brand performance: the role of brand loyalty. *Journal of marketing*, *65*(2), 81-93. https://doi.org/10.1509/jmkg.65.2.81.18255

Chen, C. F., & Chen, F. S. (2010). Experience quality, perceived value, satisfaction and behavioral intentions for heritage tourists. *Tourism management*, *31*(1), 29-35. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2009.02.008

Chen, N. H. (2021). Geographical indication labelling of food and behavioural intentions. *British Food Journal*, *123*(12), 4097-4115. https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2020-0552

Çekiç, İ., Bulut, Z., & Oğan, Y. (2023). Coğrafi İşaretli Ürünlere İlişkin Yerli Turist Tutumları Üzerine Bir İnceleme. *Artvin Çoruh Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, *9*(1), 242-255. https://doi.org/10.22466/acusbd.1296449

Dimara, E., & Skuras, D. (2003). Consumer evaluations of product certification, geographic association and traceability in Greece. *European journal of marketing*, *37*(5-6), 690-705. https://doi.org/10.1108/03090560310465099

Edmonds, W. A., & Kennedy, T. D. (2016). *An applied guide to research designs: Quantitative, qualitative, and mixed methods*. Sage publications.

Erdem, T., & Swait, J. (2004). Brand credibility, brand consideration, and choice. *Journal of consumer research*, *31*(1), 191-198. https://doi.org/10.1086/383434

Etikan, I., Musa, S. A., & Alkassim, R. S. (2015). Comparison of Convenience Sampling and Purposive Sampling. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, *5*(1), 1-4. https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20160501.11

Fernández-Zarza, M., Amaya-Corchuelo, S., Belletti, G., & Aguilar-Criado, E. (2021). Trust and Food Quality in the Valorisation of Geographical Indication Initiatives. *Sustainability*, *13*(6), 3168. https://doi.org/10.3390/su13063168

Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage publications limited.

Gangjee, D. (2012). *Relocating the law of geographical indications* (Vol. 15). Cambridge university press.

George, D., & Mallery, P. (1999). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference*. Allyn & Bacon.

Giovannucci, D., Josling, T. E., Kerr, W., O'Connor, B., & Yeung, M. T. (2009). *Guide to Geographical Indications: Linking products and their origins* (p. 232). Geneva: International trade centre.

Gliem, J. A., & Gliem, R. R. (2003). Calculating, interpreting, and reporting Cronbach's alpha reliability coefficient for Likert-type scales. Midwest research-to-Practice Conference in Adult, Continuing, and community education. https://hdl.handle.net/1805/344

Grunert, K. G. (2005). Food quality and safety: consumer perception and demand. *European review of agricultural economics*, *32*(3), 369-391. https://doi.org/10.1093/eurrag/jbi011

Guerrero, L., Guàrdia, M. D., Xicola, J., Verbeke, W., Vanhonacker, F., Zakowska-Biemans, S., ... & Hersleth, M. (2009). Consumer-driven definition of traditional food products and innovation in traditional foods. A qualitative cross-cultural study. *Appetite*, *52*(2), 345-354. https://doi.org/10.1016/j.appet.2008.11.008

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis* (, Ill.; 8th ed.). Cengage.

Harwell, M. R. (2011). Research design in qualitative/quantitative/mixed methods. *The Sage handbook for research in education: Pursuing ideas as the keystone of exemplary inquiry*, *2*, 147-164.

Hristov, H., Erjavec, K., Pravst, I., Juvančič, L., & Kuhar, A. (2023). Identifying Differences in Consumer Attitudes towards Local Foods in Organic and National Voluntary Quality Certification Schemes. *Foods*, *12*(6), 1132. https://doi.org/10.3390/foods12061132

Janssen, M., & Hamm, U. (2012). Product labelling in the market for organic food: Consumer preferences and willingness-to-pay for different organic certification logos. *Food quality and preference*, *25*(1), 9-22. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.12.004

Konuk, F. A. (2018). The role of store image, perceived quality, trust and perceived value in predicting consumers' purchase intentions towards organic private label food. *Journal of retailing and consumer services*, *43*, 304-310. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2018.04.011

Kovács, I., Balázsné Lendvai, M., & Beke, J. (2022). The Importance of Food Attributes and Motivational Factors for Purchasing Local Food Products: Segmentation of Young Local Food Consumers in Hungary. *Sustainability*, *14*(6), 3224. https://doi.org/10.3390/su14063224

Lichtenstein, D. R., Ridgway, N. M., & Netemeyer, R. G. (1993). Price perceptions and consumer shopping behavior: a field study. *Journal of marketing research*, *30*(2), 234-245. https://doi.org/10.1177/002224379303000208

Likoudis, Z., Sdrali, D., Costarelli, V., & Apostolopoulos, C. (2016). Consumers' intention to buy protected designation of origin and protected geographical indication foodstuffs: the case of G reece. *International Journal of Consumer Studies*, *40*(3), 283-289. https://doi.org/10.1111/ijcs.12253

Lim, W. M. (2025). What Is Quantitative Research? An Overview and Guidelines. *Australasian Marketing Journal*, *33*(3), 325-348. https://doi.org/10.1177/14413582241264622

Loureiro, M. L., & McCluskey, J. J. (2000). Assessing consumer response to protected geographical identification labeling. *Agribusiness: An International Journal*, *16*(3), 309-320. https://doi.org/10.1002/1520-6297(200022)16:3%3C309::AID-AGR4%3E3.0.CO;2-G

Marsh, H. W., Hau, K. T., & Wen, Z. (2004). In Search of Golden Rules: Comment on Hypothesis-Testing Approaches to Setting Cutoff Values for Fit Indexes and Dangers in Overgeneralizing Hu and Bentler's (1999) Findings. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, *11*(3), 320–341. https://doi.org/10.1207/s15328007sem1103_2

Merle, A., Herault-Fournier, C., & Werle, C. O. C. (2016). The effects of indication of local geographical origin on food perceptions. *Recherche et Applications En Marketing (English Edition)*, *31*(1), 26-42. https://doi.org/10.1177/2051570715626367

Misra, D. P., Gasparyan, A. Y., Zimba, O., Yessirkepov, M., Agarwal, V., & Kitas, G. D. (2021). Formulating hypotheses for different study designs. *Journal of Korean Medical Science*, *36*(50), 1-9. https://doi.org/10.3346/jkms.2021.36.e338

Morgan, R. M., & Hunt, S. D. (1994). The commitment-trust theory of relationship marketing. *Journal of marketing*, *58*(3), 20-38. https://doi.org/10.1177/002224299405800302

Muça, E., Pomianek, I., & Peneva, M. (2022). The Role of GI Products or Local Products in the Environment—Consumer Awareness and Preferences in Albania, Bulgaria and Poland. *Sustainability*, *14*(1), 4. https://doi.org/10.3390/su14010004

Nunnally, J. C. (1975). Psychometric theory—25 years ago and now. *Educational researcher*, *4*(10), 7-21.

Oxenfeldt, A. R. (1980). Pricing: Making profitable decisions. *Journal of Marketing (pre-1986)*, *44*(000001), 107.

Saïdi, M., Ay, J.-S., Marette, S., & Martin, C. (2020). Willingness-to-Pay for Reshuffling Geographical Indications. *Journal of Wine Economics*, *15*(1), 95–111. doi:10.1017/jwe.2020.5

Sims, R. (2009). Food, place and authenticity: local food and the sustainable tourism experience. *Journal of Sustainable Tourism*, *17*(3), 321–336. https://doi.org/10.1080/09669580802359293

Sims, R. (2013). Food, place and authenticity: local food and the sustainable tourism experience. In *Taking food public* (pp. 475-490). Routledge.

Tabachnick, B. G., Fidell, L. S., & Ullman, J. B. (2007). *Using multivariate statistics* (Vol. 5, pp. 481-498). Boston, MA: pearson.

Teng C, Wang Y (2015), "Decisional factors driving organic food consumption: Generation of consumer purchase intentions". *British Food Journal*, Vol. 117 No. 3 pp. 1066–1081, doi: https://doi.org/10.1108/BFJ-12-2013-0361

Teuber R (2011), "Consumers' and producers' expectations towards geographical indications: Empirical evidence for a German case study". *British Food Journal*, Vol. 113 No. 7 pp. 900–918, doi: https://doi.org/10.1108/00070701111148423

Tregear, A., Arfini, F., Belletti, G., & Marescotti, A. (2007). Regional foods and rural development: The role of product qualification. *Journal of Rural studies*, *23*(1), 12-22. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2006.09.010

Türk Patent ve Marka Kurumu (2023). Coğrafi işaret istatistikleri. https://ci.turkpatent.gov.tr

Vecchio, R., & Annunziata, A. (2011). The role of PDO/PGI labelling in Italian consumers' food choices. *Agricultural economics review*, *12*(2). https://hdl.handle.net/11367/28857

Verbeke, W., & Ward, R. W. (2006). Consumer interest in information cues denoting quality, traceability and origin: An application of ordered probit models to beef labels. *Food quality and preference*, *17*(6), 453-467. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.05.010

Yüce, A., & Korucuk, N. (2021). Coğrafi İşaretli Ürünleri Satın Almaya Yönelik Tutum Ölçeği; Geçerlik ve Güvenirlik Çalışması. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, *12*(4), 3569–3581. Geliş tarihi gönderen https://www.isarder.org/index.php/isarder/article/view/1234

AURA: AÇIKLANABILIR KARAR DESTEĞI ILE PILOT BILIŞSEL İŞ YÜKÜNÜ AZALTMAYA YÖNELIK ADAPTIF KOKPIT ARAYÜZÜ

Burhan Şahin
Chief Engineer of Digital Moc-Up Management at Turkish Aerospace Industries, Ankara, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-8777-7925
Gamze Erkan
Maltepe University, Computer Engineering
ORCID ID: 0009-0009-4846-0042
Fatma Miray Öztürk
Sakarya University, Industrial Engineering
ORCID ID: 0009-0000-4092-5807
Sabiha Ecem Yılmaz
Akdeniz University, Artificial Intelligence and Data Engineering
ORCID ID: 0009-0007-6639-2202

ÖZET

Modern uçak kokpitleri, çok sayıda dağınık gösterge ve karmaşık kontrol panelleri barındırmakta; bu durum kritik uçuş aşamalarında görsel karmaşaya ve yüksek bilişsel iş yüküne yol açabilmektedir. Pilot üzerindeki bilgi aşırı yüklemesini azaltmak ve durumsal farkındalığı optimize etmek amacıyla bu çalışmada, senaryo-duyarlı akıllı bir karar destek ve gösterge çerçevesi sunan AURA (Adaptive Unified Responsive Assistant) sistemi önerilmektedir. Geliştirilen insan-makine arayüzü, birincil uçuş verilerini sabit bir Geniş Alan Ekranında bütünleştirmekte; Senaryolar, Trafik, Sistemler ve VR gibi tamamlayıcı görünümlere ise sabit bir gezinme rayı üzerinden erişilmektedir. Kural tabanlı mantık ve açıklanabilir yapay zekâ ilkeleriyle biçimlendirilmiş bir gerekçelendirme katmanı kullanan sistem, 14 operasyonel uçuş fazını ve 8 kritik arıza senaryosunu tanıyarak bilgi hiyerarşisini; standart prosedürlere dayalı göreve-yönelik rehberlik, senaryo tetiklemeli önem-tabanlı kesmeler ve ikisinin eş zamanlı göründüğü hibrit durumlar arasında yeniden kurgulamaktadır. Sistemin temel etkileşim mimarisi; pilotun mekânsal belleğini koruyan Dynamic Focus Mode, onay tabanlı dinamik görev kartları ve doğal dil tabanlı sesli komut entegrasyonuna dayanmaktadır. Bu bildiri; sistemin yazılım mimarisini, çok modlu etkileşim katmanını ve Sanal Gerçeklik (VR) uçuş simülatöründe uygulanması önerilen nesnel/öznel bir performans değerlendirme protokolünü sunmaktadır. Geliştirilen çalışır prototip, önerilen adaptif mimarinin havacılığın en katı kısıtı olan sabit panel yerleşimini ihlal etmeden bilgi hiyerarşisini yeniden düzenleyebildiğini göstermekte; pilotun bilişsel iş yükünü ve tehlike teşhis süresini azaltacağı öngörülmekte, bu öngörü önerilen protokolle sınanmayı beklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Kokpit, Geniş Alan Ekranı (LAD), İnsan-Makine Etkileşimi (HMI), Dynamic Focus Mode, Bilişsel İş Yükü, Durumsal Farkındalık, Sanal Gerçeklik (VR).

AURA: AN ADAPTIVE COCKPIT INTERFACE DESIGNED TO REDUCE PILOT COGNITIVE WORKLOAD THROUGH EXPLAINABLE DECISION SUPPORT

ABSTRACT

Modern aircraft cockpits incorporate numerous dispersed displays and complex control panels, which can induce visual clutter and elevated cognitive workload during critical flight phases. To mitigate information overload on flight crews and optimize situational awareness, this study proposes the AURA (Adaptive Unified Responsive Assistant) framework—a scenario-aware

smart cockpit interface. The developed Human-Machine Interface (HMI) consolidates primary flight data onto a fixed Large Area Display (LAD), while complementary views—Scenarios, Traffic, Systems, and VR among others—remain reachable through a persistent navigation rail. Built on rule-based logic and an Explainable-AI-inspired (XAI) presentation layer, the system recognizes 14 operational flight phases and 8 critical failure scenarios, restructuring information priorities across default phase-driven guidance, scenario-triggered priority interrupts, and hybrid states where both are shown at once. The core interaction model relies on the Dynamic Focus Mode to preserve spatial memory, confirmation-based dynamic task cards, and natural language voice command integration. This paper presents the reactive software architecture, the multi-modal interaction framework, and an objective/subjective evaluation protocol proposed for a Virtual Reality (VR) flight simulation environment. The resulting working prototype demonstrates that the proposed adaptive architecture can restructure information hierarchy without violating aviation's strictest constraint—fixed panel placement; it is hypothesized to reduce pilot cognitive workload and hazard detection latency, a hypothesis the proposed protocol is designed to test.

Keywords: Smart Cockpit, Large Area Display (LAD), Human-Machine Interface (HMI), Dynamic Focus Mode, Cognitive Workload, Situational Awareness, Virtual Reality (VR).

1. GİRİŞ

Modern havacılığın operasyonel karmaşıklığı katlanarak artmış, uçuş ekiplerinin rolünü manuel lövye kumandasından karmaşık sistem yöneticiliğine dönüştürmüştür (Lutnyk vd., 2025). Günümüz kokpitleri; aviyonik durum, navigasyon verileri ve motor parametrelerini görselleştirmek için büyük ölçüde Birincil Uçuş Göstergeleri (PFD) ve Çok Fonksiyonlu Göstergeleri (MFD) entegre eden "glass cockpit" mimarilerine dayanmaktadır (Tang vd., 2024). Bu gelişmelere rağmen, dağınık çoklu ekran arayüzleri insan-makine etkileşimi (HMI) açısından kritik sınırlar sunmaktadır. Stabil olmayan yaklaşmalar veya ani sistem arızaları gibi uçuşun yüksek tempolu aşamalarında, pilotlar yoğun bir görsel karmaşaya ve bilgi aşırı yüklemesine maruz kalmaktadır (Tang vd., 2024).

Önceliklendirilmemiş, statik ekran bölümleri üzerinde geniş görsel tarama (visual scanning) döngüleri yürütmenin yarattığı bilişsel sürtünme, durumsal farkındalığı zayıflatabilmekte ve insan güvenilirliği risklerini artırabilmektedir (Meng vd., 2021).

Arayüz yerleşimindeki dağınıklığı çözmek amacıyla, erken dönem mühendislik paradigması geleneksel optimizasyon sezgisellerini kullanarak sabit ve yerel ekran düzenlerine odaklanmıştır (Meng vd., 2021; Cao vd., 2022; Zhang & Zhao, 2023). Ancak modern bilişsel ergonomi, kokpit arayüzlerinin operasyonel çevrenin bağlamına göre koşullu olarak adapte olması gerektiğini savunmaktadır (Lutnyk vd., 2025).

Bağlama duyarlı dinamik asistanlar ve dijital bilişsel yardımcılar, pilotun bilişsel sınırlarını rahatlatmak için son yıllarda geçerli alternatifler olarak ortaya çıkmıştır (Lutnyk vd., 2025; Alomar & Shafqat, 2026). Yine de genel havacılıkta kullanılan bölünmüş dokunmatik ekranlar dahil olmak üzere mevcut aviyonik sistemlerin çoğu temel olarak statiktir; haritaları açmak, kontrol listelerini yeniden boyutlandırmak veya motor göstergelerini filtrelemek için pilotun manuel girdisine ihtiyaç duyarlar. Yoğun zihinsel iş yükü altında, bu manuel pencereler arası geçiş işlemi pilot için ek bir ikincil görev (secondary task) haline gelerek stresi paradoksal olarak artırmaktadır (Tang vd., 2024).

Bu eksikliği gidermek amacıyla, bu çalışma AURA (Adaptive Unified Responsive Assistant) adını verdiğimiz yenilikçi bir Senaryo-Duyarlı Adaptif Tek Ekranlı Kokpit Arayüzü sunmaktadır. AURA, bu çalışma kapsamında tarafımızca üretilmiş özgün bir isimlendirmedir; herhangi bir önceki sistemden veya endüstri standardından alınmamıştır. İsim, tasarımın dört

temel ilkesini yansıtacak şekilde seçilmiştir: sistem uçuş fazına ve senaryoya göre kendini yeniden şekillendirir (Adaptive), dağınık aviyonik verileri tek bir arayüzde toplar (Unified), olaylara ve pilot girdisine anlık olarak tepki verir (Responsive) ve kararı her zaman pilotta bırakarak yalnızca destekleyici bir rol üstlenir (Assistant).

Önerilen çerçeve, dağınık aviyonik verileri, uçuş fazlarını ve telemetriyi yorumlamak için kural tabanlı bir mantık kullanan tek, minimalist bir dokunmatik arayüzde bir araya getirmektedir. Kokpitte pilotun iş yükünü hafifletmeye yönelik yardımcı sistemlere olan ilgi, tek pilotlu operasyonlara ilişkin araştırmalarla birlikte son yıllarda belirgin biçimde artmıştır (Puca & Guglieri, 2024). Bu alanda insan merkezli tasarım yaklaşımıyla geliştirilen destek modellerinin, yaklaşma ve iniş senaryolarında pilot iş yükünü azalttığı raporlanmaktadır (Li vd., 2022). Bu bulgular, pilota doğru bilgiyi doğru anda sunan tasarım tercihlerinin iş yükü üzerinde belirleyici olabileceğine işaret etmektedir. AURA ise pilot sayısını azaltmayı değil, bu tasarım ilkesini mevcut ekibin yükünü hafifletmek için kullanmayı hedeflemektedir. Ekran düzeni; verileri göreve dayalı, öneme dayalı ve hibrit konfigürasyon olmak üzere üç stratejik yapı üzerinden otomatik olarak yeniden boyutlandırıp önceliklendirerek dinamik bir şekilde adapte etmektedir. Bu insan-makine arayüzünün temel yeniliği, siyah tema üzerinde kurgulanan ve pilot tarafından onaylandıkça otomatik olarak sağa kaydırılan dinamik görev kartı modelidir. Bu mekanizma, pilotun çok aşamalı uçuş iş akışlarını minimum fiziksel ve zihinsel sapma ile yürütmesini ve ilerletmesini sağlamayı hedeflemektedir.

Ayrıca, insan-makine arayüzü mimarilerinin geleneksel donanım döngülü simülatörlerle doğrulanması yüksek maliyetli olup hızlı prototiplemeyi sınırlandırmaktadır. Havacılık insan faktörleri araştırmalarındaki güncel metodolojileri takiben, dijital prototip yazılımlarıyla birleştirilen Sanal Gerçeklik (VR) ortamları, bilişsel yükü değerlendirmek ve pilot etkileşim mekaniklerini izlemek için yüksek sadakatli ve düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır (Hebbar vd., 2023). Bilişsel iş yükünün değerlendirilmesine yönelik literatür de öznel, davranışsal ve fizyolojik yaklaşımların tamamlayıcı biçimde bir arada kullanılmasını önermekte olup (Masi vd., 2023), bu çok yönlü değerlendirme ilkesi bildiride önerilen VR protokolünün öznel/nesnel tasarımına da yön vermektedir.

Bu bildiri; kural tabanlı mantık motorunun mimarisini tanımlamakta, React tabanlı çalışır prototipin akıllı görev kartı arayüzünü belgelemekte ve önerilen adaptif mimariyi endüstri standardı statik konfigürasyonlarla karşılaştırmak için bir VR uçuş simülatörü içindeki deneysel protokol altyapısını kurmaktadır.

2. METODOLOJİ

2.1. Problemin Tanımlanması

Modern cam kokpitler pilota her an her bilgiyi eşit görsel ağırlıkta sunar; yüksek iş yükü anlarında pilot, o an ihtiyaç duyduğu parametreyi ekranda aramak zorunda kalır. Bunun karşı ucunda yer alan tam otomasyon ise farklı bir sorun doğurur; karar pilotun elinden çıkar ve devralma anında bağlam kaybolur.

Her şeyi göstermek ile kararı sistemde tutmak arasındaki bu iki uçtan kaçınma gereği, metodolojinin geri kalanını belirleyen kısıtı doğurmuştur: karar pilotta kalmalı, dikkat yönlendirmesi ise sistemin işi olmalıdır.

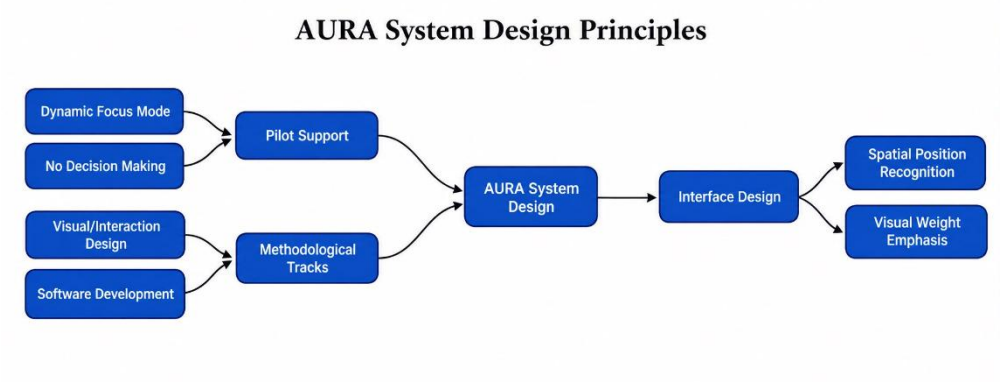
2.2. Yaklaşım

AURA tasarlanırken öncelik, pilotun yerine karar veren değil, pilota destek olan bir sistem kurmaktı. Dynamic Focus Mode bu yaklaşımın doğrudan bir yansımasıdır: hangi bilginin o an daha kritik olduğunu öne çıkarır, ancak hiçbir veriyi kaldırmaz ve hiçbir aksiyonu kendi başına almaz; nihai karar her zaman pilottadır.

Bu destek rolü, arayüzün nasıl değişeceğini de belirlemiştir. Pilot, ekran öğelerini yalnızca metinsel bilgileri okuyarak değil, görsel düzen ve sabit konumlarıyla birlikte değerlendirir.

AURA bu alışkanlığı devralmaz — üzerine, o an neyin öncelikli olduğunu gösteren ince bir vurgu katmanı ekler. Bu nedenle panel konumları hiçbir fazda değişmez; değişen tek şey, ilgili panelin görsel ağırlığıdır.

Bu ilkeye Dynamic Focus Mode adı verilmiştir. İlke belirlendikten sonra süreç iki paralel yöntem hattına ayrılmıştır: görsel/etkileşim tasarımı ve yazılım geliştirme (Şekil 1).



Şekil 1. AURA sistem tasarım ilkeleri: pilot desteği, metodolojik hatlar ve arayüz tasarımı.

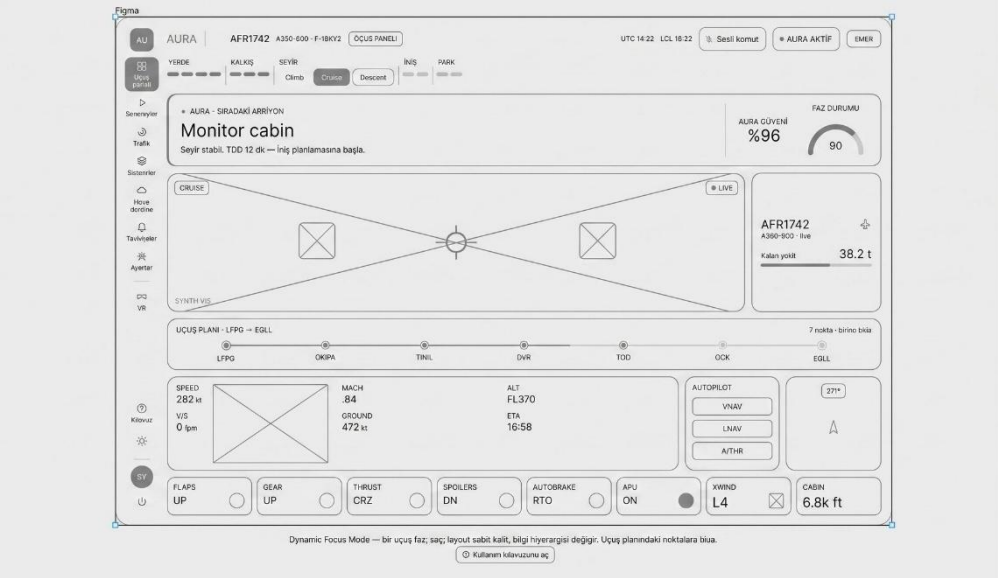
2.3. Yöntem: Tasarım ve Geliştirme

2.3.1. Tasarım

Öncelikle bilgi mimarisi çıkarılmış; her uçuş fazı için hangi panelin kritik olduğu belirlenerek 14 faz ile panel kimlikleri eşleştirilmiştir. Bunu, sabit panel ızgarası, faz şeridi ve karar-destek kartı iskeletinden oluşan iskelet tasarımları izlemiştir (Şekil 3). Ardından gerçekçi uçuş verileriyle PFD, radyal gösterge ve kontrol listesi kartlarını içeren, açık/koyu tema varyantlı yüksek sadakatli statik mockup'lar üretilmiştir. Bu süreçte önceliklendirme renk dili (kırmızı > amber > mavi > yeşil), tipografi, ikon seti ve focus/normal/dim görsel durumlarından oluşan bir tasarım sistemi tanımlanmış; mockuplar üzerinde yapılan iterasyonlarla güvenlik kuralları netleştirilmiştir — örneğin amber veya kırmızı bir değerin hiçbir zaman soldurulmaması ilkesi bu aşamada kesinleşmiştir. Tasarım sürecinin aşamaları Şekil 2'de özetlenmiştir.



Şekil 2. Tasarım ve geliştirme süreci: bilgi mimarisi haritalaması, düşük/yüksek sadakatli mockuplar, tasarım sistemi kurulumu ve güvenlik kuralı iterasyonu.



Şekil 3. Uçuş Paneli'nin Figma'da hazırlanan iskelet tasarımları.

2.3.2. Geliştirme

Uygulama Vite ve React 18 (JSX) ile tek sayfa uygulama olarak geliştirilmiş; router kullanılmamış, tema CSS değişkenleriyle yönetilmiştir. Mimari veri güdümlüdür: faz–görsel durum dönüşümü src/data/phases.js ve scenarios.js dosyalarında veri olarak tanımlanmış, bileşenler kendi başına karar vermemektedir. Bileşen sorumlulukları ayrıştırılmıştır: Dashboard (Dynamic Focus mantığı), Scenarios (adım oynatıcı), Views, Widgets ve FlightPlan. Çok modlu etkileşim katmanı, Web Speech API üzerinden sesli komut ve kontrol listesi ilerletmeyi; three.js, @react-three/fiber ve @react-three/xr üzerinden ise WebXR/VR kokpit görünümünü sağlamaktadır. Arayüz iki dillidir; bunun için özel bir i18n context'i (TR/EN) kullanılmış, havacılık terimleri her iki dilde de İngilizce bırakılmıştır.

2.4. İnsan Merkezli Tasarım ve Görsel Dil Mimarisi

AURA kullanıcı arayüzü, modern kokpitlerdeki bilgi yoğunluğunu (information overload) ve dikkat bölünmesini (attentional dispersion) azaltmak amacıyla İnsan Merkezli Tasarım (Human-Centered Design) ve Bilişsel Ergonomi ilkeleri doğrultusunda geliştirilmiştir. Sistem, pilotun mekansal belleğini ve kas hafızasını korurken operasyonel bağlama göre en kritik bilgilere odaklanmasını sağlamayı hedeflemektedir.

Geliştirilen Dynamic Focus Mode, kokpit içerisindeki hiçbir panelin fiziksel konumunu değiştirmemekte; sabit 1320 piksel genişliğindeki çekirdek Uçuş Paneli (Flight Deck) görünümü bir Geniş Alan Ekranı (Large Area Display - LAD) mimarisinde, Tek Sayfa Uygulama (SPA) düzeninde çalışmaktadır.

Arayüzün görsel şematiği dört renk kodlamasına dayanmaktadır. Turkuaz vurgu, bulunulan aktif ekranı, seçili uçuş fazını ve uçuş planındaki aktif rota bacağını (active leg) belirtmektedir. Mor çerçeve (focus state), ilgili uçuş fazı veya senaryo anında kritik öneme sahip paneli çerçeveleyerek öne çıkarmaktadır. Soluk panel (dim state) durumunda ikincil öneme sahip göstergelerin rengi, yazı boyutu ve içeriği değiştirilmemekte; odaktaki paneller öne çıkarıldığı için bu göstergeler görece geri planda kalmaktadır. Bu nedenle soluk durum okunabilirliği azaltmamakta, bilgi ekrandan silinmemekte ve imleç veya odak üzerine geldiğinde ilgili gösterge öne çıkarılmaktadır. Emniyet renk kodlarında ise nominal durumlar için yeşil, dikkat gerektiren ve asla soldurulmayan parametreler için amber, arıza ve limit dışı durumlar için kırmızı kullanılmaktadır.

Aynı sabit gezinme rayı üzerinden erişilen Senaryolar, Trafik (Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem), Sistemler, Hava Durumu (METAR/Enroute), Tavsiyeler, Ayarlar, VR ve Kılavuz gibi tamamlayıcı görünümler ise görev bazlı ayrı ekranlardır; Uçuş Paneli'nin kendi iç yerleşimi bunlardan bağımsız olarak hiçbir fazda değişmez. İki dilli (TR/EN) altyapıda; Flaps, Gear, V1, METAR, Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem, Uçuş modu göstergesi, Dikey navigasyon ve Yanal seyir gibi standart havacılık terimleri özgün biçimleriyle korunmuştur.

2.5. Sistem Mimarisi ve Karar Destek Altyapısı

AURA, uçuş kontrol döngüsünün dışında, yalnızca simüle edilen uçuş verilerini işleyerek pilota bağlamsal rehberlik sunan, görev-kritik olmayan (non-flight-critical) bir insan-makine arayüzüdür. Yazılım, Vite geliştirme ortamında React tabanlı reaktif bileşen mimarisiyle geliştirilmiştir. Uygulamanın tüm durumu (aktif görünüm, aktif uçuş fazı, dil/tema tercihleri) App.jsx kök bileşenindeki Merkezi Durum Yönetimi (Centralized State Management) üzerinden kontrol edilmekte; gereksiz yeniden hesaplamaları engellemek için faz-durum birleştirme mantığı Dashboard.jsx bileşeninde useMemo ile önbelleğe alınmaktadır.

Sistem yazılımı üç temel katmanda modellenmiştir. En altta yer alan veri katmanı, dinamik uçuş planının (FLIGHTPLAN: LFPG–EGLL rotası, 7 waypoint), bacak ilerleme indekslerinin (PHASE_LEG) ve senaryo parametrelerinin simüle edildiği katmandır. Ortadaki mantık katmanı; uçuş fazı yönetimini (src/data/phases.js), XAI-ilhamlı, dört parçalı (ne oldu / neden önemli / önerilen aksiyon / güven düzeyi) kural tabanlı gerekçelendirme modülünü ve olay tabanlı kesme motorunu (Interrupt Engine) kapsamaktadır. En üstteki arayüz katmanı ise SyntheticVision (bulut katmanı ve HUD overlay), RadialGauge (faz durumu), Compass, JogDial (otopilot mod halkası) ve karar destek kartlarının yer aldığı insan-makine arayüzü katmanıdır.

Mantık katmanı makine öğrenmesi içermez; deterministik ve kural tabanlıdır. XAI ifadesi burada bir öğrenen modelin açıklanmasını değil, açıklanabilir yapay zekâ tasarım ilkelerinden ilham alan bir gerekçelendirme ve sunum biçimini (XAI-inspired interface) ifade etmektedir.

Sistem, uçuşun tüm yaşam döngüsünü 5 ana kategori altında toplam 14 operasyonel faz olarak modeller: Yerde (Cold & Dark, Preflight, Pushback, Taxi Out), Kalkış (Takeoff Roll, Rotation, Initial Climb), Seyir (Climb, Cruise, Descent), İniş (Approach, Landing) ve Park (Taxi In, Shutdown).

Karar destek mekanizması, iki temel tetikleyicinin bileşiminden doğan üç davranış örüntüsüyle bilgi hiyerarşisini organize etmektedir. Göreve dayalı (task-oriented) örüntü, standart uçuş fazlarında prosedürlere (SOP) göre sıradaki eylemi ve ilgili panelleri öne çıkarmaktadır; bu, her fazın phases.js içindeki varsayılan focus/action alanlarına karşılık gelmektedir. Öneme dayalı (priority-based) örüntüde, tanımlı 8 operasyonel senaryodan biri tetiklendiğinde kesme motoru devreye girerek arıza panellerini mor çerçeveyle parlatmakta, senaryoya önceden tanımlanmış ve adıma göre değişen güven seviyesini, XAI ilkelerinden ilham alan formatta gerekçeli görev kartıyla (ne oldu / neden önemli / sıradaki aksiyon) birlikte ekrana basmaktadır; bu davranış scenarios.js içindeki 8 senaryo ve 60 adımlık tanıma karşılık gelmektedir. Hibrit (hybrid) örüntü ise göreve dayalı ve öneme dayalı örüntülerin eş zamanlı tetiklendiği durumları kapsamaktadır; örneğin Yaklaşma fazında standart prosedür rehberliği ile bir senaryo kesmesi aynı anda ekranda görünür kılınmaktadır.

2.6. Çok Modlu Etkileşim ve Sesli Komut Entegrasyonu

Sarsıntı ve türbülans anlarında dokunmatik ekran hatalarını (inadvertent inputs) önlemek amacıyla arayüz onay tabanlı etkileşimle yönetilmektedir; bu, çok modlu HMI tasarımına ilişkin daha geniş literatürle uyumludur (Song vd., 2022). Otopilot mod seçimleri (JogDial üzerinden Dikey navigasyon, Yanal seyir, APPR, A-THR) ve dinamik görev kartları görsel-işitsel doğrulama döngüsüne bağlanmaktadır.

Sistemin ikinci etkileşim katmanı olan sesli komut altyapısı, tarayıcının yerleşik konuşma tanıma servisini kullanarak arayüz açık olduğu sürece kesintisiz dinleme yapar. Pilotun söylediği kelimeler, önceden tanımlanmış anahtar kelimelerle (örneğin "kalkış", "senaryolar", "tekerler hazır") eşleştirilir. Bir eşleşme bulunduğunda ilgili panel ekranda kısa süreliğine parlayarak komutun algılandığını pilota görsel olarak bildirir. Tanınamayan bir komut söylendiğinde ise sistem herhangi bir aksiyon almaz; bunun yerine ekranda 3,2 saniye süren kısa bir uyarı göstererek durumu pilota iletir. Web Speech API bu aşamada yalnızca sesli etkileşimin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla, bir konsept kanıtlama (proof of concept) aracı olarak seçilmiştir. Kokpit gürültüsünü filtreleyen algoritmalar ve gürültülü ortamda tanıma doğruluğunun ölçülmesi bu prototipin kapsamı dışındadır.

2.7. VR Tabanlı Simülasyon Test Ortamı

Sistemin operasyonel kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla arayüz, 3 boyutlu derinlik ızgarasına (perspective spatial grid) sahip Sanal Gerçeklik (VR) ortamına entegre edilmiştir. AURA paneli, pilotun tasarım göz referans noktası (DEP) doğrultusunda 3D kokpit koordinatlarına yerleştirilmiştir. Simülasyon; SyntheticVision modülü üzerinden bulut katmanları, HUD overlay grafikleri ve üst kontrol şeridi (3B ekranı gör, < Faz, Faz >) aracılığıyla tam daldırmalı olarak yürütülmektedir.

3. BULGULAR

Bu bölüm, tasarım ve geliştirme sürecinin somut çıktılarını raporlamaktadır: çalışır prototipin kapsamı, arayüzün uçuş fazları ve senaryolar karşısındaki davranışı, tasarım ilkelerinin prototipte karşılanma durumu ve değerlendirme protokolüne hazırlık. Burada sunulan bulgular bir performans ölçümü değil; kaynak kod ve çalışan arayüz üzerinden, insan denek gerektirmeyen kontrollerle yapılmış işlevsel doğrulamadır.

3.1. Prototipin Kapsamı

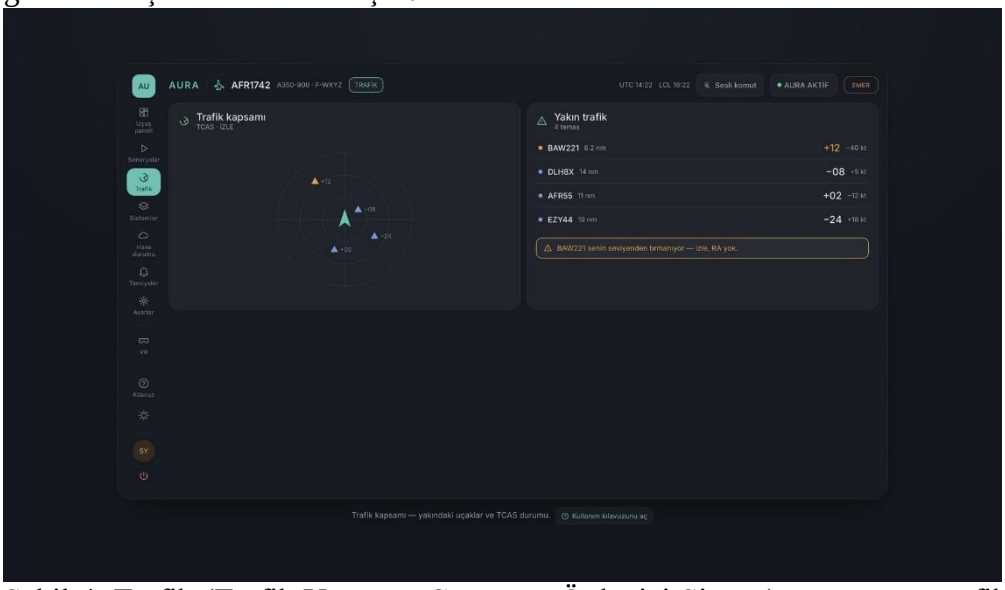
Geliştirme sürecinin sonunda, tarayıcıda çalışan ve WebXR üzerinden üç boyutlu kokpit ortamına aktarılabilen bir AURA prototipi elde edilmiştir. Prototipin kapsamı Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. AURA prototipinin kapsamı.

Bileşen	**Prototipteki karşılığı**
Uçuş fazları	14 faz; 5 kategori (Yerde, Kalkış, Seyir, İniş, Park)
Senaryolar	8 senaryo, toplam 60 adım
Karar destek örüntüleri	Göreve dayalı, öneme dayalı ve hibrit
Uçuş planı	LFPG–EGLL rotası, 7 waypoint
Görünümler	Uçuş Paneli; gezinme rayı üzerinden Senaryolar, Trafik (Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem), Sistemler, Hava Durumu, Tavsiyeler, Ayarlar, VR ve Kılavuz
Etkileşim kanalları	Onay tabanlı dokunmatik etkileşim, sesli komut (Web Speech API; konsept kanıtlama düzeyinde), VR görünümü (WebXR)

Bileşen	Prototipteki karşılığı
Dil desteği	Türkçe ve İngilizce; havacılık terimleri özgün biçimleriyle
Ayrıntılı asistan akışı	Kalkış öncesi kontrol listesi, normal kalkış, V1 sonrası motor arızası

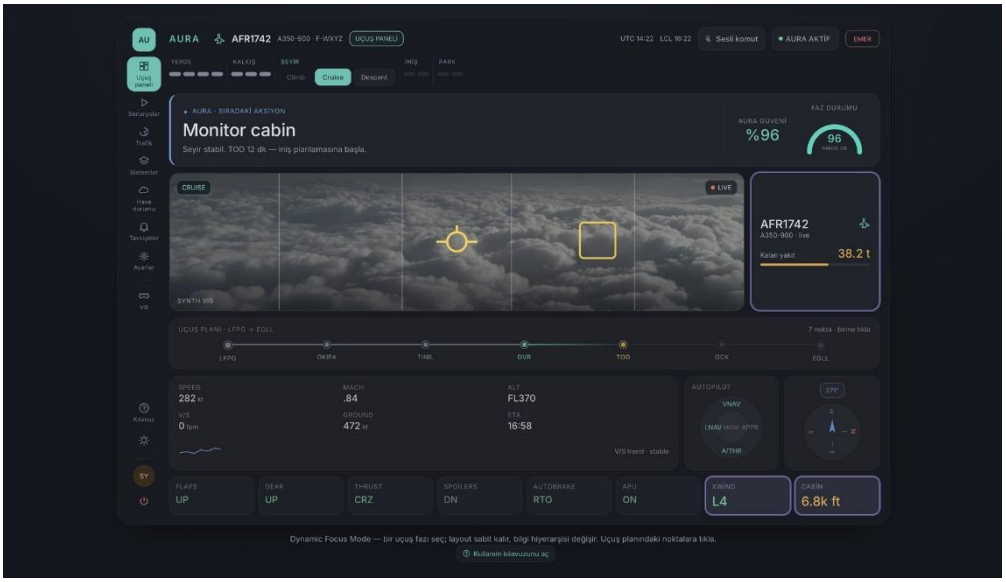
Veri katmanında 14 fazın ve 8 senaryonun tamamı yapısal olarak tanımlıdır. Asistanın kontrol listesi callout'larını da içeren adım adım akışı ise kalkış aşamasındaki üç senaryo için ayrıntılandırılmıştır. Kalkış, uçuşun en yoğun ve geri dönüşü en sınırlı aşaması olduğu için başlangıç noktası olarak seçilmiştir. Faz ve senaryo davranışı bileşenlerde değil veri dosyalarında tanımlandığından, uçuşun diğer aşamaları arayüz kodunda değişiklik yapılmadan aynı ayrıntı düzeyinde doldurulabilecek durumdadır. Gezinme rayı üzerinden erişilen tamamlayıcı görünümlere örnek olarak Trafik (Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem) görünümü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Trafik (Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem) görünümü: trafik kapsamı, yakın trafik listesi ve izleme uyarısı.

3.2. Dynamic Focus Mode'un Arayüzdeki Davranışı

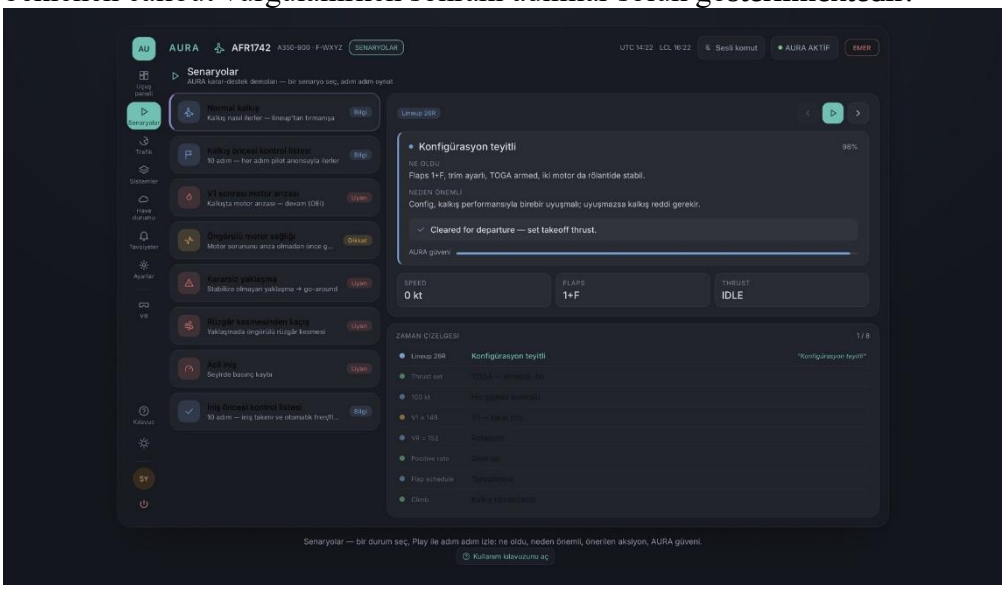
Dynamic Focus Mode, 14 fazın hiçbirinde panellerin konumunu, boyutunu veya sırasını değiştirmemektedir; fazlar ve senaryolar arasında değişen tek unsur panellerin görsel durumudur (odak, normal, soluk). O anki faz ya da senaryoyla ilişkili paneller mor çerçeveyle işaretlenmekte; diğer paneller renklerini ve içeriklerini koruyarak görece geri planda kalmakta, imleç ya da odak geldiğinde öne çıkarılmaktadır. Hiçbir bilgi ekrandan kaldırılmamaktadır. Amber ve kırmızı durumdaki değerler önceliklendirme mantığının dışında tutulduğundan hiçbir koşulda soluklaştırılmamaktadır. Vurgunun şiddeti pilot tarafından ayarlanabilmekte ve tamamen kapatılabilmektedir. Şekil 5, Seyir (Cruise) fazında Uçuş Paneli'ni göstermektedir; bu fazla ilişkili paneller mor çerçeveyle işaretlenmiş, panel yerleşimi ise Şekil 3'teki iskelet tasarımları ile aynı kalmıştır.



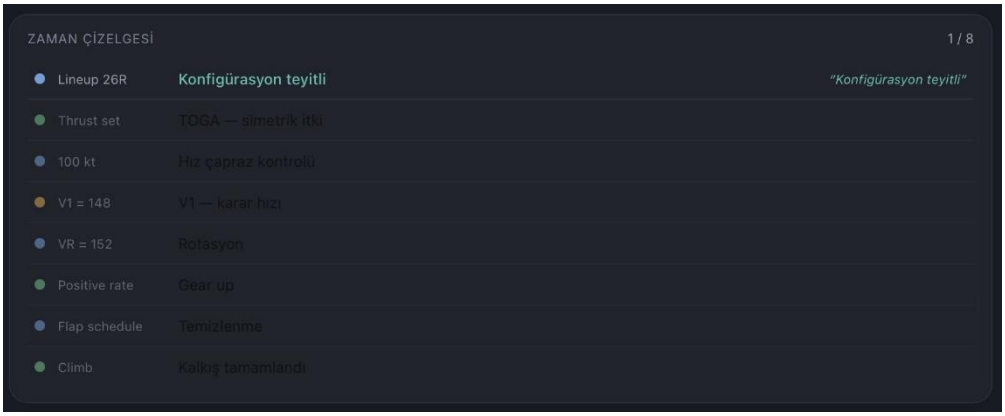
Şekil 5. Seyir (Cruise) fazında Uçuş Paneli: Dynamic Focus Mode ilgili panelleri mor çerçeveyle işaretlemekte, panel konumları değişmemektedir.

3.3. Karar Destek Kartları ve Gerekçelendirme

Prototipte üretilen her tavsiye dört parçalı bir kartla sunulmaktadır: ne oldu, neden önemli, sıradaki aksiyon ve güven düzeyi. Kaynak kod incelemesinde 14 fazın ve 60 senaryo adımının tamamında gerekçe (why) alanının tanımlı olduğu görülmüştür. Kartlar pilot onayı olmadan uygulanmamakta, onaylanan kart sağa kayarak sıradaki adıma yer açmaktadır. Kural tabanlı yapı sayesinde her kartın hangi faz ya da senaryo tanımından üretildiği izlenebilmektedir. Şekil 6, normal kalkış senaryosunun ilk adımında (Lineup 26R) ekrana gelen karar destek kartını göstermektedir. Senaryonun ilerleyişi, Şekil 7'deki zaman çizelgesinden izlenmektedir: normal kalkış, dizilişten (Lineup) tırmanışa (Climb) kadar sekiz adımdan oluşmakta; etkin adım ve beklenen callout vurgulanırken sonraki adımlar soluk gösterilmektedir.



Şekil 6. Senaryolar görünümü: normal kalkış senaryosunun ilk adımında karar destek kartı (ne oldu, neden önemli, sıradaki aksiyon, AURA güveni).



Şekil 7. Normal kalkış senaryosunun zaman çizelgesi (Lineup 26R → Climb, 8 adım).

3.4. Çok Modlu Etkileşim

Sesli komut katmanı, tanımlı anahtar kelimelerle (örneğin "kalkış", "senaryolar", "tekerler hazır") eşleşen komutlarda ilgili paneli kısa süreliğine belirginleştirerek komutun algılandığını görsel olarak teyit etmektedir. Eşleşme bulunmadığında sistem hiçbir aksiyon almamakta ve ekranda 3,2 saniye süren bir uyarı göstermektedir. Kalkış öncesi kontrol listesinde her madde için Türkçe ve İngilizce callout ifadeleri tanımlanmıştır; pilot ilgili callout'u söylediğinde madde onaylanmakta ve liste bir sonraki maddeye geçmektedir. Otopilot mod seçimleri (Dikey navigasyon, Yanal seyir, APPR, A-THR) ve görev kartları onay tabanlı çalışmakta; incelenen hiçbir ekranda sistem pilot onayı olmadan aksiyon almamaktadır.

3.5. Tasarım İlkelerinin İşlevsel Doğrulaması

Bu çalışma bir arayüz konsepti ve çalışan bir prototiptir; bugüne kadar pilotlarla gerçekleştirilmiş bir kullanıcı çalışması bulunmamaktadır. Tablo 2, kaynak kod (src/data/phases.js, src/data/scenarios.js, src/App.jsx) doğrudan incelenerek doğrulanmış, insan denek gerektirmeyen özellikleri listelemektedir.

Tablo 2. Tasarım ilkelerinin prototipte işlevsel doğrulaması (kaynak kod ve arayüz denetimi; kullanıcı testi değildir).

İlke	Durum	Doğrulama
Layout hiçbir fazda değişmiyor	Doğrulandı	14 fazın tamamında panel konumları sabit
Bilgi asla gizlenmiyor	Doğrulandı	Geri plandaki paneller renk ve içeriğini koruyor; hover ile öne çıkıyor
Kritik değer bastırılmıyor	Doğrulandı	Amber/kırmızı çipler önceliklendirmenin dışında
Her tavsiye gerekçeli	Doğrulandı	14 faz + 60 senaryo adımının tamamında 'why' alanı dolu

İlke	Durum	Doğrulama
Belirsizlik görünür	Doğrulandı	Güven seviyesi adım başına raporlanıyor
Karar pilotta kalıyor	Doğrulandı	Hiçbir ekranda sistem otonom aksiyon almıyor
Katkı izole edilebiliyor	Doğrulandı	AURA AKTİF/DEVRE DIŞI anahtarı tek tıkla A/B karşılaştırması sağlıyor

Tasarımın kuramsal gerekçesine dayanan beklenen kazanımlar — kritik parametreye ilk bakış süresinin kısalması, algılanan bilişsel iş yükünün (NASA-TLX) düşmesi ve durumsal farkındalığın (SART) artması — bu çalışma kapsamında bir kullanıcı çalışmasıyla henüz ölçülmemiştir; iddia değil, 6. bölümde tanımlanan protokolle sınanması önerilen hipotezlerdir.

3.6. Değerlendirmeye Hazırlık Durumu

Prototip, 6. bölümde tanımlanan protokolün uygulanması için gereken üç bileşeni içermektedir: arayüzün WebXR üzerinden üç boyutlu kokpit ortamına yerleştirilmiş VR görünümü, asistanın katkısını aynı katılımcı üzerinde izole etmeyi sağlayan AURA AKTİF / DEVRE DIŞI anahtarı ve senaryoların her katılımcı için aynı adım dizisiyle tekrar oynatılabilmesi. Protokolde tanımlanan altı ölçüt (NASA-TLX, SART, kritik durum algılama süresi, ilk doğru müdahale süresi, görev tamamlama süresi ve sesli komut başarı oranı) henüz katılımcılarla uygulanmamıştır; bu nedenle bu bölümde performans verisi raporlanmamaktadır.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada geliştirilen AURA çerçevesinin temel amacı, kokpit içerisinde pilotun maruz kaldığı bilgi yoğunluğunu azaltırken gerekli bilgilerin operasyonel bağlama göre önceliklendirilmesini ve karar verme sürecinin desteklenmesini sağlayan bütünleşik bir insan-makine etkileşimi yaklaşımı ortaya koymaktır. Hedeflenen yapı; senaryo duyarlı katmanlı kokpit mimarisi, Dynamic Focus Mode ve karar destek mekanizmalarını aynı çatı altında ele alarak, kokpit arayüzünün sabit bir bilgi sunum yapısından pilotun içinde bulunduğu uçuş koşullarına göre değişebilen bir yapıya dönüştürülmesini hedeflemektedir. Bu yönüyle çalışmanın temel katkısı, tek bir yeni gösterge veya kontrol yöntemi önermekten ziyade, mevcut kokpit etkileşiminin bilgi önceliklendirme, dikkat yönetimi ve karar desteği açısından bütünleşik biçimde ele alınabileceğini ortaya koyan bir çerçeve sunmasıdır.

AURA'nın bu yaklaşımı, kokpit arayüzlerinin yalnızca bilgi sunan sistemler olarak değil, pilotun dikkatini ve bilgi işleme sürecini destekleyen insan merkezli yapılar olarak tasarlanması gerektiği görüşüyle örtüşmektedir. Blundell ve Harris (2023) tarafından ticari hava yolu pilotlarıyla yürütülen gereksinim analizinde de kokpitte artırılmış gerçeklikle sunulacak bilginin göreve uygun seçilmesi ve bilgi yoğunluğunun artmasının önlenmesi, pilot kabulünün temel koşulları olarak belirlenmiştir. Çalışmada hangi bilginin hangi uçuş durumunda öne çıkarılacağının durumsal farkındalık çerçevesiyle ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bu yaklaşım, AURA'nın bilgiyi pilotun dikkatini gereksiz biçimde bölmeden sunma hedefiyle

benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte AURA'nın yaklaşımı yalnızca bilginin farklı bir gösterim teknolojisi üzerinden sunulmasına değil, bilginin önem düzeyinin uçuş fazına ve mevcut senaryoya göre değiştirilmesine odaklanmaktadır. Bu açıdan Dynamic Focus Mode, insan merkezli ve dikkat odaklı kokpit tasarımını senaryo-duyarlı bir bilgi hiyerarşisi ile ele almaktadır.

AURA'da ikincil bilgilerin tamamen kaldırılması yerine görece geri planda bırakılması (dim state) ve o an kritik olan parametrelerin görsel olarak öne çıkarılması (focus state), bu bilgi hiyerarşisinin temel bileşenidir. Buradaki yaklaşım, pilotun alışık olduğu gösterge yerleşimini değiştirmeden yalnızca bilgilerin görünürlük düzeyini uçuşun gereklerine göre yeniden ayarlamaya dayanmaktadır. Dolayısıyla amaç, pilotun mevcut çalışma düzenini yeniden öğrenmesini gerektiren yeni bir kokpit tasarlamak değil, var olan bilgi yapısını operasyonel koşullara göre daha etkin biçimde kullanmaktır.

Bu yaklaşım, görev ve iş yükündeki değişimlere göre insan-makine iş bölümünün uyarlanmasını ele alan güncel çalışmalarla kavramsal olarak ilişkilendirilebilir. Brand ve Schulte (2021), askeri helikopter ekipleri için geliştirdikleri iş yüküne duyarlı ve göreve özgü yardımcı sistem yaklaşımında, sistemin mevcut ve gelecekteki görev durumu ile mürettebatın iş yükünü dikkate alarak destek düzeyini değiştirmesini ele almıştır. Söz konusu sistemde müdahaleler kademeli olarak yapılandırılmıştır: önce pilotun dikkati öncelikli göreve yönlendirilmekte, gerektiğinde görev durumu veya arayüz basitleştirilmekte, yalnızca yüksek riskli durumlarda görev sistem tarafından üstlenilmektedir. Bu kademelenmenin ilk basamağı, yani kokpit ekranındaki ilişkili nesnelerin vurgulanarak dikkatin ilgili probleme çekilmesi, AURA'nın dinamik odaklanma mekanizmasıyla benzer bir dikkat yönetimi mantığı ortaya koymaktadır. Ayrım ise otomasyon yetkisinde belirginleşmektedir: Brand ve Schulte'nin (2021) sistemi gerektiğinde görevi devralabilirken, AURA kritik ve ikincil bilgilerin görsel önceliklerini düzenlemekle sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle AURA, adaptive automation kavramının doğrudan bir uygulaması değil, bağlama duyarlı bilgi sunumunu insan-otomasyon etkileşiminin bir bileşeni olarak ele alan bir yaklaşım olarak konumlanmaktadır.

Söz konusu mekanizmanın bir diğer boyutu, pilotun dikkatinin kritik bilgiye yönlendirilmesidir. Xenos vd. (2024), göz izleme teknolojisinin pilotların görsel davranışlarını ve bilgi arama süreçlerini inceleyerek adaptif arayüzlerin hangi durumlarda gerekli olabileceğini belirlemeye yardımcı olduğunu göstermiştir. Çalışmada dikkat dağılımının deneyim düzeyine göre değiştiği, özellikle daha az deneyimli kullanıcıların dikkatlerini birden fazla bilgi kaynağı arasında bölmek zorunda kaldığı görülmüştür. UAV uçuşlarındaki sinyal kaybı senaryolarında pilotlar gerekli bilgiyi ekranda bulmakta zorlanmış; hem araştırmacılar hem de katılımcılar bu tür durumlarda harita görünümünün öne çıkarılması, son bilinen güçlü sinyal noktasının gösterilmesi veya kritik bilginin daha görünür hale getirilmesi gibi çözümler önermiştir.

Bu öneriler, AURA'nın odak durumu mantığıyla kavramsal olarak örtüşmektedir. Aradaki fark yöntemdedir: Xenos vd. (2024) arayüzün göz davranışı üzerinden uyarlanmasını önerirken, AURA aynı problemi senaryo ve uçuş fazı üzerinden tanımlanan bir bilgi hiyerarşisiyle ele almaktadır. İlişki, her iki yaklaşımın da kritik bilgiye erişimi kolaylaştırarak pilotun gereksiz bilgi arama davranışını azaltmayı hedeflemesinden kaynaklanmakta; AURA'nın odak ve soluklaştırma durumlarının bu çalışmada deneysel olarak sınandığı anlamına gelmemektedir.

Çalışmanın bir diğer önemli boyutu, pilotun karar verme sürecini destekleyen karar destek mekanizmasıdır. AURA'da karar destek kartlarının "Ne oldu?, Neden önemli?, Sıradaki aksiyon ne?" şeklinde yapılandırılmasıyla, sistem tarafından üretilen bir uyarının yalnızca sonuç olarak sunulması yerine, pilotun bu çıktıyı operasyonel bağlam içerisinde değerlendirebilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım, yapay zekâ destekli karar sistemlerinin

havacılıkta kullanımında önem kazanan insan-AI etkileşimi ile ilişkilendirilebilir. Menig vd. (2025) tarafından ticari pilotlarla gerçekleştirilen çalışmada, karmaşık bir uçuş sapma senaryosunda AI tabanlı bir Virtual Crew Assistant kullanımı incelenmiş; sistemin alternatiflerin risk ve faydalarının değerlendirilmesine destek sağladığı ve AI destekli koşulda algılanan iş yükünün daha düşük olduğu raporlanmıştır. Çalışmada ayrıca güven, açıklanabilirlik, kullanılabilirlik ve bu tür yardımcı sistemlerin sınırlılıkları ele alınmıştır. Söz konusu bulgular, karar desteğinin pilotun yerine karar veren bağımsız bir yapı olarak değil, pilotun değerlendirmesini besleyen bir yardımcı olarak konumlandırılması gerektiğine ilişkin bir literatür zemini sunmaktadır. Bununla birlikte AURA'nın karar destek mekanizması, Menig vd. (2025) tarafından incelenen sistemle aynı yapıyı kullanmamakta; bu çalışmanın doğrudan bir uygulaması olarak değil, nihai değerlendirmeyi pilotta bırakan bir arayüz tasarım tercihi olarak ele alınmalıdır.

Öte yandan, önerilen sistemde yeni teknolojilerin kullanılmasının tek başına pilot performansını iyileştireceği varsayılmamalıdır. Özellikle yeni etkileşim yöntemlerinin sisteme eklenmesi, beklenmeyen biçimde ek bir bilişsel veya fiziksel yük oluşturabilir. Wang vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, birincil uçuş göstergesiyle bütünleştirilmiş dokunmatik ekran tabanlı bir kontrol yaklaşımı geleneksel sidestick ve gamepad ile karşılaştırılmış; dokunmatik ekranla yapılan kontrolde pilot performansı, sistem kullanılabilirliği ve durumsal farkındalığın anlamlı düzeyde daha düşük kaldığı belirlenmiştir. Araştırmacılar, bu çalışmanın dokunmatik ekranların bu amaçla kullanımına yönelik ilk bir deneme niteliğinde olduğunu belirtmiştir. Bu bulgu, AURA'nın teknolojik yenilikleri yalnızca işlevsel özellikler olarak değerlendirmemesi gerektiğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, bir arayüzün daha fazla bilgi sağlayabilmesi veya daha fazla etkileşim seçeneği sunabilmesi, onun pilot açısından otomatik olarak daha kullanışlı olduğu anlamına gelmemektedir. Dolayısıyla AURA'daki dinamik bilgi sunumu ve karar destek özelliklerinin değeri, yalnızca sundukları teknolojik olanaklarla değil, pilotun bilişsel yükü ve görev performansı üzerindeki etkileriyle birlikte değerlendirilmelidir. AURA'nın etkileşim boyutu açısından değerlendirildiğinde, geleneksel fiziksel kontrol elemanlarına alternatif veya tamamlayıcı doğal etkileşim yöntemleri de dikkat çekmektedir. Güneşer vd. (2025) tarafından geliştirilen etkileşimli eldiven çalışmasında, el ve parmak hareketlerinin sanal ortama aktarılması için IMU ve flex sensörlerden yararlanılmış; ayrıca basınç sensörleri ve robotik kol aracılığıyla haptik geri bildirim sağlanmıştır. Prototiplerin havacılık ve uçak bakım senaryolarında değerlendirilmiş olması, bu tür etkileşim teknolojilerinin havacılık alanında kullanılabileceğini göstermesi açısından önemlidir. Çalışmanın doğrudan kokpit operasyonlarına yönelik olmaması nedeniyle sonuçların AURA'ya doğrudan aktarılması mümkün olmamakla birlikte, el hareketlerinin algılanması ve fiziksel geri bildirim gibi teknolojilerin havacılık temelli sanal ortamlarda uygulanabilirliğini göstermesi bakımından teknik bir referans oluşturmaktadır. Bu doğrultuda AURA'nın doğal etkileşim yaklaşımı, mevcut kokpit kontrol mantığının yerine geçecek tek başına bir teknoloji olarak değil, insan-makine etkileşimini destekleyebilecek tamamlayıcı bir katman olarak değerlendirilebilir.

Yukarıda kurulan ilişkilerin tamamı kavramsal düzeydedir. İlgili çalışmalar AURA'nın tasarım tercihleriyle aynı problem alanını paylaşmakta, ancak farklı yöntemler ve farklı operasyonel bağlamlar üzerinden yürütülmüştür; bu nedenle söz konusu bulguların AURA'ya doğrudan aktarılması mümkün değildir. Dinamik odaklanma mekanizmasının pilotun dikkatini ne ölçüde etkin yönlendirdiği, karar destek kartlarının karar sürecine ne düzeyde katkı sağladığı ve farklı bilgi katmanlarının hangi koşullarda yararlı, hangi koşullarda gereksiz hale geldiği ancak pilotlarla yürütülecek kontrollü denemelerle belirlenebilir. Aynı durum, sistemde sunulan güven seviyelerinin pilot tarafından nasıl yorumlandığı ve bu bilginin karar davranışını nasıl

etkilediği için de geçerlidir.

Çerçevenin kullanıcı çalışmasıyla doğrulanması hâlinde, çalışmanın katkısı öncelikle kalkış aşamasının günlük işleyişinde görülecektir. Kalkış öncesi kontrol listesinin maddelerini sırayla sunan, pilotun callout'unu dinleyerek maddeyi onaylayan ve sıradaki adımı hatırlatan bir yardımcı, pilotun prosedürü takip etme yükünü hafifletebilir ve atlanan bir maddenin fark edilmesini kolaylaştırabilir. Bu destek uçağa yeni bir sensör ya da otomasyon eklenmeden, yalnızca mevcut bilginin sunuluş biçimi değiştirilerek sağlanmaktadır. Ayrıca her önerinin hangi prosedür adımına dayandığının kartta görünür olması, arayüzü kalkış prosedürleri için tutarlı bir başvuru kaynağına dönüştürmekte; aynı kalkış senaryosunun simülatörde asistanlı ve asistansız olarak tekrarlanabilmesi de eğitim amaçlı karşılaştırmalara olanak tanımaktadır.

Bu çalışmanın bulguları bazı sınırlılıklarla birlikte değerlendirilmelidir. Bugüne kadar pilotlarla bir kullanıcı çalışması yürütülmemiştir; raporlanan bulgular işlevsel doğrulama niteliğindedir. Prototip simüle edilmiş uçuş verisiyle çalışmakta ve kalkış senaryoları önceden tanımlanmış adım dizileri olarak oynatılmaktadır. Pilotların karar kartlarındaki güven göstergesini nasıl yorumladığı ayrıca sınanmalıdır. Son olarak, sesli komut katmanı tarayıcıya bağlı genel amaçlı bir tanıma servisiyle, yalnızca konsept kanıtlama amacıyla kurulmuştur; gürültü filtreleme bu çalışmanın kapsamında değildir ve katmanın kokpit gürültüsü altındaki doğruluğu ölçülmemiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, iki pilotlu operasyonlarda izleyen pilotun üstlendiği prosedür takibi, sıradaki adımı hatırlatma ve kontrol listesi okuma işlevlerinin bir bölümünün, pilotun mevcut çalışma biçimini bozmadan bir kokpit arayüzü tarafından üstlenilip üstlenilemeyeceği sorusu ele alınmıştır. Bu amaçla kararı her zaman pilotta bırakan, senaryo-duyarlı bir kokpit asistanı olan AURA tasarlanmış; kalkış aşaması başlangıç noktası alınarak çalışır bir prototip olarak geliştirilmiş ve VR ortamında uygulanacak bir değerlendirme protokolüne bağlanmıştır.

Elde edilen bulgular, bu sorunun tasarım düzeyinde olumlu yanıtlanabileceğini göstermektedir. İlk olarak, bir kokpit asistanının pilota yerleşimi değiştirerek değil, bilginin görsel ağırlığını ayarlayarak destek olabileceği gösterilmiştir: prototipte hiçbir fazda panel konumu değişmemekte, hiçbir bilgi ekrandan kaldırılmamakta ve amber ya da kırmızı değerler hiçbir koşulda geri plana alınmamaktadır. İkinci olarak, her tavsiyenin gerekçesi ve güven düzeyiyle birlikte sunulduğu kural tabanlı yapı, asistanın önerisini pilotun değerlendirmesine açık hâle getirmekte ve her çıktının kaynağını izlenebilir kılmaktadır; bu şeffaflık, ileride öğrenen bileşenler eklense dahi korunması gereken bir omurga olarak görülmektedir. Üçüncü olarak, onay tabanlı dokunmatik ve sesli etkileşim, izleyen pilotun kontrol listesi okuma ve yanıt alma döngüsünün arayüze aktarılabildiğini ortaya koymaktadır. Son olarak, davranışın bileşenlere değil veriye gömülü olması, kalkış için tanımlanan ilkelerin uçuşun diğer aşamalarına aynı emniyet kurallarıyla taşınabilmesine olanak vermektedir.

Bu sonuçlar, AURA'nın ikinci pilotun yerini alan bir otomasyon olarak değil, uçuran pilotun yükünü hafifleten insan merkezli bir yardımcı olarak konumlandırılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte asistanın pilotun iş yükünü, durumsal farkındalığını ve tepki süresini iyileştirip iyileştirmediği henüz ölçülmemiştir; bu beklentiler, 6. bölümde tanımlanan protokolle sınanacak hipotezlerdir (H1–H3). Çalışmanın bir sonraki adımı, AURA'nın aktif ve devre dışı koşullar karşılaştırılarak gerçek pilotlarla denenmesidir. Pilotun yükünü hafifletmenin en insan merkezli yolu, yanına doğru zamanda doğru şeyi söyleyen ve son sözü ona bırakan bir yardımcı koymaktır; AURA bu yardımcının ilk hâlidir.

6. GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın en öncelikli devamı, prototipin gerçek pilotlarla denenmesidir. İlk aşamada aşağıda tanımlanan protokol, farklı tecrübe düzeylerinden pilot katılımcılarla VR ortamında

uygulanacak; AURA aktif ve devre dışı koşullar aynı katılımcı üzerinde karşılaştırılarak Dynamic Focus Mode'un dikkat yönlendirme etkisi, karar kartlarının kabul edilme oranı ve güven yüzdelerinin nasıl yorumlandığı ölçülecektir. Bulgular olgunlaştıkça denemelerin tam görev uçuş simülatörlerine taşınması ve göz izleme ile kalp atım değişkenliği gibi fizyolojik ölçümlerle desteklenmesi hedeflenecektir. Pilot testleri yalnızca sonuç üretmeyecek; hangi vurguların gereksiz, hangi tavsiyelerin fazla erken ya da fazla geç geldiğine dair geri bildirim, senaryo tanımlarının yeniden kalibre edilmesinde doğrudan kullanılacaktır.

Bu denemeler için karma bir değerlendirme metodolojisi kurgulanmıştır. Öznel değerlendirme kapsamında, simülasyon sonrasında pilotlara 6 boyutlu NASA-TLX anketi ve durumsal farkındalık düzeyini belirlemek üzere SART ölçeği uygulanacaktır. Nesnel performans ölçümleri için simülasyon sırasında kritik durum algılama süresi (Hazard Detection Time), ilk doğru müdahale süresi (Response Time), görev tamamlama süresi (Task Completion Time) ve sesli komut başarı oranları zaman damgalı olarak log dosyalarına kaydedilecektir. İstatistiksel analizde, AURA'nın aktif ve devre dışı olduğu koşullardan elde edilen veriler eşleştirilmiş örneklem t-testi veya Wilcoxon Signed-Rank testi ile karşılaştırılarak etki büyüklükleri (Cohen's d) raporlanacaktır; bu karşılaştırmalı değerlendirme yaklaşımı literatürdeki benzer çalışmalarla uyumludur (Li vd., 2022).

Protokol, tasarımın kuramsal gerekçesinden türetilen üç araştırma hipotezini sınamak üzere kurgulanmıştır. Birinci hipoteze (H1) göre, AURA'nın aktif olduğu koşulda kritik durum algılama süresi ve ilk doğru müdahale süresi, AURA'nın devre dışı olduğu koşula göre daha kısadır. İkinci hipotez (H2), AURA'nın aktif olduğu koşulda algılanan bilişsel iş yükünün (NASA-TLX) daha düşük olacağını; üçüncü hipotez (H3) ise bu koşulda durumsal farkındalığın (SART) daha yüksek olacağını öngörmektedir.

İkinci eksen, AURA'nın kapsamının genişletilmesidir. Mevcut prototipte asistanın içeriği kalkış aşamasıyla sınırlıdır ve senaryolar önceden kaydedilmiş adım dizileri olarak oynatılmaktadır. İlk adım, aynı ayrıntı düzeyinin sırasıyla yaklaşma ve iniş, ardından seyir ve yer operasyonları için doldurulmasıdır; nihai hedef ise sistemin uçuşun tamamı boyunca, soğuk ve karanlık kokpitten kapatmaya kadar sürekli çalışan ve senaryonun elle seçilmesini beklemeden durumu telemetriden kendisi tanıyan bir yapıya dönüşmesidir. Bu dönüşüm, faz geçişlerinin ve arıza tetikleyicilerinin gerçek zamanlı veriyle beslenmesini gerektirir. Aynı doğrultuda, veri güdümlü mimarinin sağladığı kolaylıkla yakıt ve performans yönetimi, telsiz/ATC iletişimi ve kabin sistemleri gibi ek ekranlar tanımlanabilir; her yeni ekran, mevcut gezinme rayına eklenen ve Dynamic Focus kurallarını devralan bir görünüm olarak tasarlanacaktır.

Üçüncü eksen etkileşim kanallarının çeşitlendirilmesidir. Sesli komut katmanı, anahtar kelime eşleştirmesinden bağlamı anlayan doğal dil işlemeye taşınacak; standart havacılık fraseolojisi ile Türkçe/İngilizce karışık kullanım desteklenecek ve yüksek gürültü altında doğruluğu korumak için gürültü bastırma ve konuşmacıya odaklı tanıma eklenecektir. Sesli komutun yanına görüntü işleme tabanlı yöntemler de eklenecektir. Prototipin VR görünümünün üzerine kurulduğu WebXR, tarayıcıların sanal ve artırılmış gerçeklik başlıklarına doğrudan erişmesini sağlayan açık bir web standardıdır ve kullanıcının el pozisyonlarını kamera ile takip edebilme yeteneği sunar. Bu yetenek kullanılarak dokunmadan kart onaylama ve panel seçme gibi el hareketi (hand-gesture) komutları, kamera ile pilotun bakış yönünün ve baş pozisyonunun izlenerek odak vurgusunun pilotun gerçekten bakmadığı panellere yönlendirilmesi ve ortam ışığı ile görsel koşullara göre parlaklık ile kontrastın kendiliğinden ayarlandığı görüntü duyarlılığı gibi yetenekler geliştirilecektir. Bu kanalların hiçbiri mevcut onay mekanizmasını devre dışı bırakmayacak; her biri, sistemin danışman rolünü koruyan tamamlayıcı bir girdi olarak konumlandırılacaktır.

Son olarak, kural tabanlı motorun uzun vadede uçuş operasyon verileriyle eğitilen öğrenen modellerle desteklenmesi ve web tabanlı yazılımın fiziksel kontrol üniteleri ile aviyonik veri altyapılarına bağlanması hedeflenecektir. Bu adımlar sırasıyla öngörülü tavsiye üretimini ve gerçek kokpit koşullarında doğrulamayı mümkün kılacak; ancak her birinde açıklanabilirlik ve pilotta kalan karar ilkesi değişmez kısıt olarak korunacaktır.

KAYNAKÇA

Alomar, I., & Shafqat, A. (2026). Enhancing safety and workload management in eVTOL cockpits through the assessment of pilot's perception of HMI models. Aviation, 30(1), 49–61. https://doi.org/10.3846/aviation.2026.26073

Blundell, J., & Harris, D. (2023). Designing augmented reality for future commercial aviation: A user-requirement analysis with commercial aviation pilots. Virtual Reality, 27(3), 2167–2181. https://doi.org/10.1007/s10055-023-00798-9

Brand, Y., & Schulte, A. (2021). Workload-adaptive and task-specific support for cockpit crews: Design and evaluation of an adaptive associate system. Human-Intelligent Systems Integration, 3(2), 187–199. https://doi.org/10.1007/s42454-020-00018-8

Cao, K., Zhang, Y., Jiang, Y., Zeng, Y., Cui, B., & Dong, W. (2022). A civil aircraft cockpit layout evaluation method based on layout design principles. Aerospace, 9(5), Article 251. https://doi.org/10.3390/aerospace9050251

Güneşer, M. T., Aksakal, S. Y., Coşkunsu, M. A., Çakır, K. N., & Şahin, B. (2025). Designing an interactive glove with a robotic arm for virtual reality education applications. In 2025 9th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP) (pp. 1–7). IEEE. https://doi.org/10.1109/IDAP68205.2025.11222313

Hebbar, P. A., Vinod, S., Shah, A. K., Pashilkar, A. A., & Biswas, P. (2023). Cognitive load estimation in VR flight simulator. Journal of Eye Movement Research, 15(3), Article 11. https://doi.org/10.16910/jemr.15.3.11

Li, M., Wang, M., Ding, D., & Wang, G. (2022). Development and evaluation of single pilot operations with the human-centered design approach. Aerospace, 9(10), Article 601. https://doi.org/10.3390/aerospace9100601

Lutnyk, L., Kim, K. G., Sarbach, A., Kiefer, P., Häusler, R., & Raubal, M. (2025). Context-sensitive augmented reality assistance in the cockpit. International Journal of Human–Computer Interaction, 41(17), 11149–11168. https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2440976

Masi, G., Amprimo, G., Ferraris, C., & Priano, L. (2023). Stress and workload assessment in aviation—A narrative review. Sensors, 23(7), Article 3556. https://doi.org/10.3390/s23073556

Menig, A., Becker, N., & Kleudgen, J. P. (2025). Investigating the role of an AI-based assistance system for the decision-making process of pilots – An interview study. Transportation Research Procedia, 88, 167–175. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.05.021

Meng, X., Sun, H., & Kang, J. (2021). Equipment layout optimization based on human reliability analysis of cabin environment. Journal of Marine Science and Engineering, 9(11), Article 1263. https://doi.org/10.3390/jmse9111263

Puca, N., & Guglieri, G. (2024). Enabling civil single-pilot operations: A state-of-the-art review. Aerotecnica Missili & Spazio, 104(3), 187–212. https://doi.org/10.1007/s42496-024-00223-7

Song, F., Wang, W., Lin, H., & Tian, Y. (2022). A framework for designing the seamless automotive multimodal experience in future connected and autonomous vehicles [Conference presentation]. DRS2022: Bilbao, Spain. https://doi.org/10.21606/drs.2022.163

Tang, H., Lee, B. G., Towey, D., & Pike, M. (2024). The impact of various cockpit display

interfaces on novice pilots ’mental workload and situational awareness: A comparative study. Sensors, 24(9), Article 2835. https://doi.org/10.3390/s24092835

Wang, Y., Li, W.-C., Korek, W. T., & Braithwaite, G. (2024). Future flight deck design: Developing an innovative touchscreen inceptor combined with the primary flight display. International Journal of Industrial Ergonomics, 101, Article 103588. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103588

Xenos, M., Mallas, A., & Minas, D. (2024). Using eye-tracking for adaptive human-machine interfaces for pilots: A literature review and sample cases. Journal of Physics: Conference Series, 2716(1), Article 012072. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2716/1/012072

Zhang, Z., & Zhao, D. (2023). Smart cockpit layout design framework based on human-machine experience. In F. Rebelo & Z. Wang (Eds.), Ergonomics in design (AHFE International Open Access, Vol. 77, pp. 216–224). AHFE International. https://doi.org/10.54941/ahfe1003379

NUMERICAL ANALYSIS OF DRAG AND WAKE DYNAMICS FOR DIFFERENT AHMED BODY REAR-END GEOMETRIES

Bilge ÖZCAN
Middle East Technical University, Northern Cyprus Campus
ORCID ID: 0009-0000-5061-1502
Assist. Prof. Dr. Barış GÜNGÖRDÜ
Middle East Technical University, Northern Cyprus Campus
ORCID ID: 0000-0001-5192-3989

ABSTRACT

Aerodynamic drag associated with flow separation and wake formation is an important contributor to road vehicle energy consumption, with rear-end geometry playing a major role in determining pressure drag and wake characteristics. This study numerically investigates the aerodynamic characteristics of a two-dimensional Ahmed body using a commercial finite volume method solver at a freestream velocity of $U_\infty = 40$ m/s, corresponding to a Reynolds number of $Re_H \approx 7.9 \times 10^5$ based on the body height. The effects of rear slant angle, ground clearance, and lower-rear geometry on drag, pressure distribution, and wake behaviour are investigated.

Five configurations were analyzed: 25° and 35° rear slants with 50 mm ground clearance, a 90° square back, a 25° slant with a 45° lower spoiler, and a 35° slant with 100 mm ground clearance. The 25°, 35°, and 90° cases were additionally simulated under transient conditions. Mesh independence was established with less than 1% variation in drag coefficient between the medium and fine meshes, while the baseline cases were validated against published Ahmed body data. Steady drag coefficients of 0.3330, 0.3439, and 0.3510 were obtained for the 25°, 35°, and 90° configurations, respectively. The lower spoiler increased drag to 0.3397, while increasing ground clearance resulted in a drag coefficient of 0.3723. Transient analysis revealed the weakest wake response for the 25° configuration and the strongest for the square back, with dominant Strouhal numbers ranging from 0.131 to 0.150. Overall, the 25° rear slant provided the most favourable drag performance, whereas the square-back geometry produced the strongest separation and unsteady wake behaviour

Keywords: Ahmed body, computational fluid dynamics, aerodynamic drag, wake flow, rear slant angle.

1. INTRODUCTION

Road transportation is a major source of greenhouse-gas emissions, and road freight is particularly difficult to decarbonize because heavy-duty vehicles combine high energy demand with demanding range, payload, and operating requirements (Machado et al. 2021; Aryanpur and Rogan 2024). Alongside alternative powertrains and low-carbon fuels, reducing the energy required to move heavy road vehicles is therefore an important complementary route for reducing fossil-fuel use and associated CO_2 emissions.

At moderate and highway speeds, aerodynamic resistance becomes a major component of the tractive load of heavy vehicles. Reviews of heavy-vehicle aerodynamics consequently identify drag reduction and wake control as central design objectives (Choi et al. 2014). Numerical studies that include realistic duty cycles have also shown that aerodynamic drag-reduction devices can provide measurable fuel savings, with larger benefits generally obtained in long-haul operation where vehicles spend more time at higher speed (Mohamed-Kassim and Filippone 2010). Because aerodynamic drag is directly proportional to the drag coefficient,

reducing C_D through geometric optimization can contribute to lower tractive-energy demand and, for combustion-powered vehicles, lower fuel consumption and CO_2 emissions.

Aerodynamic drag is especially important for road vehicle performance at moderate to high speeds. For bluff-body vehicle shapes, a large part of the resistance is associated with pressure drag generated by flow separation and the low-pressure wake behind the body. The rear geometry therefore has a strong influence on drag coefficient, wake size, and base-pressure distribution. The Ahmed body is widely used as a simplified road-vehicle model because it retains the dominant aerodynamic features associated with flow separation and wake formation while maintaining a relatively simple geometry. In the present study, three rear-end configurations are considered: a 90° square-back geometry, representative of the bluff rear-end characteristics commonly associated with buses and heavy road vehicles, and 25° and 35° slant-back geometries, representing rear-end profiles more characteristic of passenger vehicles and SUVs. These configurations enable a systematic assessment of the influence of rear-end geometry on aerodynamic drag and wake behaviour.

Recent studies continue to employ the Ahmed body as a generalized road-vehicle model for investigating active and passive flow-control strategies aimed at reducing aerodynamic drag, as its simplified geometry retains the key flow-separation and wake characteristics relevant to road vehicles. (Zhang et al. 2025).

Ahmed et al. (1984) showed that rear slant angle strongly affects wake structure and drag. The 25° and 35° slant configurations are commonly studied because they lie close to the critical slant-angle range. Meile et al. (2011) reported wind-tunnel and numerical results for these two geometries at 40 ms^{-1}, while Khan and Umale (2014) provided a useful two-dimensional CFD (Computational Fluid Dynamics) comparison. Other studies have shown that the Ahmed-body wake is inherently unsteady and contains complex separated structures that are difficult to reproduce with steady two-dimensional RANS models (Lienhart et al. 2002; Hinterberger et al. 2004; Liu et al. 2021).

The present study uses a commercial finite volume solver to compare a two-dimensional Ahmed body with 25° and 35° rear slants, a 90° square back, a 25° slant with a 45° lower spoiler, and a 35° slant with increased ground clearance. The main outputs are drag coefficient, pressure and velocity fields, and transient wake behaviour. The 25°, 35°, and 90° cases are also simulated in the time domain to compare wake unsteadiness and base-drag response.

2. COMPUTATIONAL METHODS

2.1. Geometry and flow conditions

The Ahmed body dimensions are defined relative to the body height, H. The body has a length of $3.625H$, a front radius of $0.347H$, a rear slant length of $0.771H$, and a baseline ground clearance of $0.174H$. A two-dimensional side-view approximation of the Ahmed body is employed. The computational domain extends $43.5H$ in the streamwise direction and $18.125H$ in the vertical direction, with the inlet located $25.375H$ upstream of the body nose and the outlet located $14.5H$ downstream of the body tail.

Figure 1 illustrates the geometry and computational domain.

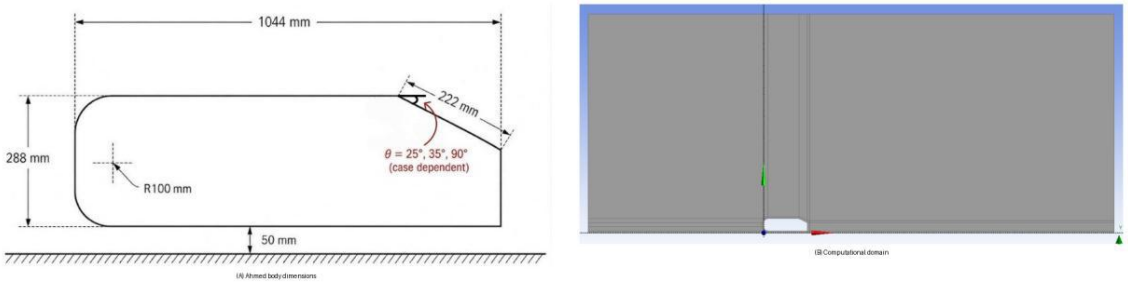


Figure 1. Ahmed body geometry and two-dimensional computational domain.

Table 1 presents the cases, geometry and the analysis conducted for the respective case. The ground clearances and the slant angles of the Ahmed body are varied across the studies.

Table 1. Ahmed body configurations considered in the study.

Case	Geometry	Analysis
1	25° slant, 50 mm ground clearance	Steady + transient
2	35° slant, 50 mm ground clearance	Steady + transient
3	90° square back	Steady + transient
4	25° slant with 45° lower spoiler	Steady
5	35° slant with 100 mm ground clearance	Steady

The inlet velocity is $U_\infty = 40$ ms^{-1}, with a turbulence intensity of 5%, and the outlet is defined as a zero-gauge-pressure outlet. The Ahmed body and ground are treated as no-slip walls, while the upper boundary is defined as a symmetry boundary. Air properties are $\rho = 1.225$ kg/m^3 and $\mu = 1.789 \times 10^{-5}$ Pa s, giving Reynolds numbers of approximately $Re_L = 2.86 \times 10^6$ based on the body length and $Re_H = 7.89 \times 10^5$ based on the body height. The Mach number was calculated as $M_\infty = U_\infty / a = 40/343 = 0.117$. Since M_∞ is below 0.3, compressibility effects were neglected, and the flow was treated as incompressible.

$$Re = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} \tag{1}$$

The primary aerodynamic quantity is the drag coefficient, C_D, which consists of skin friction and pressure drag.

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho U_\infty{}^2 A} \tag{2}$$

The base-pressure drag coefficient is calculated as:

$$C_B = -\frac{1}{A_{base}} \int C_p \, dA_{base} \tag{3}$$

The Strouhal number is used to compare dominant wake frequencies in transient simulation cases; it is a non-dimensional form of the vortex-shedding frequency. The dominant vortex-shedding frequency was determined by applying Power Spectral Density (PSD) analysis to the time-resolved drag-coefficient signal obtained from the transient simulations. The frequency corresponding to the dominant peak in the PSD spectrum was identified as the characteristic vortex-shedding frequency and was subsequently used to calculate the Strouhal number.

$$St = \frac{fH}{U_\infty} \quad (4)$$

2.2. Numerical model, Mesh, solver settings and validation

The incompressible Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations were solved for conservation of mass and momentum. The continuity equation is expressed as

$$\partial \bar{u}_i / \partial x_i = 0 \quad (5)$$

while the momentum equation is

$$\rho(\partial \bar{u}_i/\partial t + \bar{u}_j \partial \bar{u}_i/\partial x_j) = -\partial \bar{p}/\partial x_i + \partial/\partial x_j[\mu(\partial \bar{u}_i/\partial x_j + \partial \bar{u}_j/\partial x_i) - \rho u_i' u_j'] \quad (6)$$

The Reynolds stresses are modelled using the Boussinesq hypothesis,

$$-\rho u_i' u_j' = \mu_t(\partial \bar{u}_i/\partial x_j + \partial \bar{u}_j/\partial x_i) - (2/3)\rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

where the turbulent viscosity is obtained from the Realizable k–ε model.

A quad-dominant mesh is generated in ANSYS Meshing with refinement around the Ahmed body, the rear geometry, the ground gap, and the downstream wake region. Figure 2 presents the local and full-domain mesh.

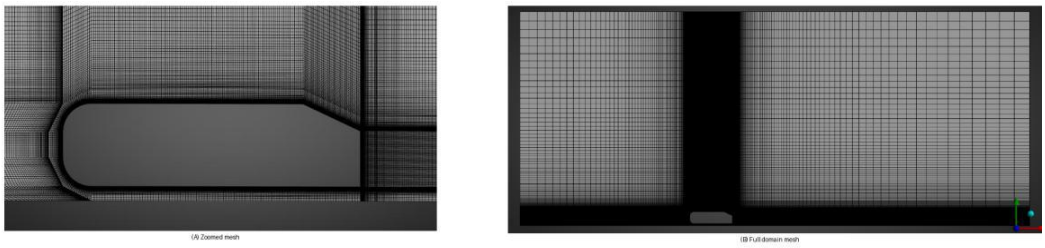


Figure 2. Zoomed and full computational mesh used around the Ahmed body.

Table 2 presents the mesh-independence study, which was performed using coarse, medium, and fine meshes. The drag coefficient changed by only 0.48% between the medium and fine meshes, so the medium mesh was selected for the main simulations as a balance between accuracy and computational cost.

Table 2. Mesh-independence results for the 25° baseline case.

Mesh	Elements	C_D	Difference
Coarse	26,400	0.3307	-
Medium	104,800	0.3330	0.69%
Fine	236,400	0.3314	0.48%

The simulations use a pressure-based, two-dimensional planar solver in ANSYS Fluent (v2025) with a Realizable k-ε turbulence model and second-order upwind discretization. Simulations were performed for all five geometries. In addition, the 25°, 35°, and 90° slant-angle cases were also solved in the time domain to obtain the transient behavior, using the converged steady solution as the initial condition. The time step was 0.0005 s for 3000 steps, corresponding to 1.5 s of computational time. Convergence in the steady simulations was checked using residuals and drag-coefficient stabilization.

Validation was performed using the 25° and 35° baseline cases. The present drag coefficients were compared with the wind-tunnel results of Meile et al. (2011) and the two-dimensional CFD results of Khan and Umale (2014). The 25° case showed an 11.37% difference from the experiment and a 7.02% difference from the two-dimensional reference. The 35° case showed a larger experimental deviation, which is consistent with the stronger three-dimensional wake sensitivity of this geometry. Figure 3 shows the validation comparison.

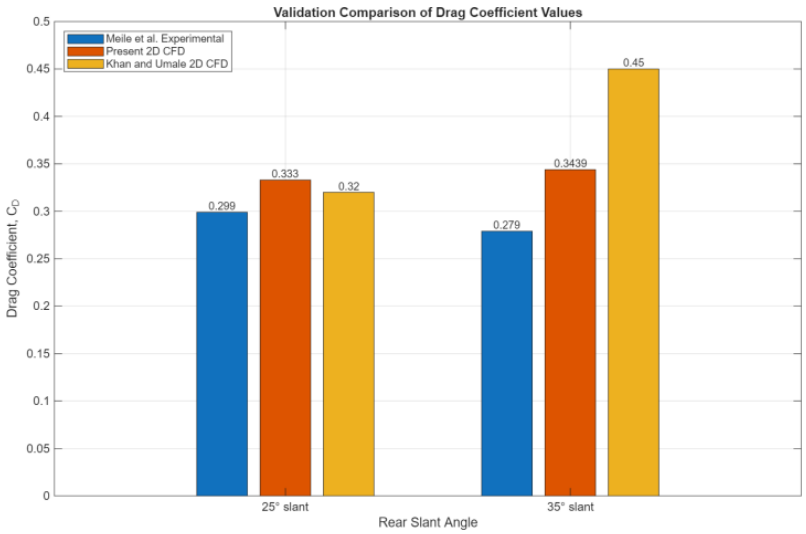


Figure 3. Validation comparison of drag coefficients for the 25° and 35° rear-slant cases.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 3 summarizes the drag coefficients of the five geometries. The 25° baseline produced the lowest drag among the principal rear-end configurations, while the 90° square back produced the highest of the 25°, 35°, and 90° cases. The spoiler and increased-ground-clearance modifications did not reduce drag in the present two-dimensional model.

Table 3. Drag coefficient comparison.

Geometry	Drag Coefficient, C_D
25° slant, 50 mm ground clearance	0.3330
35° slant, 50 mm ground clearance	0.3439
90° square back	0.3510
25° slant with 45° lower spoiler	0.3397
35° slant with 100 mm ground clearance	0.3723

The 35° case produced a larger separated low-velocity region than the 25° case and a more pronounced low-pressure region at the rear. This is consistent with its higher drag coefficient. The velocity and pressure contours in Figure 4 show the same trend: both cases form a recirculating wake, but the 35° configuration exhibits somewhat stronger separation.

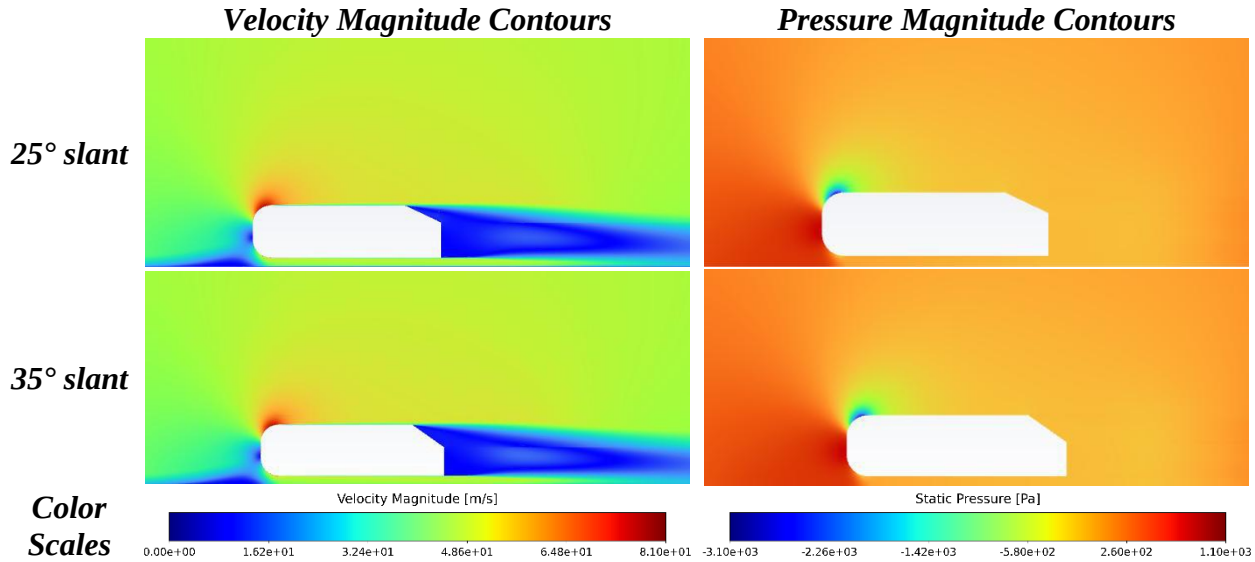


Figure 4. Velocity and pressure contours for the 25° and 35° rear-slant cases.

Removing the rear slant produced a more abrupt separation from the vertical rear face. The 90° square-back case reached C_D = 0.3510, 5.41% above the 25° baseline. The 45° lower spoiler increased drag from 0.3330 to 0.3397, indicating that the modification disturbed the rear flow rather than improving pressure recovery. Increasing the ground clearance of the 35° body from 50 mm to 100 mm increased C_D from 0.3439 to 0.3723. Figure 5 summarizes the flow fields of these three modified geometries.

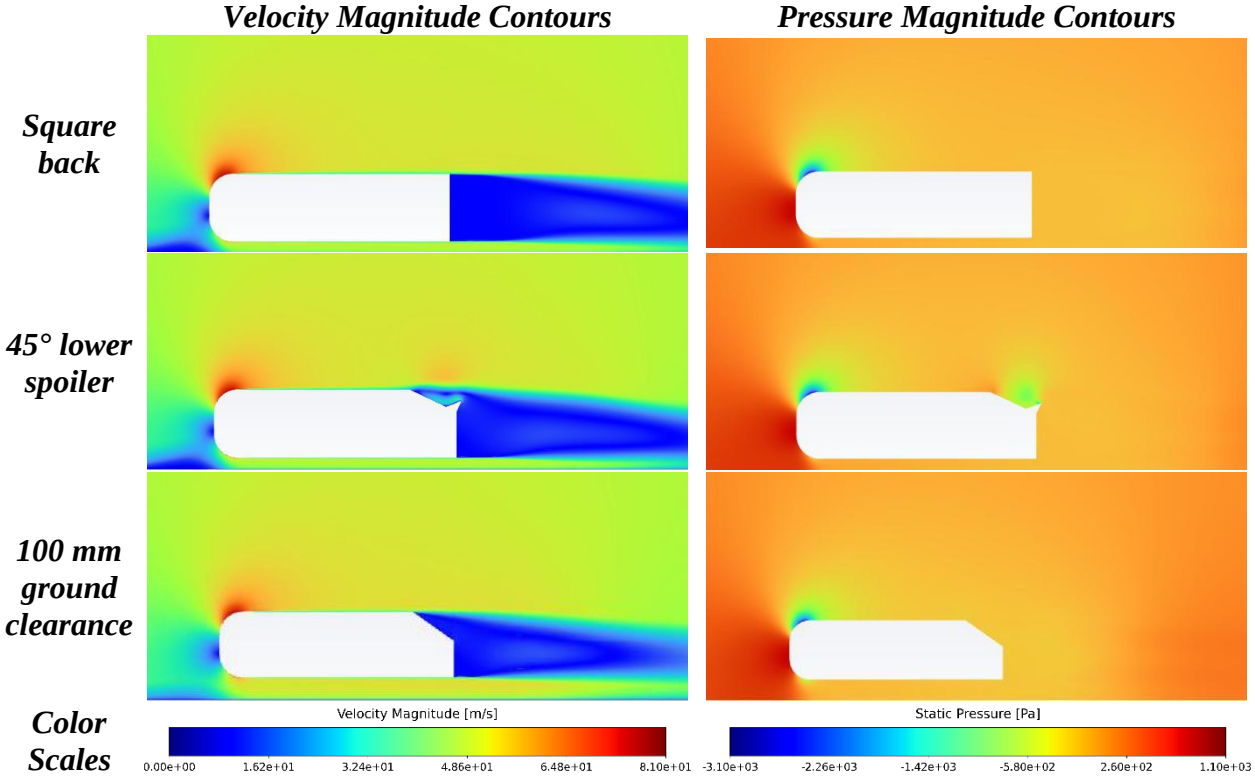


Figure 5. Flow-field results for the square-back, lower-spoiler, and increased-ground-clearance cases.

Time-domain simulations further emphasized the influence of rear geometry. The instantaneous velocity and pressure fields show increasingly strong wake disturbance from the 25° case to the

35° case and then to the 90° square-back configuration. The square-back wake is directly connected to the vertical rear face and contains the strongest recirculation and base-drag contribution. Figure 6 presents the representative transient contours.

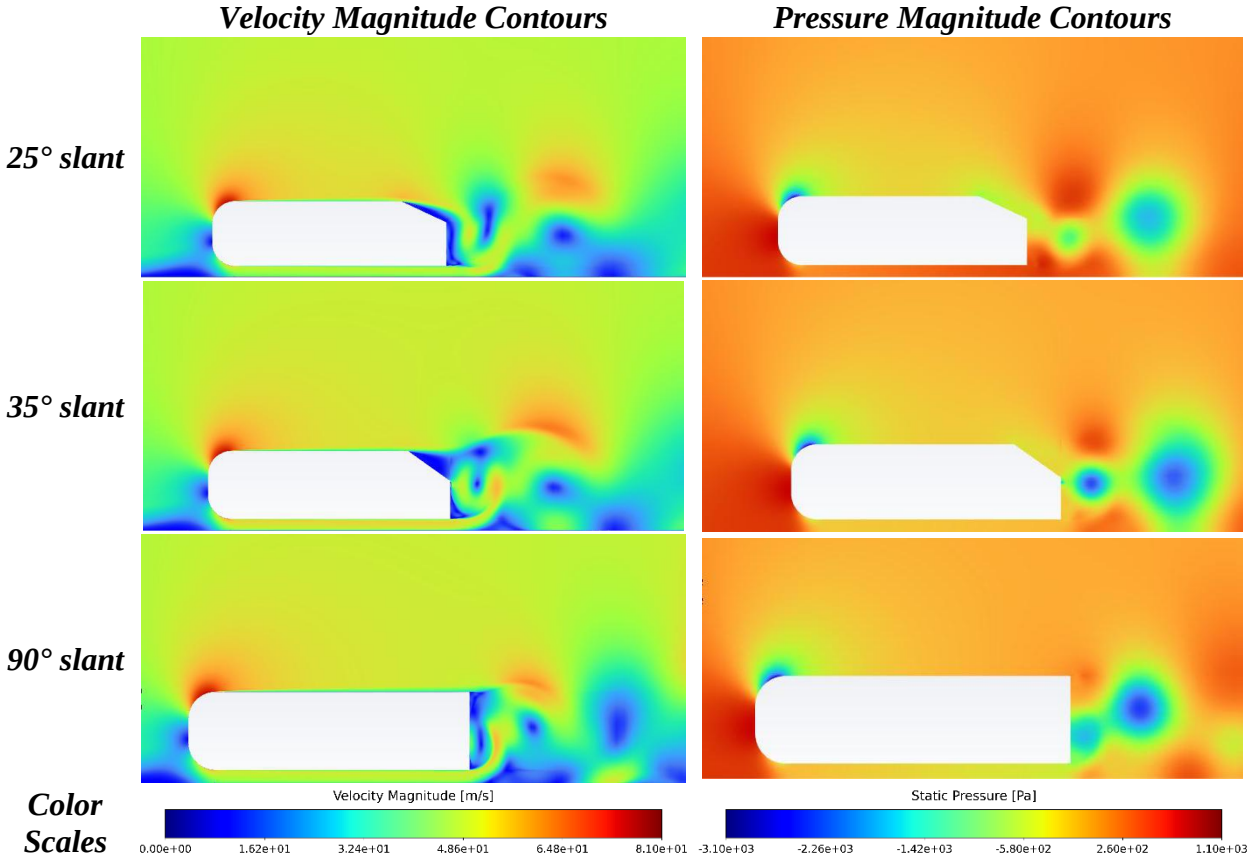


Figure 6. Transient velocity and pressure contours for the 25°, 35°, and 90° rear configurations.

Table 4 presents the total drag, base pressure drag, dominant frequency of the wake and its corresponding Strouhal number.

Table 4. Transient model drag and wake-frequency results.

Geometry	C_D	C_B	f (Hz)	St
25° slant	0.3330	0.084	18.2	0.131
35° slant	0.3439	0.1708	20.0	0.144
90° square back	0.3510	0.3268	20.8	0.150

The rear-end geometry has a clear influence on both the aerodynamic loading and the dominant wake dynamics of the two-dimensional Ahmed body. The drag coefficient increases from 0.3330 for the 25° slant to 0.3439 for the 35° slant and reaches 0.3510 for the 90° square-back configuration. A considerably stronger dependence on rear geometry is observed for the base-pressure drag coefficient, \(C_B\), which increases from 0.084 for the 25° configuration to 0.1708 for the 35° configuration and 0.3268 for the square-back case. This behaviour indicates the increasing contribution of the low-pressure base region as the rear geometry becomes more bluff. The comparatively smaller variation in the total drag coefficient reflects the redistribution of pressure forces between the slanted rear surface and the vertical base.

The modification of the rear geometry also affects the characteristic wake unsteadiness. The dominant shedding frequency increases from 18.2 Hz for the 25° slant to 20.0 Hz for the 35° slant and 20.8 Hz for the square-back configuration. The corresponding Strouhal numbers increase from 0.131 to 0.144 and 0.150, respectively. Overall, the results indicate that increasing rear-end bluntness strengthens the contribution of base-pressure drag while producing a moderate increase in the characteristic frequency of the unsteady wake.

The two-dimensional formulation adopted in the present study means that the results should primarily be interpreted in terms of relative differences between the investigated configurations rather than as exact predictions of the three-dimensional Ahmed-body flow. The model captures the dominant streamwise separation and unsteady wake behaviour in the side-view plane; however, three-dimensional effects such as side-edge and C-pillar vortices, as well as spanwise wake structures, cannot be represented. The absence of these flow features may also contribute to the differences between the present numerical predictions and available wind-tunnel measurements.

4. CONCLUSIONS

The aerodynamic characteristics of a two-dimensional Ahmed body were investigated for five rear-end configurations using the commercial finite volume solver ANSYS Fluent at a freestream velocity of 40 m/s, corresponding to a Reynolds number of $Re_H \approx 7.9 \times 10^5$ based on the body height. Mesh-independence assessment showed less than 1% variation in the drag coefficient between the medium and fine meshes, while validation of the 25° and 35° baseline configurations demonstrated that the numerical model reproduced the general drag characteristics reported in the literature, with closer agreement obtained for the 25° case.

Rear-end geometry had a clear influence on aerodynamic drag and wake behaviour. Among the principal rear-end configurations, the 25° slant produced the lowest steady drag coefficient $C_D = 0.3330$ followed by the 35° slant $C_D = 0.3439$ and the 90° square back $C_D = 0.3510$. Adding the lower spoiler increased the drag coefficient to 0.3397, while increasing the ground clearance of the 35° configuration to 100 mm resulted in the highest steady value, $C_D = 0.3723$. The transient simulations further demonstrated that rear-end geometry modifies the unsteady wake dynamics, with the dominant shedding frequency increasing from 18.2 Hz for the 25° configuration to 20.8 Hz for the square-back configuration. The corresponding Strouhal number increased from 0.131 to 0.150.

The results highlight the importance of rear-end geometry in controlling the aerodynamic resistance of bluff road-vehicle configurations. Lower-drag rear-end designs can contribute to reduced aerodynamic power demand, whereas the square-back geometry and the investigated spoiler and ground-clearance modifications produced higher aerodynamic resistance under the present conditions. Although fuel consumption and CO_2 emissions were not calculated directly, the aerodynamic trends provide a basis for evaluating rear-end modifications as part of broader strategies aimed at improving heavy-road-vehicle energy efficiency.

The principal limitation of the present study is its two-dimensional formulation. While this approach enables systematic and computationally efficient comparison of different rear-end geometries, it cannot reproduce inherently three-dimensional features of Ahmed-body wakes, including side-edge and C-pillar vortices, spanwise flow development, and asymmetric wake structures. The absence of these mechanisms may contribute to the differences observed between the numerical predictions and experimental measurements. Future work should therefore extend the analysis to three-dimensional transient simulations, together with improved wake-region refinement and appropriate moving-ground treatment, to provide a more complete

representation of the wake dynamics and quantitative comparison with wind-tunnel measurements.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Middle East Technical University, Northern Cyprus Campus Scientific Research Projects (BAP) Coordination Unit under Project No. 25-D-15.

REFERENCES

Ahmed SR, Ramm G, Faltin G. (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE Technical Paper 840300. doi: 10.4271/840300.

Aryanpur V, Rogan F. (2024). Decarbonising road freight transport: The role of zero-emission trucks and intangible costs. Scientific Reports 14, 2113. doi: 10.1038/s41598-024-52682-4.

Choi H, Lee J, Park H. (2014). Aerodynamics of Heavy Vehicles. Annual Review of Fluid Mechanics 46, 441-468. doi: 10.1146/annurev-fluid-011212-140616.

Hinterberger C, García-Villalba M, Rodi W. (2004). Large eddy simulation of flow around the Ahmed body. In: The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Springer.

Khan RS, Umale S. (2014). CFD aerodynamic analysis of Ahmed body. International Journal of Engineering Trends and Technology 18(7), 301-308.

Lienhart H, Stoots C, Becker S. (2002). Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (Ahmed model). In: New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Springer. doi: 10.1007/978-3-540-45466-3_39.

Liu K, Zhang D, Niu J, Wang J. (2021). Flow structure around a low-drag Ahmed body. Journal of Fluid Mechanics 913.

Machado PG, Teixeira ACR, Collaço FMA, Mouette D. (2021). Review of life cycle greenhouse gases, air pollutant emissions and costs of road medium and heavy-duty trucks. WIREs Energy and Environment 10(4), e395. doi: 10.1002/wene.395.

Meile W, Brenn G, Reppenhagen A, Lechner B, Fuchs A. (2011). Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. CFD Letters 3(1), 32-39.

Mohamed-Kassim Z, Filippone A. (2010). Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction. Transportation Research Part D: Transport and Environment 15(5), 275-284. doi: 10.1016/j.trd.2010.02.010.

Viswanathan H. (2021). Aerodynamic performance of several passive vortex generator configurations on an Ahmed body subjected to yaw angles. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering.

Zhang G, Song X, Hu X, Wang J, Yu T, Guo P, Li J. (2025). A review on the drag reduction of Ahmed body. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 239(14), 6845-6869. doi: 10.1177/09544070241307072.

SOSYAL AĞLARDA VERİ MADENCİLİĞİ KULLANILARAK KARŞIT GRUPLARIN BELİRLENMESİ

Öğr. Gör. Tuğba ALTINDAĞ
Baskent University, Computer Programming Programme, Vocational School of Technical Sciences, 06790 Etimesgut, Ankara
ORCID ID: 0000-0002-2999-1720

ÖZET
Bilgisayar ve bilişim dünyasının var olduğu günden beri veri de hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Teknolojinin ilerlemesi, haberleşme ve iletişimin boyut değiştirmesiyle, veri artık araştırmacıların analizleri için kullanılabileceği bir hale gelmiştir. İyi bir veri analizi yapabilmek için, veri ön işlemlerinden biri olan öz nitelik çıkarımını doğru yapmak oldukça önemlidir. Özellikle sosyal ağlarda çok büyük veriler bulunmaktadır. 2006 yılında Twitter'ın hayatımıza girmesiyle, petabaytlarla ifade edilen devasa bir veri havuzu oluşmuştur. Platform 2023 yılında X olarak yeniden markalaşmış ve API erişim politikalarında köklü değişikliklere gitmiştir. Günümüzde X (eski adıyla Twitter), milyonlarca kullanıcının olaylar hakkında düşüncelerini ve görüşlerini paylaşabildiği bir platform olmaya devam etmektedir. Bu makalede X verileri kullanılarak veri madenciliği yöntemleriyle karşıt grupların belirlenip belirlenmeyeceği incelenmiştir. Çalışmada, X API'sinin 2023 sonrasında akademik araştırma katmanını kaldırması ve yüksek maliyetli bir ücretlendirme modeline geçmesi nedeniyle, veri toplama sürecinde alternatif yöntemler değerlendirilmiştir. Tweet verilerinin elde edilmesi için önerilen yaklaşım, web scraping teknikleri veya düşük maliyetli API alternatifleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Tweet verileri olarak belirli bir konu üzerine gerçekleşmiş X mesajları seçilmiştir. Bu ham veriden mesajlarda geçen kelimeler, bunların tekrarlama sıklıkları, mesajlarla ilgili platform tarafından sağlanan istatistikî bilgiler ile geniş bir öz nitelik kümesi oluşturulmuş ve veri madenciliği metotları kullanılarak bunların analizi WEKA'da gerçekleştirilmiştir. Verileri kümelerken expectation maximisation (EM) algoritması kullanılarak, tweet verilerini düşük bir hata oranı ile iki sınıfta olumlu veya olumsuz olarak kümeleyebilmektedir. Günümüzde bu tür analizler, BERT ve RoBERTa gibi transformer tabanlı modellerle de desteklenmekte ve daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşılabilmektedir. Düşük hata oranıyla karşıt grupların doğru bir şekilde kümelenmesi sonucu, bu uygulamanın kıyaslama gerektiren her alana uygulanabileceği ve durum analizinde yol gösterici olabileceği değerlendirilmektedir.
Anahtar kelimeler: Sosyal ağ analizi, veri madenciliği, duygu analizi, kümeleme, X (Twitter), Karşıt Grup Tespiti

DETERMINATION OF OPPOSITE GROUPS IN SOCIAL NETWORKS USING DATA MINING

ABSTRACT
Datum is an indispensable part of our lives since computer and information technology has existed. With the advancement of technology and the transformation of information and communication, data can now be used for analysis by researchers. To conduct a good data analysis, feature extraction, which is one of the data pre-processing steps, is very important to perform correctly. Especially in social networks, there is a very large amount of data. Since

2006, when Twitter entered our lives, a massive data pool measured in petabytes has been created. The platform was rebranded as X in 2023 and underwent radical changes to its API access policies. Today, X (formerly Twitter) remains a platform where millions of users share their thoughts and opinions about events. In this paper, we examine whether opposing groups can be identified using data mining methods on X data. Due to the removal of the Academic Research track and the transition to a high-cost pay-per-use pricing model after 2023, alternative data collection methods are evaluated. X data can be collected using web scraping techniques or low-cost API alternatives. X messages on a specific topic were selected as the dataset. From this raw data, a wide feature set was created, including words in messages, their repetition frequencies, and statistical information about users. The analysis was performed in WEKA using data mining methods. Using the expectation maximization (EM) algorithm for clustering, tweet data can be clustered into positive or negative with a low error rate. Today, such analyses are supported by transformer-based models such as BERT and RoBERTa, achieving higher accuracy rates. As a result of correctly clustering opposing groups with a low error rate, this application can be applied to any area requiring comparison and can help determine the current situation and plan appropriate strategies.
Keywords: Social Network Analysis, Data Mining, Sentiment Analysis, Clustering, X (Twitter), Opposition Group Detection

1. GİRİŞ

Sosyal medya platformları, kullanıcıların günlük olaylara ilişkin düşüncelerini ve duygularını paylaşabildiği geniş bir dijital kamusal alan yaratmıştır. Bu platformlar arasında X (eski adıyla Twitter), kısa metin tabanlı yapısı ve hızlı bilgi yayılımı sayesinde özellikle dikkat çekmektedir. Ticari kuruluşlar için marka algısını yönetme aracı, araştırmacılar için ise toplumsal eğilimleri izleme kaynağı hâline gelen X, milyonlarca kullanıcının ürettiği içerikle petabaytlarla ifade edilen bir veri havuzu oluşturmaktadır.

Bu veri hacmi, veri madenciliği yöntemleriyle anlamlı örüntülerin çıkarılmasını hem mümkün hem de gerekli kılmaktadır. Özellikle belirli bir konu etrafında oluşan karşıt görüşlerin otomatik olarak tespit edilmesi, kamuoyu analizi, siyasi kutuplaşma çalışmaları ve kriz iletişimi gibi alanlarda önemli bir ihtiyaçtır. Literatürde bu yönde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Khan vd. (2013), Twitter verilerinin analizi için üç yönlü sınıflandırma algoritmasına dayanan bir yaklaşım önermiştir. Oussalah vd. (2013), Twitter üzerinden veri toplama, arama ve konum servisleri için bir yazılım mimarisi geliştirmiştir. Kosala ve Steven (2013) ise Twitter'dan gerçek zamanlı trafik bilgisi çıkarma üzerine çalışmıştır. Duygu analizi alanında ise Karim vd. (2025) ve Wolobah vd. (2025) gibi güncel çalışmalar, sosyal medya verilerinin tüketici davranışı tahmini ve gerçek zamanlı duygu izleme amacıyla kullanılabildiğini göstermektedir.

2023 yılında X'in API erişim politikalarında yaptığı köklü değişiklikler, bu alandaki araştırmaları doğrudan etkilemiştir. Ücretsiz akademik araştırma katmanının kaldırılması ve yüksek maliyetli "kullanım başına ödeme" modeline geçilmesi, birçok aktif projeyi durma noktasına getirmiştir (X API in 2026, 2026). Bu kısıtlamalar, araştırmacıları web kazıma tekniklerine ve Bluesky, Mastodon gibi alternatif platformlara yönlendirmiştir (Salathe ve Mohanty, 2025; Sorsa API, 2026).

Duygu analizi ve kutuplaşma tespiti alanında ise son yıllarda transformer tabanlı modeller öne çıkmaktadır. Louzar vd. (2026), federated BERT ile merkezi olmayan X duygu analizinde %95 doğruluk elde etmiştir. Reddy vd. (2025), VADER ve DistilBERT hibrit yaklaşımıyla gerçek zamanlı duygu analizi panoları geliştirmiştir. Çetinkaya vd. (2025) ise NARRA-SCALE çerçevesiyle retweet ağları üzerinden anlatı tespiti yaparak kutuplaşmış toplulukları

belirlemiştir. Bu çalışmalar, X'in siyasi ve ideolojik tartışmalarda nasıl bir arena işlevi gördüğünü ortaya koymaktadır.

Bu makale, X verileri üzerinden karşıt grupların veri madenciliği yöntemleriyle otomatik olarak belirlenip belirlenemeyeceğini incelemektedir. Çalışmanın özgün katkısı, kümeleme ve sınıflandırmayı ardışık bir model içinde birleştirerek kullanıcı desteksiz başlatılan bir süreçte karşıt görüşleri düşük hata oranıyla ayırt edebilen bir yaklaşım önermesidir.

2. YÖNTEM VE ÖNERİLEN MODEL

X (eski adıyla Twitter), kullanıcıların 280 karaktere kadar (eski sürümde 140 karakter) metin tabanlı paylaşımlar yapabildiği bir sosyal ağdır. Bu karakter sınırı, kullanıcıların görüşlerini kısa ve öz biçimde ifade etmesini gerektirdiğinden, veri madenciliği açısından analiz edilebilirliği yüksek bir metin yapısı sunmaktadır.

2.1. X API ve Veri Erişimindeki Güncel Durum

X API, Fielding (2000) tarafından tanımlanan REST mimarisine dayanmaktadır. OAuth yetkilendirme mekanizmasını kullanmaktadır (Green, 2013). X API üç temel API sağlamaktadır: Streaming API, REST API ve Search API (dev.twitter.com, 2013). Ancak 2023 sonrasında önemli değişiklikler yaşanmıştır:

Akademik Araştırma Katmanı Kaldırılmıştır: X, 2023 yılında ücretsiz Academic Research API katmanını yeni başvurulara kapatmış ve mevcut hesaplardan da kaldırmıştır. Bu durum, 100'den fazla aktif araştırma projesini durma noktasına getirmiştir. 2026 itibarıyla hala özel bir akademik katman bulunmamaktadır (X API in 2026, 2026).

Yeni Ücretlendirme Modeli: X, 2026 yılı başında geliştiricileri "kullanım başına ödeme" kredisi sistemine geçirmiştir. Okuma başına maliyet yaklaşık 0,005 dolar olup, hesaplar aylık 2 milyon okuma ile sınırlandırılmıştır. Eski Pro katmanı (aylık 5.000 dolar) yeni kayıtlara kapatılmıştır ve 2 milyon okuma limiti aşıldığında aylık maliyet 42.000 dolara kadar çıkabilmektedir.

Bu kısıtlamalar, araştırmacıları alternatif veri toplama yöntemlerine yönlendirmiştir:

Web Kazıma: X'in GraphQL arayüzü üzerinden veri toplamak için twscrape gibi Python kütüphaneleri kullanılabilmektedir (Sorsa API, 2026).

Ticari Kazıma Araçları: Octoparse gibi ticari araçlar, resmi API'nin yüksek maliyeti ve sınırlamaları nedeniyle tercih edilmektedir.

Alternatif Platformlar: Bluesky ve Mastodon gibi merkezi olmayan sosyal ağlar, daha açık API'leri ve araştırma için daha etik erişimleri nedeniyle alternatif veri kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Salathe ve Mohanty, 2025).

2.2. Uygulamanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, belirli bir kullanıcı hesabına yönelik mesajları toplayarak bu mesajların pozitif veya negatif olmasına göre karşıt grupların otomatik olarak belirlenmesidir.

2.3. X Mesajlarının Çekilmesi

Arama sorgusunda kullanıcı kriteri @kullanıcı_adı biçiminde verilmektedir. Sorguya "until" ve "since" anahtar kelimeleriyle tarih kısıtlamaları eklenebilmekte, farklı parametrelerle başka filtreler uygulanabilmektedir. Sorgu sonucunda paylaşımların içeriği, retweetler, cevaplar, mesajın yazarı, yazılma zamanı, konum bilgisi ve kullanıcının takipçi/takip sayısı gibi çok sayıda bilgi elde edilebilmektedir. X sorgularının yanıtı JSON formatındadır; ancak bu çalışmada verilerin tablo formatında analiz edilebilmesi için JSON'dan CSV formatına dönüştürme işlemi uygulanmıştır.

Günümüzde resmi API yerine web kazıma yöntemleri de tercih edilebilmektedir. Örneğin, oturum açmış bir tarayıcı oturumunu otomatize eden bir Python betiği ile kullanıcının geçmiş paylaşımları arşivlenebilmektedir.

2.4. X Mesajlarının Analizi ve Öz Niteliklerin Oluşturulması

Çalışmada mesajlar içerisinde geçen ortak kelimeler belirlenmiş ve X'ten dönen istatistikî bilgilerle birlikte kullanılarak öz nitelik kümesi oluşturulmuştur. Mesajlardaki @ ve # gibi özel işaretler dışındaki tüm özel işaretler ve sayılar kaldırılmış; kelimelerin biçiminden çok anlamı üzerinde çalışabilmek için tüm mesajlar küçük harfe dönüştürülmüştür. Bu sayede "gezi" ile "GEZİ" aynı kabul edilirken, "başkan" ile "başgan" arasındaki ayrım korunmuştur. Bu ayrım, bir kullanıcının hitap biçiminin destekçi veya karşıt grup içinde yer aldığına dair ipucu vermesi açısından önemlidir.

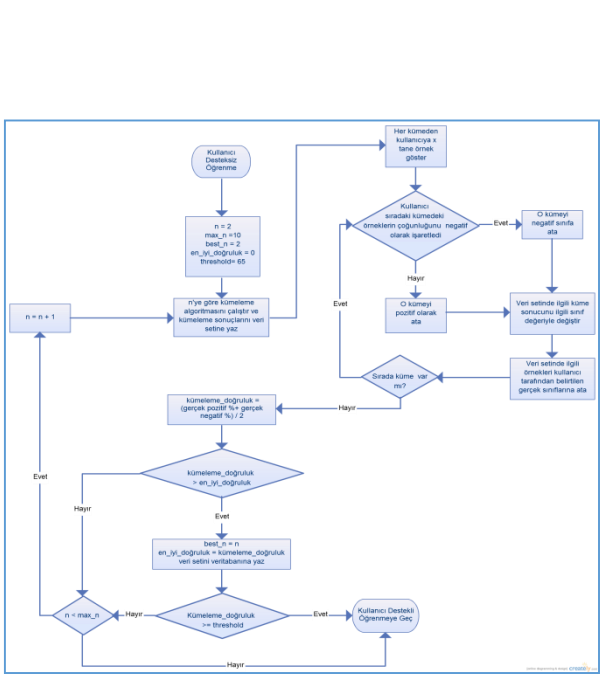
2.5. Kullanılan Veri Madenciliği Yöntemi: Kümeleme ve Sınıflandırma

Büyük ölçekli veri setlerinde öğrenme sürecinin kullanıcı destekli yürütülmesi, her bir verinin analist tarafından etiketlenmesini gerektirdiğinden zaman alıcı ve zahmetlidir. Bu nedenle mümkün olduğunda kullanıcı desteksiz bir model tercih edilmektedir. Bu amaçla en sık başvurulan yöntemlerin başında kümeleme algoritmaları gelmektedir.

Bu çalışmada, belirli bir kullanıcıya ait çok sayıda X mesajı farklı kümeleme modelleriyle gruplandırılmış; kullanıcıyı destekleyen ve kullanıcıya karşıt düşünce içeren mesajlar ayrıştırılmaya çalışılmıştır. Kullanıcı destekli bir sisteme kıyasla bu gruplandırmanın başarısı daha düşük olmakla birlikte, herhangi bir X kullanıcısı için özel bir çalışma gerektirmeden mesajların pozitif veya negatif olarak kümelenmesini sağlamaktadır.

Sistem başlangıçta kullanıcı desteksiz olarak başlatılmaktadır. Akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir. Statik analizden çıkan kümeler, kullanıcıya sorulan sorularla hangi sınıfa ait olduğu belirlenerek etiketlenmektedir. Örneğin başlangıçta beş farklı küme belirlenmişken, kullanıcı geri bildirimleriyle bu sayı üç sınıfa indirilebilmektedir. Bazı kümelerin kendi içinde yeniden kümelenmesi gerekebilmektedir. Bu noktada iki yol izlenebilir: kullanıcıdan alınan cevaplarla grubu kesin olarak belirlenemeyenler arka planda paralel işlemle kümelenebilir veya bu çalışmada önerildiği gibi kümeleme yerine segmentasyon uygulanabilir. Kümeleme gruplar arasındaki sınırları bulurken, segmentasyon bu sınırları kullanarak grupları oluşturur.

İlk kümeleme sonucunda belirli ölçüde hata bulunmaktadır. Kümelerin sınıf etiketleri iyi veya kötü biçimde belirlenmiştir. Kümeleme sonucu yeterli değilse, yeniden kümeleme yapmak yerine SVM ile sınıflandırma yapıldığında daha iyi sonuç elde edilmiştir. SVM, bir sınıflandırma yöntemi olarak daha doğru bir segmentasyon sağlayabilmektedir. SVM genelleme yapmaktadır. Elimizdeki veriyi kümelere göre, uzayı en genelleme yapacak şekilde bölmektedir. Bu sistemin akış diyagramı Şekil 2'de gösterildiği gibidir. SVM'in tercih edilmesinin nedenleri arasında hızlı çalışması, yapay sinir ağlarına kıyasla verileri genelleme şansının daha yüksek olması ve çok büyük veri setlerinde insan algısıyla bulunması zor kuralları iyi ayırabilmesi yer almaktadır. Yapay sinir ağlarının bu tür büyük verilerde aşırı uyum (ezberleme) göstermesi, SVM'in tercih edilmesinde etkili olmuştur.



Şekil 1. Kullanıcı Desteksiz Öğrenme
Şekil 2. Kullanıcı Destekli Öğrenme

Günümüzde bu tür analizler geleneksel EM ve SVM yöntemlerinin ötesine geçmiştir. Öne çıkan güncel yaklaşımlar şunlardır:

Transformer Tabanlı Modeller: BERT, RoBERTa, DistilBERT gibi modeller duygu analizinde yeni standart haline gelmiştir. Örneğin, ince ayarlanmış bir BERT modeli sosyal medya yorumlarında %99.60 doğruluk elde edebilmektedir (Das vd., 2025). Ayrıca BERT-LSTM-Attention gibi hibrit çerçeveler de önerilmiştir (Zhang vd., 2025).

Hibrit Yaklaşımlar: VADER (kural tabanlı) ile DistilBERT (derin öğrenme) hibrit sistemleri gerçek zamanlı duygu analizi için kullanılmaktadır (Reddy vd., 2025).

Federated BERT: Merkezi olmayan X duygu analizinde %95 doğruluk elde edilmiştir (Louzar vd., 2026)..

TWSSenti: BERT, GPT-2, RoBERTa, XLNet ve DistilBERT gibi transformer modellerini birleştiren hibrit bir yaklaşımdır (Albladi vd., 2025).

3. SONUÇLAR

Başlangıçta kümeleme yapmamızın amacı, binlerce veri olduğu için veri ayrımını kullanıcı desteksiz yapıp ortak özelliklerden matematiksel olarak öbekleri çıkarttığı zaman bu kümelenmiş verilerden de en doğru kaynak olan kullanıcıdan gerçekten filtrelenmesi gereken bir mesaj olup olmadığını öğrenmektir. Dolayısıyla her kullanıcı için özelleşmiş bir mesaj filtreleme önerilmektedir. Daha sonra kullanıcının mesajlarını spam olarak seçip ya da seçmemesiyle, kullanıcı sayesinde elimizde kullanıcı destekli öğrenme yöntemi olan SVM ile sınıflandırma yapmamıza imkân vermekte ve çok daha başarılı bir filtreleme

gerçekleştirilmektedir. Kullanıcıya mesaj gelme hızında, hızlı eğitilebilmesinden dolayı sınıflandırma kullanımında SVM seçilmiştir.

Güncel literatürle karşılaştırıldığında, benzer çalışmaların doğruluk oranları, NARRA-SCALE çerçevesi ile kutuplaşmış topluluk tespitinde %91 doğruluk (Çetinkaya vd., 2025), İrlanda'daki kürtaj referandumu üzerine yapılan ağ çalışmasında %90.9 doğruluk, Federated BERT ile merkezi olmayan duygu analizinde %95 doğruluk (Louzar vd., 2026), TWSSenti hibrit yaklaşımı ile %94 doğruluk (Albladi vd., 2025) şeklindedir.

Bu çalışmada uygulanan EM tabanlı kümeleme ve ardından SVM ile sınıflandırma yaklaşımı, karşıt görüşlerin ayrıştırılmasında başarılı sonuçlar üretmiştir. Elde edilen kümelerin kullanıcı geri bildirimleriyle etiketlenmesi, sınıflandırma doğruluğunu artırmış ve sistemin zaman içinde öğrenmesine olanak tanımıştır. Güncel literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında (NARRA-SCALE %91, Federated BERT %95, TWSSenti %94), önerilen hibrit yöntemin rekabet edebilir düzeyde olduğu değerlendirilmektedir. Özellikle kullanıcı destekli öğrenme aşamasının, kullanıcı desteksiz kümeleme sonuçlarını anlamlı ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir.

Gelecek çalışmalar kapsamında, transformer tabanlı modellerin (BERT, RoBERTa, DistilBERT) mevcut sisteme entegre edilerek doğruluğun artırılması (Zhang vd., 2025), X API'sinin yüksek maliyeti nedeniyle Bluesky ve Mastodon gibi merkezi olmayan platformlardan veri toplama altyapısının geliştirilmesi (Salathe ve Mohanty, 2025), twscrape gibi araçlarla web kazıma süreçlerinin otomatize edilmesi (Sorsa API, 2026) ve Türkçe ile diğer diller için BERTurk gibi modellerin entegrasyonu (Wicaksono vd., 2025) yer almaktadır.

KAYNAKLAR

Albladi, A., Uddin, M. K., Islam, M., & Seals, C. (2025). TWSSenti: A Novel Hybrid Framework for Topic-Wise Sentiment Analysis on Social Media Using Transformer Models. arXiv.

Çetinkaya, Y. M., Trivedi, A., Yanamandala, V. D., Cowan, M. A., Toroslu, İ. H., & Davulcu, H. (2025). NARRA-SCALE: Scaling Users and Messaging Through Narrative Detection in Retweet Networks. 2025 IEEE 37th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), Athens, Greece, 187-194. doi: 10.1109/ICTAI66417.2025.00032

Das, U. K., Ani, R. S., Datta, N., et al. (2025). Enhancing sentiment analysis accuracy on social media comments using a tuned BERT model. Discover Computing, 28, 198. https://doi.org/10.1007/s10791-025-09599-x

dev.twitter.com. (2013). https://dev.twitter.com/docs/api/1.1/get/search/tweets

Fielding, R. T. (2000). Architectural Styles and the Design of Network Based Software Architecture. Ph.D. Thesis, University of California.

Green, A. (2013). Twitter API Engagement Programming. Adam Green Press.

Karim, S. M. R. U., Rasul, R. A., & Sultana, T. (2025). Sentiment Analysis of Social Media Data for Predicting Consumer Behavior Trends Using Machine Learning. arXiv.

Khan, F. H., Bashir, S., & Qamar, U. (2013). TOM: Twitter opinion mining framework using hybrid classification scheme. Decision Support Systems, Elsevier.

Kosala, R., & Steven, E. A. (2013). Harvesting Real Time Traffic Information from Twitter. Procedia Engineering, 50, 1-11.

Louzar, O., Elbaghdadi, A., El Oualkadi, A., Baida, O., & Lyhyaoui, A. (2026). An Empirical Study of Federated BERT for Decentralized Twitter Sentiment Analysis. Informatics, 13(5), 73. https://doi.org/10.3390/informatics13050073

Oussalah, M., Bhat, F., Challis, K., & Schnier, T. (2013). A software architecture for Twitter collection, search and geolocation services. Knowledge-Based Systems, Elsevier.

Reddy, Y. A., Agarwal, S., Parashar, V., & Arora, A. (2025). Visualizing Public Opinion on X: A Real-Time Sentiment Dashboard Using VADER and DistilBERT. arXiv.

Salathe, M., & Mohanty, S. P. (2025). Decentralized Social Media and Artificial Intelligence in Digital Public Health Monitoring. arXiv.

Sorsa API. (2026). Twitter/X API Alternative & Scraper.

Wicaksono, D., Rozaq, H. A. A., & Boz, N. (2025). Emotion Recognition for Low-Resource Turkish: Fine-Tuning BERTurk on TREMO. arXiv.

Wolobah, T. F., Chethana, K., Harshini, J. C., & Saravanan, S. (2025). A Scalable Framework for Real-Time Twitter Sentiment Monitoring and Hashtag Trend Analysis. 2025 5th International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT), MANDYA, India, 1-6. doi: 10.1109/ICERECT65215.2025.11376202

X API in 2026: Credit Pricing + 3 Cheaper Routes. (2026). socialcrawl.dev

Zhang, X., Liu, Y., Zhang, T., Hou, L., Liu, X., Guo, Z., & Mulati, A. (2025). A BERT–LSTM–Attention Framework for Robust Multi-Class Sentiment Analysis on Twitter Data. Systems, 13(11), 964. https://doi.org/10.3390/systems13110964

YAPAY SİNİR AĞLARI TABANLI DENETİMSİZ ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANILARAK ÜRETİM SEKTÖRÜNDE SATIN ALMA PROFİLLERİNİN GRUPLANDIRILMASI

Ahmet GÜRGAŞİN
Astor Enerji A.Ş. AR-GE Merkezi Sincan, Ankara
ORCID ID: 0000-0003-1954-0253

ÖZET
Bu çalışmada, endüstriyel üretim ortamlarında uzun dönemli malzeme alım verileri kullanılarak mevcut alımların yapay sinir ağı tabanlı denetimsiz makine öğrenimi algoritmaları ile gruplandırılması amaçlanmıştır. Çalışmada mevcut tabular yapıdaki veri seti doğrudan işlemsel kayıtların kullanılması olarak kullanılmamış, tedarikçi-tedarik kategorisi düzeyinde değişken olarak tanımlanmıştır. Diğer değişkenler ise ekonomik özellik, kategori bazında harcama oranı, işlem sıklığı, dönemsel süreklilik, ürün çeşitliliği, göreli fiyat düzeyi, fiyat oynaklığı, termin süresi ve termin tarihinden sapma göstergeleri şeklindedir. Kümeleme işlemleri için Kendini Örgütleyen Haritalar (Self-Organizing Maps; SOM) ile Otokodlayıcı tabanlı gizil temsil ve K-Ortalamalar yaklaşımı kullanılmış, modellerin performans skorları karşılaştırılmıştır. Kümeleme çözümleri Silhouette, Calinski-Harabasz ve Davies-Bouildin ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. SOM modeli beş kümeli çözümde yaklaşık olarak 0,34 Silhouette ve 0,97 Davies-Bouildin sonucu üretirken, Otokodlayıcı + K-Ortalamalar hibrit modeli üç kümeli bir çözüm için 0,315 Silhouette değeri ve daha yüksek Calinski-Harabasz sonucu üretmiştir. Elde edilen sonuçlar, yöntemlerin aynı satın alma verisi için farklı düzeylerde bir temsil işlemi gerçekleştirdiğini göstermektedir. SOM modeli daha ayrıntılı bir kümeleme yöntemi sağlarken Otokodlayıcı ve K- Ortalamalar yaklaşımı daha dar küme yapısı elde etmiştir. Sonuçlar, her iki modelinde malzeme satın alma verileri için işletme düzeyinde kullanılabileceğini ve mevcut satın alma yapısının özelliklerinin kümelenerek veri odaklı karar destek sistemleri için bir analitik işlem katmanı oluşturabileceğini göstermektedir.
Anahtar Kelimeler: Kendini Örgütleyen Haritalar, K-Ortalamalar, Karar Destek Sistemleri

CLUSTERING OF PURCHASING PROFILES IN THE MANUFACTURING SECTOR USING UNSUPERVISED LEARNING ALGORITHMS BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ABSTRACT
In this study, the aim was to cluster existing procurement data in industrial production environments using unsupervised machine learning algorithms based on artificial neural networks. The dataset, which had a tabular structure, was not used directly as transactional records but was defined as a variable at the supplier-procurement category level. Other variables included economic characteristics, expenditure ratio by category, transaction frequency, seasonal continuity, product variety, relative price level, price volatility, delivery lead time, and deviation from delivery date indicators. For clustering, Self-Organizing Maps (SOM), an autoencoder-based latent representation, and the K-Means approach were used, and the performance scores of the models were compared. The clustering solutions were evaluated using the Silhouette, Calinski-Harabasz, and Davies-Bouildin criteria. While the SOM model produced a Silhouette score of approximately 0,34 and a Davies-Bouildin score of 0,97 for a five-cluster solution, the Autoencoder + K-Means hybrid model produced a Silhouette score of

0,315 and a higher Calinski-Harabasz score for a three-cluster solution. The results indicate that the methods perform representation at different levels for the same purchasing data. While the SOM model provides a more detailed clustering method, the Autoencoder and K-Means approach yields a tighter cluster structure. The results indicate that both models can be used at the operational level for material procurement data and that clustering the characteristics of the existing procurement structure can form an analytical layer for data-driven decision support systems.
Keywords: Self-Organizing Maps, K-Means, Decision Support Systems

1. GİRİŞ

İşletmeler analitik yöntemleri kullanarak tedarikçi yönetiminde faydalı sonuçlar elde edebilirler. Tedarikçi yönetiminde mevcut tedarikçiler farklı malzeme gruplarında farklı ekonomik veya operasyonel roller üstlenebilir. Bu durum tedarikçinin sadece belirli bir puan yapısıyla değerlendirilmesinde istenilen sonuçları veremeyebilir. İşletmelerin satın alma sıklıkları proje yapılarına göre değişebilmektedir. Bu gibi durumlar mevcut satın alma yapısındaki değişkenlerin ağır kuyruklu ve çarpık dağılımlar ile modellenmesine neden olabilmektedir.

Tedarikçi yönetiminde kullanılabilecek analitik işlemlerden birisi de kümeleme yöntemleridir. Kümele yöntemleri önceden tanımlanan bir etiket yapısı yer almadığında veri kümesinde yer alan gözlemleri yakınlık derecelerine göre gruplandırmaktadır. Bu gruplandırmada kümeler arasındaki uzaklıkların minimum, küme içi benzerlik değerleri ise maksimum olacak şekilde belirlenmektedir [12].

Literatürde kümeleme analizi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada yapay sinir ağları (YSA) tabanlı denetimsiz öğrenme yöntemlerinden Kendini Örgütleyen Haritalar (Self-organizing maps; SOM) ve Otokodlayıcılar ile K-Ortalamalar yöntemleri kullanılarak elde edilen hibrit bir model kullanılmıştır. Yapay sinir ağları, biyolojik sinir sisteminden esinlenerek geliştirilen bir makine öğrenimi yöntemidir [5]. Algoritma birçok veri setinden anlamlı bir bilgi çıkarmak ve nesnelerin içerisindeki gizli örüntüleri bulmak için kullanılmaktadır [9].

Bu kapsamda SOM yöntemi, gözlemler arasındaki benzerlik ilişkilerini koruyarak verileri düşük boyutlu bir harita üzerinde gruplandırmıştır. Otokodlayıcı yapısı ise verilerin temel özelliklerini daha düşük boyutlu bir temsile dönüştürmüş ve elde edilen bu temsil K-Ortalamalar algoritmasına aktarılarak benzer özelliklere sahip gözlemlerin sınıflandırılması amaçlanmıştır. Bu sayede YSA'nın örüntü ve temsil öğrenme yeteneği ile kümeleme algoritmalarının gruplandırma yeteneği bir arada kullanılarak tedarikçilerin benzer özelliklere göre gruplandırılması amaçlanmıştır.

2. MATERYEL VE METOT

2.1. Araştırma Tasarımı

Çalışma tek bir işletmeye ait geçmiş dönemlere ait test veri seti kullanılarak bir pilot çalışma olarak hazırlanmıştır. Kullanılan her iki modelde aynı veri seti üzerinde uygulanmıştır. Gruplandırma işlemi için herhangi bir küme etiketi önceden tanımlanmamıştır. Bu nedenle model başarısı küme içi benzerlik, kümeler arası ayrışma ve farklı başlangıçlardaki kararlılık yapısına göre değerlendirilmiştir.

İşletme satın alma verilerinin tedarikçi-malzeme birliktelik yapısıyla incelemek ve benzer davranış yapılarına göre gruplandırmak amaçlanmaktadır. Model, ekonomik öneme sahip ilişkileri, belirli bir malzeme grubunda yoğunlaşan tedarikçileri, fiyat değişimlerini ve termin performanslarını ortak bir analitik yapıda izlenebilir hale getirmeyi hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında bazı araştırma sorularına yanıt aranmıştır. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir.

i. Tedarikçi-malzeme yapısı ekonomik ölçek, süreklilik, çeşitlilik, fiyat ve termin performanslarına göre hangi grupları oluşturmaktadır?
ii. SOM ile Otokodlayıcı + K-Ortalamalar modeli aynı satın alma ilişkilerini farklı biçimde gruplandırmakta mıdır?
iii. Elde edilen gruplar tedarikçi yönetimine yönelik karar destek sistemi için herhangi bir girdi sağlayabilir mi?

2.2. Veri Seti

Veri kaynağı olarak enerji sektöründe üretim alanında faaliyet gösteren Astor Enerji A.Ş.'nin geçmiş T yıla ait olan veri setinden elde edilen bir test veri seti kullanılmıştır. Çalışma kapsamında sadece belirli bir ürün özelliğine yönelik işlem gerçekleştirilmiştir. Analitik birim tedarikçi ve malzeme niteliği birleşimi olarak tanımlanmıştır. Bu yapı ile bir tedarikçinin farklı malzeme niteliklerindeki davranışlarının tek bir ortalama içerisinde kaybolmadan görünür kılınması amaçlanmıştır. Verilerin hazırlanmasında 631 analitik birim oluşturulmuştur. Çalışmada dokuz farklı değişken kullanılmıştır. Bunlar ekonomik ölçek, süreklilik, çeşitlilik, fiyat davranışı ve termin durumunu ifade edebilecek şekilde oluşturulmuştur.

2.3. Kendini Örgütleyen Haritalar

Kendini Örgütleyen Haritalar (Self-organizing maps; SOM), 1981 yılında Teuvo Kohonen tarafından geliştirilen bir öğretmensiz öğrenme yapan bir YSA algoritmasıdır [8]. SOM, bir girdi değişkeni varken çıktı değişkeni olmayan denetimsiz öğrenme yapan bir sinir ağı yöntemidir [14].

SOM, çok boyutlu verileri kümeleme işlemi uygulayarak gruplandırmaktadır [4]. SOM, kümeleme dışında boyut indirgeme ve görselleştirme aracı olarak da kullanılmaktadır [7].

SOM algoritması girdi uzayında yer alan çok boyutlu verilerin, çıktı uzayında bir ya da iki boyutlu haritalar ile görselleştirilmesi sağlamaktadır. SOM ağında bir giriş bir de çıkış katmanı bulunmaktadır. Diğer YSA içerisinde yer alan gizli katman SOM ağında bulunmamaktadır. Çıkış katmanı Kohonen katmanı olarak da isimlendirilmektedir. Girdi değerlerinin yer aldığı giriş katmanı ile haritaların oluşturulduğu çıkış katmanındaki nöronlar birbirlerine ağırlık vektörleri ile bağlıdır [7]. Nöronlar arasında yer alan mesafeler hesaplanarak nöronların birbirlerine benzer gruplara ayrılması işlemi tamamlanır [4]. En uygun SOM için giriş vektörü ile referans vektörü arasındaki fark hata olarak alındığında en küçük mutlak hata ortalamasına sahip olan modelin daha iyi olduğu söylenebilir. Çıkış katmanındaki nöron sayısı, verilerin normalleştirilmesi, referans vektöre ilk değer atanması, uzaklık ölçüsü, öğrenme katsayısı ve komşuluk değişkeni algoritmanın oluşturacağı kümelemeyi etkileyen faktörlerdir [17].

SOM algoritması başlatılmadan önce veri setinde normalleştirme işlemi uygulanacaksa bu adımdan sonra ağ doğrusal veya rastgele olarak başlatılmalıdır. İşlem bağlatıldıktan sonra haritaların biçimlenmesini sağlayan ağın eğitim süreci devam ettirilmektedir [15].

2.4. Otokodlayıcılar

Otokodlayıcılar (autoencoder) denetimsiz öğrenme yapan bir yapay sinir ağı modelidir. Model, giriş verilerinin çıkışa aktarmak istediklerinde etiketlenmiş bir veri setine ihtiyaç duymazlar [6]. Otokodlayıcılar veri sıkıştırma, boyut azaltma veya anomali tespiti gibi alanlarda kullanılmaktadır. Model ayrıca etkili bir şekilde çalışabilmek için diğer makine öğrenimi yöntemleri gibi gerekli eğitim verisine ihtiyaç duymaktadır [1].

Otokodlayıcı yapısı temel olarak kodlayıcı (encoder), darboğaz (boottleneck) ve kod çözücü (decoder) bileşenlerinden oluşmaktadır. Kodlayıcı giriş verilerini daha düşük boyutlu ve sıkıştırılmış bir yapıya dönüştürmektedir. Darboğaz katmanı, bu sıkıştırılmış bilginin tutulduğu ve verinin en önemli özelliklerinin temsil edildiği bölümdür. Kod çözücü ise bu yapıdan

hareketle giriş verilerini yeniden oluşturmaya çalışır. Elde edilen çıktı, orijinal veriyle karşılaştırılarak modelin yeniden yapılandırma başarısı değerlendirilir [1].

2.5. K-Ortalamalar

K-Ortalamalar, verileri önceden belirlenen *k* sayıda kümeye ayıran yinelemeli bir yöntemdir. Gözlemleri kendilerine en yakın küme merkezlerine göre gruplandırır ve küme merkezlerini tekrar tekrar güncelleyerek daha uygun bir kümeleme yapısı elde etmeye çalışır [13]. Yöntemin ilk aşaması *k* değerinin belirlenmesidir. Bu değerin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [10, 16].

2.6. Otokodlayıcı ve K-Ortalamalar Hibrit Modeli

Hibrit modelin ilk aşamasında dokuz gösterge otokodlayıcıya verilerek darboğaz katmanındaki gizli kodlar elde edilmiştir. İkinci aşamada ise bu kodlar K-Ortalamalar algoritmasının girdisi olarak kullanılmıştır. K-Ortalamalar, her gözlemi en yakın küme merkezine atayarak merkezleri yeniden hesaplamış ve atamalar kararlı hale gelinceye kadar bu işlemi devam ettirmiştir.

2.7. Kümeleme Performans Değerlendirmesi

Kümeleme yöntemleri ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için içsel ölçütlerden Silhouette indeksi, Calinski-Harabasz indeksi ve Davies-Bouildin indeksi kullanılmıştır.

Silhouette indeksi (*s*) Rousseeuw tarafından 1987'de geliştirilmiş ve hangi gözlemlerin kümelere daha uyumlu olduğunun sonucunu vermektedir. Değer -1 ile 1 arasında bir değer almaktadır. 1'e yakın olan değerler kümelemenin daha iyi olduğunu ifade etmektedir [11].

Calinski-Harabasz indeksi (*ch*), *k* adet kümeye bölünmüş bir verinin kümeleme geçerliliğini ölçmektedir. Yüksek *ch* değeri en iyi kümelemeyi ifade etmektedir [2].

Davies-Bouildin (*db*) indeksi ise küme içerisinde yer alan verilerin merkeze olan uzaklığını minimum, kümeler arası uzaklığını ise maksimum yapmayı hedeflemektedir. Küçük *db* değeri daha iyi bir kümeleme sonucunun elde edildiğini ifade eder [3].

3. UYGULAMA VE BULGULAR

İşletmeye ait T dönemlik veri seti kullanılarak yapılan uygulamada tedarik yapıları için benzerliklerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Veri setini üzerinde doğrudan kümeleme yöntemleri uygulanması tercih edilmemiş, işlem tekrarlarının model üzerindeki etkisini azaltmak ve işletme içerisinde karar verme süreçlerinde daha kullanılabilir sonuçların elde edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu durum aynı tedarikçilerin farklı malzeme gruplarındaki satın alma davranışlarının birbirinden bağımsız olarak değerlendirilebilmesine olanak tanımıştır.

Çalışmada tutarsal değişkenler sağa çarpık ve ağır kuyruklu bir dağılıma sahip olduğundan ilgili değişken için logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Model içerisindeki eksik sayısal gözlemler değişkenlere ait medyan değerleri ile tamamlanmış ve değişkenler standartlaştırılmıştır.

Çalışmada iki farklı YSA tabanlı denetimsiz öğrenme yöntemi değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki SOM, ikincisi ise Otokodlayıcı + K-Ortalamalar modelidir. SOM yöntemi ile yüksek boyutlu veriler arasındaki benzerliklerin daha düşük boyutlu bir yapı üzerinde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Otokodlayıcı + K-Ortalamalar modeli ise aynı anda optimize edilen bir yöntem olarak kullanılmamıştır. Model otokodlayıcı ile eğitilmiş verilerin daha sonra kodlayıcı bölümü ile değişkenlerin elde edilmesi ve bu değişkenlerin K-Ortalamalar yöntemine girdi olarak verilmesi biçiminde kullanılmıştır.

Tablo 1. Model yapıları

Model	**Modelleme yapısı**	**Amaç**
SOM	SOM haritası, SOM birimlerinin kümelenmesi	Verinin çok boyutlu benzerliklerini ortaya çıkartmak
Otokodlayıcı + K-Ortalamalar	Otokodlayıcı, latent temsil, K-Ortalamalar	Doğrusal olmayan düşük boyutlu temsil üzerinden kümeleme yapmak

SOM modeli, 500 iterasyon boyunca eğitilmiştir. Eğitim grafiğinde en yakın SOM birimine olan ortalama uzaklık yaklaşık 0,019 düzeylerinden 0,010 seviyelerine doğru azalmış ve son iterasyonlarda görece kararlı bir yapıya gelmiştir. Bu durum, SOM ağırlıklarının eğitim süreci boyunca veri yapısına uyum sağladığını ve modelin yakınsama eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Otokodlayıcı modelinde hem eğitim hem de doğrulama kayıplarının yaklaşık 1 seviyesinden hızlı bir biçimde düştüğü ve eğitim sonucunda yaklaşık 0,17-0,20 aralığında kararlı hale geldiği gözlenmiştir. Eğitilmiş Otokodlayıcıların kodlayıcı bölümünden elde edilen temsiller K-Ortalamalar algoritmasına aktarılmış ve üç kümeli çözüm elde edilmiştir.

Denetimsiz öğrenme algoritmalarında gerçek bir sınıf etiketi yer almamaktadır. Bu nedenle elde edilen kümelemenin başarısının ölçülmesi için dahili değerlendirme ölçütleri olan Silhouette, Calinski-Harabasz ve Davies-Bouildin indeksleri kullanılmıştır.

Her iki model için K=2 ve K=8 arasında farklı küme sayıları denenmiştir. SOM modelinde en yüksek Silhouette değeri K=5 çözümünde elde edilmiştir. K= {3,4,6} çözümleri ise K=5 çözümüne yakın sonuç vermesi nedeniyle beş kümeli çözüm kullanılmıştır.

Otokodlayıcı + K-Ortalamalar yönteminde ise en yüksek Silhouette değeri K=3 için elde edilmiştir. Üç kümeden sonra Silhouette değerinde belirgin bir biçimde azalma gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre Otokodlayıcı tabanlı çözüm için küme sayısı üç olarak belirlenmiştir.

Kümeleme başarısının ölçülmesi amacıyla tanımları verilen indeksler kullanılmıştır. Silhouette indeksinde yüksek değerler gözlemlerin kümelere daha iyi biçimde gruplandırıldığını ifade etmektedir. Calinski-Harabasz indeksinde yüksek değerler kümeler arası ayrışmanın küme içi yayılımına göre daha güçlü olduğunu, Davies-Bouildin indeksindeki düşük değerler ise kümelerin birbirlerinden daha iyi bir biçimde ayrıştığı göstermektedir. Her iki modelin üç farklı indeks sonuçları Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2. Model performanslarının karşılaştırılması

Model	*K*	Silhouette	Calinski-Harabasz	Davies-Bouildin
SOM	5	**0,340**	375	**0,97**
Otokodlayıcı+K-Ortalamalar	3	0,315	**397**	1,20

Sonuçlar, modellerden herhangi birisi için bütün değerlendirme kriterlerinde üstün olmadığını göstermektedir. SOM modeli Silhouette ve Davies-Bouildin indekslerinde daha iyi sonuçlar üretirken, Otokodlayıcı + K-Ortalamalar yöntemi Calinski-Harabasz indeksinde daha iyi bir sonuç vermiştir. Bu sonuçlara göre SOM modeli genel kümeleme kalitesi açısından sınırlı bir üstünlük sağlamakla birlikte Otokodlayıcı + K-Ortalamalar yönteminin daha az küme ile daha sade bir küme yapısı oluşturduğu sonucu elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, tedarikçi yönetiminde analizin sadece tedarikçi bazında değil tedarikçi ile malzeme grubu yapısıyla tanımlanmasının işletme açısından değerlendirilmesine imkan tanıyan sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma sadece tedarikçi veya tedarikçi ile malzeme ilişkilerine bir kümenin atanması değil elde edilen gruplama yapısıyla işletmenin satın alma

karar destek sisteminde benzer davranış gösteren grupların birlikte değerlendirilmesine olanak tanıyan bir analitik çalışma olarak konumlanmaktadır.

Kurulan yapı içerisinde her tedarikçi-malzeme grubu için diğer değişkenlerin yer aldığı bir yapı kurularak benzer özelliklere sahip olan satın alma ilişkileri aynı grup içerisinde izlenebilir. Bu durum satın alma ilişkilerinin aynı grup içerisinde izlenebilir ve segment temelli olarak yönetilebilir olmasını da mümkün hale getirmektedir.

Çalışma tek bir sektör ve tek bir işletme genelinde geçmiş yıllara ait test satın alma verisi kullanılarak hazırlanmıştır. Bu nedenle çalışmanın genellenebilirliği sınırlıdır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarda mevcut veriler ile anlık olarak segment bazlı ayrımların yapılabileceği ve sonuçların canlı bir karar destek sistemi için çeşitli öngörüler sunabileceği yapıya getirilmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] Abdullah, M. Y. (2024). *Oto-koclayıcı mimarisi kullanarak mermer yüzey anomali tespiti* [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi].

[2] Caliński, T., & Harabasz, J. (1974). A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics—Theory and Methods, 3*(1), 1–27.

[3] Davies, D. L., & Bouldin, D. W. (1979). A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1*(2), 224–227.

[4] Demirhan, A., & Güler, İ. (2010). Image segmentation using self-organizing maps and gray level co-occurrence matrices. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25*(2), 285–291.

[5] Haykin, S. (1998). *Neural networks: A comprehensive foundation*. Prentice Hall.

[6] Kartal, S. (2022). Otokodlayıcılar kullanarak uzaktan algılama görüntülerindeki eksik verilerin yeniden yapılandırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *37*(4), 853–862. https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1230776

[7] Kocamaz, U. E. (2024). *Zeki sınıflandırma ve kümeleme yöntemlerinin tıbbi tanı ve tedavide kullanımı* [Doktora tezi, Üniversite Adı].

[8] Kohonen, T. (1981). Automatic formation of topological maps of patterns in a self-organizing system. *Proceedings of the Second Scandinavian Conference on Image Analysis*, 214–220.

[9] Murphy, K. P. (2012). *Machine learning: A probabilistic perspective* (pp. 92–103). MIT Press.

[10] Pham, D. T., Dimov, S. S., & Nguyen, C. D. (2005). Selection of K in K-means clustering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *219*(1), 103–119. https://doi.org/10.1243/095440605X8298

[11] Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, *20*, 53–65.

[12] Selvi, H. Z., & Çağlar, B. (2017). Çok değişkenli haritalama için kümeleme yöntemlerinin kullanılması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *6*(2), 415–429. https://doi.org/10.28948/ngumuh.341267

[13] Silahtaroğlu, G. (2016). *Veri madenciliği: Kavram ve algoritmaları*. Papatya.

[14] Şahin, F., & Yüreğir, O. H. (2020). Ayaklardaki yüzeysel mantar enfeksiyonlarının potansiyel risk faktörlerinin kendini örgütleyen haritalar (SOM) ile analizi. *Ç.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 39*(10), 111–120.

[15] Yakar, A., & Sayın, H. C. (2021). Kendini örgütleyen haritalar algoritması yöntemiyle Türkiye dokuma sektörünün analizi: BİST şirketleri üzerine bir uygulama. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *39*(3), 491–510. https://doi.org/10.17065/huniibf.803067

[16] Yuan, C., & Yang, H. (2019). Research on K-value selection method of K-means clustering algorithm. *J—Multidisciplinary Scientific Journal, 2*(2), 226–235. https://doi.org/10.3390/j2020016

[17] Zontul, M. (2004). *SOM tipinde yapay sinir ağlarını kullanarak Türkiye ile ticareti olan ülkelerin kümelenmesi üzerine bir çalışma* [Doktora tezi, Cumhuriyet Üniversitesi].

VERİ ODAKLI KARAR DESTEK SİSTEMİ İÇİN ZAMAN SERİSİ SEÇİMİ: ARIMA, SARIMA VE SARIMAX MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ahmet GÜRGAŞİN
Astor Enerji A.Ş. AR-GE Merkezi Sincan, Ankara
ORCID ID: 0000-0003-1954-0253

ÖZET

Proje bazlı üretim ortamlarında, ekonomik durumun modellenmesinde kullanılan yöntemlerden birisi de zaman serisi modelleridir. Bu çalışmada, bir endüstriyel üretim işletmesinde ekonomik performans değerlerinin tahmin edilmesine yönelik ARIMA, SARIMA ve SARIMAX modellerinin performans karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmada, geçmiş dönemlere ait hareketler kullanılarak gelecek dönemlere ilişkin ekonomik performans değerinin tahmin edilmesi ve mevsimsel bileşenleri kullanan modellerin mevsimsellik bileşenlerini içermeyen ARIMA modellerine göre daha güvenilir karar girdileri üretip üretmediği belirlenmek istenmiştir. Mevcut veriler dönemsel olarak gruplandırılmış, veri sızıntısını önlemek amacıyla modeller yalnızca geliştirme dönemlerindeki gözlemler kullanılarak kurulmuştur. Model performansı MAPE, MASE ve Normalize RMSE ölçütleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevsimsel yapı için doğrudan modelleme yapan SARIMA yönteminin en yüksek tahmin performansını ürettiğini göstermektedir. Fourier terimleri ile genişletilen SARIMAX modeli performans açısından ikinci sırada yer alırken ARIMA modelinde ise belirgin bir şekilde daha yüksek hata değeri elde edilmiştir. Sonuçlar, mevsimselliği doğrudan temsil etmeyen yapıların sınırlı kaldığının ortaya koymaktadır. Sonuç olarak SARIMA modeli, incelenen veri yapısı dikkate alındığından karar destek sistemi için birinci tahmin modeli olarak belirlenebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Zaman Serileri, ARIMA, SARIMA, SARIMAX

TIME SERIES SELECTION FOR A DATA-DRIVEN DECISION SUPPORT SYSTEM: A COMPARISON OF ARIMA, SARIMA AND SARIMAX MODELS

ABSTRACT

In project-based production environments, time series models are one of the methods used to model economic conditions. In this study, a performance comparison was conducted between ARIMA, SARIMA, and SARIMAX models for forecasting economic performance metrics at an industrial manufacturing facility. The study aimed to forecast economic performance values for future periods using historical data and to determine whether models incorporating seasonal components produce more reliable decision inputs compared to ARIMA models that do not include seasonal components. The available data were grouped by period, and to prevent data leakage, the models were constructed using only observations from the development periods. Model performance was evaluated using the MAPE, MASE, and Normalized RMSE metrics. The results indicate that the SARIMA method, which directly models the seasonal structure, produced the highest forecasting performance. The SARIMAX model, extended with Fourier terms, ranked second in terms of performance, while the ARIMA model yielded significantly higher error values. The results indicate that models that do not directly represent seasonality are limited in their effectiveness. Consequently, considering the examined data structure, the SARIMA model can be identified as the primary forecasting model for the decision support system.

Keywords: Time Series, ARIMA, SARIMA, SARIMAX

1. GİRİŞ

İşletmeler tahmin çalışmalarında istatistik, veri analizi, makine öğrenmesi alanlarından yararlanmaktadır [10]. İstatistik alanında tahmin süreçlerinde kullanılan yöntemlerden birisi de zaman serisi tahmin yöntemleridir [1]. Zaman serileri analizi, bir değişkenin geçmiş değerlerinin kullanılarak modellenmesi ve gelecekte değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Ekonomi, finans, mühendislik gibi pek çok alanda farklı özellikteki alanda kullanılmaktadır [4]. Zaman serisi analizlerinde en sık kullanılan yöntemler trend eğilim bazlı teknikler, mevsimsel değişim teknikleri ve ARIMA ile modellenen yöntemlerdir [13].

Bu çalışmada tek bir işletme için tek bir ürün grubuna ilişkin ekonomik performans değerlerinin ARIMA, SARIMA ve SARIMAX modelleri kullanılarak tahmin edilmesi ve modellerin performans bazında karşılaştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada modellerin mevsimsellik ve dönemsel hareketleri temsil etme düzeylerinin ekonomik performans değerleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçların işletme karar destek sistemleri için yararlı girdiler üretmesi olarak kullanılabilirliği değerlendirmiştir.

2. MATERYEL VE METOT

2.1. Araştırma Tasarımı

Yapılan çalışmada belirlenen bir ürün grubu için geçmiş veriler kullanılarak işletmenin aylık ekonomik performans değeri serisinde bulunan mevsimsel ve dönemsel hareketlerin, SARIMA ve Fourier terimleriyle genişletilmiş SARIMAX modelleriyle temsil edilmesinin, mevsimsel olmayan ARIMA modeline göre tahmin başarısına ne ölçüde etki ettiği üzerine bir araştırma sorusu belirlenmiştir. Bu kapsamda araştırma sorusu üç alt değerlendirme üzerinden incelenmiştir.

i. ARIMA modeli aylık ekonomik performans değerini tek başına yeterli doğrulukta açıklayabilmekte midir?

ii. Aylık mevsimsel bileşenlerin SARIMA modeline eklenmesi test döneminde hesaplanan tahmin hatalarını azaltmakta mıdır?

iii. Mevsimsel yapının Fourier terimleriyle SARIMAX modeline aktarılması doğrudan mevsimsel parametreleri kullanan SARIMA modeline göre tahminlerde bir iyileştirme sağlamakta mıdır?

2.2. Veri Seti

Çalışmada kullanılan veri kaynağı enerji sektöründe üretim alanında faaliyet gösteren Astor Enerji A.Ş.'nin geçmiş T yıla ait olan bir test veri setidir. Çalışma kapsamında sadece belirli bir ürün grubuna yönelik işlem gerçekleştirilmiştir. Çalışmada analiz sonucunda elde edilen model performansı ve hata ölçüleri kullanılmıştır.

Zaman serisinde eğitim ve test verilerinin rastgele ayrılması, gelecekte yer alan bilgilerin model içerisinde yer almasına neden olabilmektedir [7]. Bu nedenle dönem sırasını koruya kronolojik ayrım uygulanmıştır. İlk dönemler model eğitimi, sonraki dönemler ise örneklem dışı performans değerlendirmesi için kullanılmıştır.

2.3. ARIMA

ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) modeli, zaman serisi analizinde kısa ve uzun vadeli tahminlerde sık kullanılan bir yöntemdir.1976 yılında Box ve Jenkins tarafından sunulmuştur [3]. ARIMA modelinde serilerin durağan bir davranış göstermesi gerekmektedir. Bu durumda serilerin varyans, ortalama ve kovaryanslarının zaman boyunca sabit kalması gerekmektedir. Modelde durağan olmayan serilerin durağan olması sağlanmalıdır [11]. ARIMA doğrusal bir zaman serisi modelidir ve serinin şimdiki zaman değerini gecikmeli değerler ve gecikmeli hata değerlerinin doğrusal bir fonksiyonu olarak açıklamaktadır.

Model ARIMA(p,d,q) biçiminde üç parametre ile tanımlanmaktadır. İlk parametre hedef değişkenin geçmiş değerlerden kaç adım geriye gidilerek kullanıldığı sonucunu vermektedir. İkinci parametre, zaman serisinin durağan hale getirmek için uygulanan fark işlemi sayısı ve üçüncü parametre ise geçmiş tahmin hatalarından kaç adım geriye gidilerek işlemin yapıldığını belirtmektedir. Modele ilişkin matematiksel denklem Eş. 2.1.'de verilmiştir [2].

$$\phi_p(B)(1-B)^d Y_t = Z + \theta_q(B)\varepsilon_t \quad (2.1)$$

Eş. 2.1.'de $\phi_p(B)$ otoregresif (AR) polinomu, $(1-B)^d$ d.dereceden fark alma operatörünü, $\theta_q(B)$ hareketli ortalama (MA) polinomu, B geriye kaydırma operatörü, ε_t hata terimi, Z ise sabit terim olarak tanımlanmaktadır.

2.4. SARIMA

SARIMA (Mevsimsel ARIMA) modeli, ARIMA modelinde olduğu gibi serinin gelecekteki değerini geçmiş gözlemler ve hata terimleri verileri kullanarak gerçekleştirmektedir. ARIMA'dan farklı olarak dönemsel dalgalanmaları ve mevsimsel etkileri de modele dahil ederek modelleme yapmaktadır [6]. Mevsimsellik barındıran ve durağan olmayan zaman serileri için SARIMA modeli kullanılabilmektedir. SARIMA modelleri mevsimsel ya da mevsimsel olmayan değişkenler dikkate alındığında zaman serisi analizlerinde iyi sonuçlar verebilmektedir [5].

Model, ARIMA(p,d,q) modelinde kullanılan değişkenlere ek olarak mevsimsel otoregresif bileşen (P), mevsimsel fark alma derecesi (D), mevsimsel hareketli ortalama bileşeni (Q) ve mevsimsellik periyodunu (s) barındırmakta olup $\mathrm{SARIMA}(p,d,q)(P,D,Q)_s$ biçiminde tanımlanmaktadır. SARIMA modeline ait matematiksel gösterim Eş. 2.2.'de verilmektedir [4].

$$\Phi_P(B^s)\phi_p(B)(1-B^s)^D(1-B)^d Y_t = Z + \Theta_Q(B^s)\theta_q(B)\varepsilon_t \quad (2.2)$$

Eş. 2.2'de verilen $\Phi_P(B^s)$ mevsimsel AR polinomu, $\phi_p(B)$ mevsimsel olmayan AR polinomu, $\phi_p(B)$ mevsimsel fark alma, $(1-B)^d$ normal fark alma, $\Theta_Q(B^s)$ mevsimsel MA polinomu, $\theta_q(B)$ ise mevsimsel olmayan MA polinomunu ifade etmektedir.

2.5. SARIMAX

SARIMAX modeli, SARIMA modeline dışsal değişkenlerin dahil edilmesiyle genişletilen bir zaman serisi yöntemidir [12]. ARIMAX modelinde olduğu gibi bu modelde de tek değişkene bağlı kalmadan çıktının başarısını arttırmak için dışsal değişkenler kullanılmaktadır [6]. ARIMAX modeli, serinin geçmiş değerleri, fark alma, geçmiş tahmin hataları ve dışsal değişkenlerin etkilerini hesaba katarken SARIMAX bunlara ek olarak sezonluk otokorelasyon ve hareketli ortalama terimlerini içerir [8]. SARIMAX modeline ait matematiksel gösterim Eş. 2.3.'de yer almaktadır.

$$\Phi_P(B^s)\phi_p(B)(1-B^s)^D(1-B)^d Y_t = Z + \sum_{i=1}^{k}\beta_i X_{i,t} + \Theta_Q(B^s)\theta_q(B)\varepsilon_t \quad (2.3)$$

Eş.2.3.'de verilen SARIMAX formülasyonu, SARIMA model yapısına dışsal açıklayıcı değişken olan $\sum_{i=1}^{k}\beta_i X_{i,t}$ teriminin eklenmesiyle oluşturulmuştur.

Çalışmada SARIMAX modelinin dışsal değişkenleri Fourier terimlerinden oluşturulmuştur. Fourier bileşenleri işletme dışından elde edilen bağımsız bileşenler değil doğrudan zaman indeksinden üretilmiş olan deterministik dönemsel göstergelerdir.

2.6. Modellerin Değerlendirilmesi

Çalışmada modellerin performans karşılaştırılması Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE-Mean Absolute Percentage Error), Ortalama Ölçeklendirilmiş Mutlak Hata (MASE-Mean Absolute Scaled Error) ve Normalize Edilmiş Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (NRMSE-Normalized Root Mean Squared Error) yöntemleri kullanılmıştır. MAPE değerinin 0,10'dan küçük ve eşit olduğunda yüksek tahmin doğruluğu, 0,10 ile 0,20 arasında iyi bir tahmin doğruluğu, 0,20-0,50 arasında normal tahmin doğruluğu ve 0,50 ile üzerinde olduğunda ise kötü bir tahmin doğruluğu elde edildiği söylenebilmektedir [9]. MASE değerinin 1'den büyük olması modelin bir önceki adım değerini doğrudan tahmin olarak almaktan daha kötü sonuç verdiğini ifade etmektedir. Bu nedenle bu değerin 1'den küçük olması beklenmektedir. NRMSE değeri ise modelin RMSE değerinin hedef serinin aralığına veya ortalamasına bölünmesi ile ölçeksiz hale getirilmiş biçimidir. Hatanın serinin genel dağılımına oranla ne kadar büyük olduğunu ifade etmektedir.

3. UYGULAMA VE BULGULAR

Aylık ekonomik performans değerleri üzerinde üç aşamalı bir model karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada ARIMA modeli uygulanmış ve serinin mevsimsel bileşenler olmadan hangi ölçüde tahmin sonuçları elde edebildiği belirlenmiştir. İkinci aşamada ise aylık mevsimsellik SARIMA modeliyle doğrudan model yapısına eklenmiştir. Üçüncü ve son aşamada ise dönemsel hareketler eklenerek SARIMAX modeli kurulmuştur.

Çalışma işletmeye ait geçmiş dönemlere ait tek bir ürün grubu için oluşturulan test veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz işlemleri R programlama dili kullanılarak yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Modeller aynı kronolojik test dönemi üzerinde değerlendirilmiştir. Böylece hata ölçütlerinin farklı dönemlerden kaynaklanmasının önüne geçilerek modeller arasında doğrudan karşılaştırma yapılabilmesi sağlanmıştır. Üç farklı modele ilişkin sonuçlar Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo1. Model performans sonuçları

Model	MAPE	MASE	NRMSE	Performans sırası
SARIMA	%16,4	0,528	%18,6	1
SARIMAX	%18,8	0,620	%22,3	2
ARIMA	%38,8	1,177	%37,3	3

Tablo 1'de yer alan sonuçlar incelendiğinde tüm değerlendirme ölçütlerinde en düşük hata değerini SARIMA modeli üretmiştir. Model, %16,4 düzeyinde hesaplanan MAPE değeri, ortalama mutlak tahmin hatasının gerçekleşen değerlerin yaklaşık olarak altıda biri düzeyinde kaldığını göstermektedir. MASE değerinin 0,528 olarak elde edilmesi SARIMA modelinin çalışmada kullanılan referans tahmin yöntemi olarak ARIMA modeline göre daha düşük hata ürettiğini ortaya koymaktadır. NRMSE değerinin %18,6 olarak hesaplanması ise ARIMA ve SARIMAX modellerine göre büyük sapmaların daha sınırlı olarak gözlendiğini ifade etmektedir.

SARIMAX modelinde MAPE değeri %18,8; MASE değeri 0,620 ve NRMSE değeri %22,3 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar SARIMA modelinin ARIMA'ya göre bütün ölçülerde daha başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. MASE değerinin 1'in altında bulunması genişletilen modelin referans tahminini geçtiğini göstermektedir. Bununla birlikte SARIMAX modelinin hata değerleri SARIMA modelinden daha yüksek olarak hesaplanmıştır.

ARIMA modelinde ise MAPE değeri %38,8; MASE değeri 1,177 ve NRMSE değeri ise %37,3 olarak elde edilmiştir. ARIMA modelinin MASE değerinin 1'in üstünde hesaplanması modelin ölçekleme için kullanılan referans tahminden daha yüksek hata ürettiğini göstermektedir. Bu

sonuç, ekonomik performans değerinin serideki dönemsel örüntülerin mevsimsel olmayan ARIMA yapısı tarafından yeterince temsil edilemediğini göstermektedir.
Üç model bir arada değerlendirildiğinde MAPE değerinde meydana gelen değişimim serideki mevsimselliğin tahmin başarısı bakımından önemli olduğuna işaret etmektedir. SARIMA ve SARIMAX modellerinde elde edilen MAPE değeri %10-%20 aralığında kalmış ve iyi tahmin sınıfı ile nitelendirilmiştir.
Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre karar destek sistemleri için üç aşamalı bir model yönetimi oluşturulabilir.

Tablo 2. Modellerin karar destek sistemindeki rolleri

Model	Sistemdeki rolü	Kullanım amacı
SARIMA	Birincil üretim modeli	Aylık tahminlerinin ve planlama girdilerinin üretilmesi
SARIMAX	Alternatif model	Gelecekte eklenecek dışsal değişkenlerle senaryo analizi
ARIMA	Temel karşılaştırma modeli	Üretim modelinin yalın bir modele göre performansının izlenmesi

SARIMA modeli ile elde edilen tahmin sonuçları ilerleyen aşamalarda planlama ve merkezi tahmin değerleri olarak kullanılabilir. SARIMAX modeli ise önceden elde edilebilecek olan açıklayıcı değişkenlerin serilere eklenmesi durumunda genişletilebilir. Bu durumda dışsal değişkenlerin kullanılabilmesi için tahmin dönemine ait değerlerinde bilinmesi veya tahmin edilmesi gerekmektedir.

4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada geçmiş dönemlere ait tek bir ürün grubuna ait test verisi kullanılarak ekonomik performans değerinin ARIMA, SARIMA ve SARIMAX modelleriyle tahmin edilmesi gerçekleştirilmiştir. Modeller MAPE, MASE ve NRMSE ölçütleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, aylık mevsimselliği doğrudan modelleyen SARIMA modelinin incelenen dönemde en başarılı model olduğunu göstermiştir.
Üç modelin karşılaştırılmasında SARIMA modeli %16,4 MAPE; 0,528 MASE ve %18,6 NRMSE değerleriyle en iyi performansı gösteren model olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre SARIMA ve SARIMAX modellerinin ARIMA modeline göre daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu durum dönemsel terimlerin model tahminine katkıda bulunduğunu göstermektedir. Buna karşılık SARIMA modelinin ise SARIMAX modelinden daha düşük hata üretmesi, mevsimsel yapının doğrudan model bileşenleriyle temsil edilmesinin kullanılan veri setinde daha uygun olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.
Çalışma işletme karar destek sistemleri için modellerin elde ettiği sonuçlar ile izlenebilen ve kullanılabilecek bir çıktı yapısı üretebilmektedir. Bu durum mevcut veri setleri üzerinde canlı sistem entegrasyonları sağlandığında istenilen dönemler için çeşitli tahminlerin yapılabilmesini sağlayabilir.
Çalışmanın mevcut yapısı ile genellenebilirliği yöntemsel düzeydedir. Tek bir sektör ve tek bir işletme için bir ürün grubundan elde edilen veriler kullanılmıştır. Çalışma ilerleyen aşamalarda farklı ürün grupları, farklı değişkenler kullanılarak genişletilebilir ve canlı bir karar destek sistemi alt yapısı oluşturularak modellerin zaman içerisinde değişen başarısı izlenebilir ve yeniden değerlendirme yapılabilir.

KAYNAKÇA

[1] Acar, G. (2022). *Zaman serisi yöntemleri ve XGBoost algoritması ile kömür satış tahmini: Türkiye Tarım Kredi Kooperatifleri uygulaması* [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi].

[2] Arslan, B., & Ertuğrul, İ. (2022). Çoklu regresyon, ARIMA ve yapay sinir ağı yöntemleri ile Türkiye elektrik piyasasında fiyat tahmin ve analizi. *Journal of Management and Economics Research, 20*(1), 331–353. https://doi.org/10.11611/yead.988146

[3] Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1970). *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden-Day.

[4] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control*. John Wiley & Sons.

[5] Çelen, A. (2024). *Türkiye ulusal deniz izleme seviyesi (TUDES) verilerinin zamansal analizi* [Yüksek lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi].

[6] Grima, C. P., Marco-Almagro, L., & Tort-Martorell, L. J. (2012). *Industrial statistics with Minitab*. Wiley.

[7] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice*. OTexts.

[8] Kaçar, A. (2025). *Bilişim teknolojisi altyapı kütüphaneliği çerçevesinde operasyonel süreçlerin süreç madenciliği, tahminleme ve kesikli olay simülasyonu ile iyileştirilmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İTÜ Polen.

[9] Kumar, S., & Kaur, T. (2016). Development of ANN based model for solar potential assessment using various meteorological parameters. *Energy Procedia, 90*, 587–592.

[10] Patnaik, S., Yang, X. S., & Sethi, I. K. (Eds.). (2021). *Advances in machine learning and computational intelligence: Proceedings of ICMLCI 2019*. Springer.

[11] Peter, D., & Silvia, P. (2012). ARIMA vs. ARIMAX – Which approach is better to analyze and forecast macroeconomic time series. *Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics*, 136–140.

[12] Rusyana, A., Marzuki, N., & Flancia, M. (2017). SARIMA model for forecasting foreign tourists at the Kualanamu International Airport. *Proceedings of the 2016 12th International Conference on Mathematics, Statistics, and Their Applications (ICMSA 2016)*, 153–158. https://doi.org/10.1109/ICMSA.2016.7954329

[13] Sözer, K. (2025). *Hava taşımacılığında seçilen bir hava yolu firmasının Türkiye'ye sağladığı ekonomik etkinin analizi* [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi].

SPORCULARDA ALT EKSTREMİTE KAS MİMARİSİ VE MORFOLOJİSİ: BRANŞA ÖZGÜ FARKLILIKLAR VE PERFORMANSLA İLİŞKİLER ÜZERİNE SİSTEMATİK DERLEME

Aysun GÜLER KANTER
Department of Coaching Education, Faculty of Sport Sciences, Kilis 7 Aralık University, Kilis, Türkiye
ORCID: 0009-0008-0033-6053

ÖZET

Bu sistematik derlemenin amacı, farklı spor branşlarındaki sporcuların alt ekstremite kas mimarisi ve morfolojisine ilişkin bulguları incelemek ve bu özelliklerin sportif performansla ilişkilerini değerlendirmektir. Literatür taraması 1–8 Eylül 2026 tarihleri arasında PubMed ve Scopus veri tabanları ile Google Scholar akademik arama motorunda İngilizce anahtar kelimeler kullanılarak gerçekleştirildi. Fasikül uzunluğu, pennasyon açısı, kas kalınlığı, kesitsel alan veya kas hacmini ultrasonografi ya da manyetik rezonans görüntüleme yöntemiyle değerlendiren sporcu çalışmaları derlemeye alındı. Başlık ve özet değerlendirmesine alınan 300 kayıttan 22'sinin tam metni uygunluk açısından incelendi ve 20 çalışma anlatısal senteze dâhil edildi. Çalışmalar arasındaki katılımcı özellikleri, spor branşları, incelenen kaslar, ölçüm yöntemleri ve sonuç değişkenleri bakımından bulunan farklılıklar nedeniyle meta-analiz yapılmadı. Çalışmaların yanlılık riski, JBI'nin analitik kesitsel çalışmalar için geliştirdiği güncel eleştirel değerlendirme aracı kullanılarak değerlendirildi. Sprinterlerde daha uzun vastus lateralis ve gastroknemius fasikülleri ile kalça ve diz çevresindeki belirli kasların daha yüksek hacimleri öne çıktı. Sporcular genel olarak kontrol gruplarından daha yüksek kas kalınlığı veya kas hacmi gösterdi; ancak fasikül uzunluğu ve pennasyon açısındaki farklılıklar bütün kaslarda ortak değildi. Kas hacmi, kas kalınlığı ve fasikül uzunluğunun sprint, sıçrama, kuvvet ve anaerobik güçle ilişkileri, incelenen kasa ve performans görevine göre değişti. Cinsiyet, biyolojik olgunlaşma, vücut büyüklüğü ve ekstremiteler arasındaki farklılıklar da bulguların yorumlanmasında etkili oldu.

Alt ekstremite kas mimarisi ve morfolojisi, spor branşına, incelenen kasa ve performans görevine özgü örüntüler göstermektedir. Bununla birlikte, mevcut kanıtların büyük ölçüde kesitsel çalışmalara dayanması nedeniyle gözlenen farklılıklar doğrudan antrenmanın neden olduğu adaptasyonlar olarak yorumlanmamalıdır.

Anahtar kelimeler: Alt ekstremite; kas mimarisi; kas morfolojisi; sportif performans; sistematik derleme.

LOWER-EXTREMITY MUSCLE ARCHITECTURE AND MORPHOLOGY IN ATHLETES: A SYSTEMATIC REVIEW OF SPORT-SPECIFIC DIFFERENCES AND ASSOCIATIONS WITH PERFORMANCE

ABSTRACT

This systematic review aimed to examine findings on lower-extremity muscle architecture and morphology in athletes from different sports and to evaluate how these characteristics are associated with athletic performance. The literature search was conducted between September 1 and 8, 2026, using PubMed and Scopus databases and the Google Scholar academic search engine. English-language search terms were used. Studies involving athletes were included if they assessed fascicle length, pennation angle, muscle thickness, cross-sectional area, or muscle volume using ultrasonography or magnetic resonance imaging. Of the 300 records screened by title and abstract, 22 full-text articles were assessed for eligibility, and 20 studies were included in the narrative synthesis. A meta-analysis was not performed because the studies differed in

participant characteristics, sports, muscles examined, measurement methods, and outcome variables. Risk of bias was assessed using the updated JBI critical appraisal tool for analytical cross-sectional studies. Longer vastus lateralis and gastrocnemius fascicles, together with greater volumes of specific muscles around the hip and knee, were prominent findings in sprinters. Athletes generally showed greater muscle thickness or muscle volume than control participants. However, differences in fascicle length and pennation angle were not consistent across all muscles. Associations of muscle volume, muscle thickness, and fascicle length with sprinting, jumping, strength, and anaerobic power varied according to the muscle examined and the performance task. Sex, biological maturity, body size, and between-limb differences also influenced the interpretation of the findings. Lower-extremity muscle architecture and morphology show patterns that vary by sport, muscle, and performance task. However, as the current evidence is largely based on cross-sectional studies, the observed differences should not be interpreted as adaptations directly caused by training.

Keywords: Athletic performance; lower extremity; muscle architecture; muscle morphology; systematic review.

1. INTRODUCTION

Athletic performance depends not only on the magnitude of force produced by a muscle but also on how quickly that force is generated and the movement in which it is used. Sporting activities such as sprinting, jumping, changing direction, distance running, and swimming place different mechanical demands on the lower-extremity muscles. As the structural properties of muscle can influence force–length and force–velocity relationships, muscle architecture has become an important area of research in both sports anatomy and training science. Evidence that different training stimuli can alter muscle architecture also suggests that the architectural characteristics observed in athletes may be related to their training history (Blazevich et al., 2003; Kawakami, 2005; Timmins et al., 2016).

Muscle architecture refers to the spatial arrangement of muscle fascicles relative to the muscle's line of force. It is commonly assessed through fascicle length, pennation angle, and muscle thickness. Muscle morphology includes measures of muscle size, such as anatomical cross-sectional area and muscle volume. These characteristics can be examined in living individuals using non-invasive methods such as ultrasonography and magnetic resonance imaging. Ultrasonography provides a practical means of assessing muscle thickness, fascicle length, and pennation angle. Magnetic resonance imaging allows a more detailed assessment of muscle cross-sectional area and volume (Timmins et al., 2016; Sarto et al., 2021; Naruse et al., 2022; Knaus et al., 2023).

Variables related to muscle architecture are closely linked to muscle function. Fascicle length is associated with a muscle's working range and shortening velocity. Pennation angle is related to the arrangement of contractile tissue within the anatomical volume of a muscle. Cross-sectional area and muscle volume provide different measures of muscle size. However, the relationship between these structural characteristics and athletic performance may vary according to the muscle examined, the movement task, and the sport (Timmins et al., 2016; Sugisaki et al., 2018; Lee et al., 2021).

Different sports do not place the same functional demands on the lower-extremity muscles. Sprinting requires high levels of speed and force to be produced within a short period. In distance running, the ability to sustain repeated muscle contractions for longer periods becomes more important. Elite male sprinters have been reported to have longer fascicles in the vastus lateralis and the medial and lateral gastrocnemius than distance runners. Smaller pennation angles have also been reported in some measurements. Associations between fascicle length

and 100-m performance in both male and female sprinters further suggest that muscle architecture may be related to sprint performance. However, these studies used cross-sectional designs. It is therefore not possible to determine whether these characteristics developed as a result of training or represent structural features that may help individuals succeed in a particular sport (Abe et al., 2000, 2001; Kumagai et al., 2000).

Sport-specific differences are not limited to running disciplines. In a study comparing soccer players and swimmers, swimmers tended to have greater muscle thickness and longer fascicles, particularly in the vastus lateralis, whereas soccer players showed larger pennation angles. Another study involving athletes from different sports found that the relationships of muscle thickness and pennation angle with anaerobic power varied according to the muscle and performance measure examined. Elite adolescent volleyball players also had greater vastus lateralis thickness and pennation angles than their untrained peers. Muscle characteristics in athletes should therefore be interpreted in relation to the movement and loading demands of the sport rather than attributed solely to general training status (Kanehisa et al., 2003; Mersmann et al., 2017; Lee et al., 2021).

Magnetic resonance imaging makes it possible to examine the volumes of several lower-extremity muscles rather than focusing on a single muscle or a limited number of architectural variables. This approach has been used to describe individual muscle-volume patterns in athletes from different sports (Knaus et al., 2023). In male sprinters, the ratio of gluteus maximus volume to quadriceps femoris volume was associated with 100-m sprint time (Sugisaki et al., 2018). The volumes of specific lower-extremity muscles were also related to sprint and jump performance in basketball players (Xie et al., 2020). In NCAA Division I athletes, vastus lateralis volume was associated with both jump height and relative peak power (O'Brien et al., 2026). These results point to the importance of examining individual muscles and their roles in specific movement tasks, rather than relying only on total muscle mass.

The available studies vary in the sports and muscles examined, participant age and sex, imaging methods, comparison groups, and reported outcomes. Some compared athletes from different sports, while others used untrained or recreationally active control groups. Several studies focused instead on the relationships between muscle characteristics and athletic performance. Variation in the muscles examined, measurement procedures, and performance tests made direct comparison difficult and prevented the findings from being combined into a common effect estimate. The evidence was therefore organised according to sport, muscle group, imaging method, and performance task (Abe et al., 2001; Kanehisa et al., 2003; Mersmann et al., 2017; Sugisaki et al., 2018; Xie et al., 2020; Lee et al., 2021; Knaus et al., 2023; O'Brien et al., 2026).

This systematic review aimed to examine findings on lower-extremity muscle architecture and morphology in athletes from different sports. It evaluated reported differences in fascicle length, pennation angle, muscle thickness, anatomical cross-sectional area, and muscle volume. The associations of these characteristics with sprinting, jumping, strength, and anaerobic performance were also examined. In addition, the review considered the possible influence of age, sex, sport, and imaging method on the findings.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study design

This study was designed as a systematic review of lower-extremity muscle architecture and morphology in athletes from different sports. The reporting of the review was guided by the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020). A simplified flow diagram based on PRISMA 2020 was used to present the screening and study-selection process. The research question was structured around the athlete population, muscle

architecture and morphology variables, comparison groups, and athletic performance outcomes (Page et al., 2021).

The main research question was: "Do lower-extremity muscle architecture and morphology differ among athletes from different sports, and how are these characteristics associated with measures of athletic performance?"

2.2. Eligibility criteria

Studies were assessed using predefined eligibility criteria. The inclusion criteria were as follows:

- The study involved athletes.
- The participants regularly trained in a specific sport.
- At least one lower-extremity muscle was examined.
- At least one of the following variables was assessed: fascicle length, pennation angle, muscle thickness, anatomical or maximum cross-sectional area, or muscle volume.
- Muscle characteristics were assessed using a valid imaging method, such as ultrasonography or magnetic resonance imaging.
- The study compared sports, performance levels, sexes, limbs, or athlete and control groups, or examined relationships between muscle characteristics and athletic performance.
- The study was published as an original research article.

Studies involving animals, cadavers, or clinical patient groups were excluded. Studies were also excluded if they did not include an appropriate measure of lower-extremity muscle architecture or morphology. This included studies that focused only on electromyographic activity, muscle strength, muscle fatigue, tendon properties, injury imaging findings, or biomechanical movement variables. Reviews, systematic reviews, meta-analyses, letters to the editor, case reports, methodological studies, and conference abstracts were not included in the primary synthesis. Studies examining the short-term effects of an exercise or training intervention were also excluded because this review focused on existing sport-specific muscle characteristics.

Reports for which the full text could not be obtained were not classified as scientifically ineligible. Instead, they were recorded as "reports not retrieved" during the study selection process.

2.3. Information sources and search strategy

The literature search was conducted between September 1 and 8, 2026. PubMed and Scopus databases and the Google Scholar academic search engine were searched using English-language terms. The search covered concepts related to muscle architecture, muscle morphology, the lower extremity, athletes, and athletic performance.

The main search string was:

("muscle architecture" OR "muscle morphology" OR "fascicle length" OR "pennation angle" OR "muscle thickness" OR "muscle volume" OR "cross-sectional area") AND ("lower limb" OR "lower extremity" OR quadriceps OR hamstring* OR gastrocnemius OR "vastus lateralis") AND (athlete* OR sport* OR sprinter* OR runner* OR football OR soccer OR basketball OR volleyball OR swimming)

Additional searches were conducted using the phrases "sport-specific muscle architecture," "lower-limb muscle morphology in athletes," "muscle architecture and athletic performance," "muscle volume and sprint performance," and "muscle volume and jump performance." The titles, abstracts, and available full texts of the identified records were assessed against the eligibility criteria.

2.4. Study selection

A total of 300 records were screened by title and abstract. At this stage, 278 records were excluded because they did not include an eligible athlete sample, did not assess lower-extremity

muscle architecture or morphology, did not use an appropriate imaging method, were not original research articles, or focused on outcomes outside the scope of the review.

Following title and abstract screening, 22 articles remained for detailed eligibility assessment. The full texts of all 22 articles were retrieved and examined; therefore, there were no reports that could not be obtained. The studies excluded during the full-text assessment and the reasons for exclusion were recorded. When more than one report described the same study, the most comprehensive and recent report was used. The screening and study-selection process was presented in a simplified flow diagram based on PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

2.5. Data extraction

Data from the included studies were entered into a standardized extraction table developed for the aims of the review. The following information was extracted from each study:

- Author and year of publication
- Country in which the study was conducted
- Study design
- Number, age, and sex of participants
- Sport and performance level
- Characteristics of the comparison or control group
- Lower-extremity muscles examined
- Imaging method
- Measurements of fascicle length, pennation angle, muscle thickness, cross-sectional area, and muscle volume
- Athletic performance variables
- Main differences between groups
- Relationships between muscle characteristics and performance measures

For studies that examined both muscle and tendon properties, only data on muscle architecture and morphology were extracted. Tendon thickness, stiffness, strain, elongation, and aponeurosis properties were not included in the synthesis. Where available, means and standard deviations, between-group differences, correlation coefficients, regression coefficients, confidence intervals, significance levels, and reported effect sizes were recorded.

2.6. Risk-of-bias assessment

The risk of bias in the included analytical cross-sectional studies was assessed using the updated Joanna Briggs Institute (JBI) critical appraisal tool for analytical cross-sectional studies. This tool is designed to examine possible sources of bias related to study design, measurement, confounding, statistical analysis, and reporting (Barker et al., 2026).

The assessment covered the following eight criteria:

1. Clear definition of the criteria used to include participants in the sample
2. Use of objective and standard criteria to identify the condition or characteristic being examined
3. Valid and reliable measurement of exposure
4. Valid and reliable measurement of outcomes
5. Identification of potential confounding variables
6. Description of strategies used to address confounding
7. Appropriateness of the statistical analyses for the research question and data
8. Adequate description of the participants and study setting

Sport, training or performance group, and athlete–control group status were treated as the main exposure variables. Fascicle length, pennation angle, muscle thickness, cross-sectional area, and muscle volume were considered the main outcomes. In studies examining performance

associations, the validity of sprint, jump, strength, and anaerobic power measures was also assessed, together with the suitability of the statistical methods.

Each criterion was rated as “Yes,” “No,” “Unclear,” or “Not applicable.” Where appropriate, criteria related to outcome measurement, control of confounding, and statistical analysis were assessed separately for each outcome. Sport, sex, age or biological maturity, body size, and training history were considered the main potential confounding variables in this review.

Risk-of-bias assessments were not converted into a total score. Studies were therefore not classified as being of “low,” “moderate,” or “high” quality on the basis of a summary score. They were not excluded from the synthesis solely because they failed to meet a particular quality threshold. The assessments were used to identify the strengths and limitations of each study and to inform the interpretation of the findings.

2.7. Data synthesis

The included studies differed in the sports represented, participant characteristics, muscles examined, imaging methods, comparison groups, and reported outcomes. The findings were therefore combined using a structured narrative synthesis. Results were grouped into three main areas: muscle architecture, muscle morphology, and associations with athletic performance. Comparisons also considered sport, age or biological maturity, sex, and imaging method.

Fascicle length, pennation angle, and muscle thickness were examined as measures of muscle architecture. Anatomical or maximum cross-sectional area and muscle volume were considered measures of muscle morphology. Performance-related findings were examined mainly in relation to sprinting, jumping, strength, and anaerobic power. The synthesis considered the groups compared, muscles examined, measurement methods, and the direction and magnitude of the findings. Confidence intervals and other measures of statistical uncertainty were also considered when available.

A quantitative meta-analysis was not performed because the studies did not examine the same muscles in comparable athlete groups or use sufficiently similar imaging protocols. Comparable numerical data for the same outcomes were also limited. Consistency across studies and possible sources of variation were considered in relation to participant characteristics, sport, training level, muscle examined, and measurement method. Associations reported in observational and cross-sectional studies were not interpreted as evidence of causality or training-induced adaptation.

3. RESULTS

3.1. Study selection

Of the 300 records screened by title and abstract, 278 were excluded. These records either did not include an eligible athlete sample, did not assess lower-extremity muscle architecture or morphology, did not use an appropriate imaging method, were not original research articles, or focused on outcomes outside the scope of the review.

The full texts of the remaining 22 articles were assessed for eligibility. Two studies were excluded at this stage because their muscle architecture measurements did not involve the lower extremity. Both studies focused on the triceps brachii and therefore did not meet the eligibility criteria (Ichinose et al., 1998; Ikegawa et al., 2008). A total of 20 studies were included in the narrative synthesis. The study-selection process is summarised in the simplified PRISMA-based flow diagram presented in Figure 1.

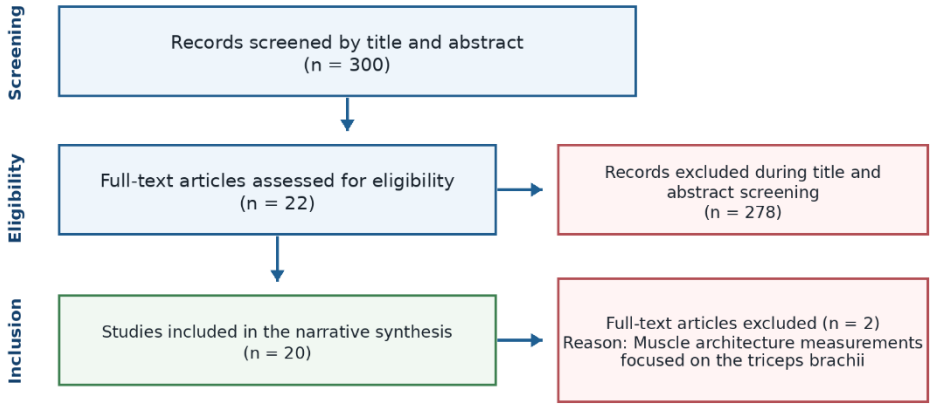


Figure 1. Simplified flow diagram of the study-selection process based on PRISMA 2020.

3.2. General characteristics of the included studies

The included studies were published between 2000 and 2026. Most used a cross-sectional observational design. They either compared muscle characteristics across sports or performance levels or examined associations between muscle architecture, muscle morphology, and athletic performance. The participants included sprinters, distance runners, soccer players, swimmers, basketball players, volleyball players, badminton players, jump athletes, American football players, and collegiate athletes from different sports.

Ultrasonography and magnetic resonance imaging were the main methods used to assess muscle characteristics. Ultrasound-based studies generally examined muscle thickness, fascicle length, and pennation angle in the vastus lateralis, vastus medialis, rectus femoris, biceps femoris, and the medial and lateral gastrocnemius. Studies using magnetic resonance imaging assessed the volumes of individual lower-extremity muscles, maximum or anatomical cross-sectional areas, and the distribution of muscle volume across the lower extremity.

The reported performance measures included 100-m sprint time, short-distance sprint time, vertical and horizontal jump performance, anaerobic power, agility, sport-specific physical abilities, and cardiorespiratory performance. Some studies directly compared athletes from different sports, whereas others compared athletes with untrained or recreationally active control groups. Studies involving a single group of athletes examined the relationships between muscle characteristics and performance measures.

Table 1. General characteristics and main findings of the included studies

Study	Sample and sport	Methods and variables	Main findings
Abe et al. (2000)	23 elite male sprinters, 24 distance runners, and 24 untrained controls	US; VL, GM, and GL; muscle thickness, fascicle length, and pennation angle	Sprinters had longer fascicles and greater muscle thickness than distance runners. Their pennation angles were also smaller than those of the distance runners.
Abe et al. (2001)	26 female sprinters and 22 controls	US; VL, GM, and GL; fascicle length, pennation angle, and muscle thickness	Sprinters had longer VL and GL fascicles. Absolute VL and GL fascicle lengths were negatively associated with 100-m sprint time.
Aeles et al. (2017)	16 jump athletes and 11 untrained controls	US; GM; fascicle length and pennation angle	No consistent architectural differences were found between the preferred and non-preferred legs. The findings varied with ankle position.
Chino et al. (2018)	478 elite athletes and 70 non-athlete controls	US and shear-wave elastography; RF; muscle thickness and passive stiffness	RF thickness was greater in athletes of both sexes than in non-athletes. The difference remained after normalisation for body size.

Study	Sample and sport	Methods and variables	Main findings
Kanehisa et al. (2003)	38 soccer players and 27 swimmers, including women and men	US; VL and GM; muscle thickness, fascicle length, and pennation angle	Muscle-specific differences were observed according to sport and sex. No single architectural pattern was shared by all athletes.
Knaus et al. (2023)	27 NCAA athletes from basketball, American football, baseball, and track and field	MRI; volumes of 35 lower-extremity muscles	Muscle-volume phenotypes did not always cluster according to sport. Considerable individual variation was observed.
Komici et al. (2026)	72 male soccer players	US; RF, VI, and total thigh muscle thickness	Muscle-thickness measures were positively associated with peak oxygen uptake, although the models explained a limited proportion of the variance.
Kumagai et al. (2000)	37 male 100-m sprinters	US; VL, GM, and GL; fascicle length and pennation angle	Longer fascicles were associated with faster 100-m performance. Architectural characteristics differed according to sprint performance level.
Lazarczuk et al. (2025)	15 elite sprint or jump athletes and 15 recreationally active controls	MRI; hamstring muscle volume and cross-sectional area	Elite athletes had greater volumes in all hamstring muscles. Hamstring volume was also associated with sprint speed and eccentric knee-flexor strength.
Lee et al. (2021)	58 athletes from six sports	US; RF, VM, VL, TA, GM, and GL; muscle thickness and pennation angle	Differences between sports were muscle-specific. Several muscle-thickness measures were associated with anaerobic power.
Mangine et al. (2014)	9 NBA players	US; RF and VL; muscle thickness, fascicle length, pennation angle, and cross-sectional area	Bilateral differences varied among players. An exploratory association was reported between RF cross-sectional area asymmetry and the proportion of games missed.
Martin et al. (2026)	66 collegiate American football players	MRI; lower-extremity muscle volumes and on-field sprint speed	Psoas major volume explained 50% of the variance in sprint speed. Adding other muscles provided only limited additional explanatory value.
Mersmann et al. (2017)	21 elite adolescent volleyball players and 24 untrained controls	US; VL; muscle thickness, fascicle length, and pennation angle	Volleyball players had greater muscle thickness and pennation angles. Normalized fascicle length did not differ between groups.
Miller et al. (2022)	5 elite and 17 sub-elite female sprinters	3-T MRI; lower-extremity muscle volumes	The elite group had greater total lower-extremity muscle volume, particularly in muscles around the hip. Relative hip-flexor volume was associated with sprint performance.
Nadzalan et al. (2018)	30 collegiate badminton players	US; VL, VM, RF, and BF; architectural measures	Muscle–performance relationships varied across the lunge, jump, and agility tests. No single architectural measure showed the same pattern across all tests.
O'Brien et al. (2026)	207 NCAA Division I athletes	MRI; volumes of 38 muscles; force-platform CMJ	After adjustment for sex and sport, VL volume was associated with jump height and relative peak power.
Panidi et al. (2025)	144 female volleyball players aged 8–18 years	US; VL and GM; architectural measures	Fascicle length and muscle thickness differed across maturity groups. Body size was an important explanatory factor.

Study	Sample and sport	Methods and variables	Main findings
Sugisaki et al. (2018)	31 male sprinters	MRI; individual lower-extremity muscle volumes	The ratio of gluteus maximus volume to quadriceps femoris volume was associated with 100-m sprint time, although the proportion of explained variance was limited.
Tate et al. (2006)	10 young athletes from different sports	MRI; bilateral muscle volume and maximum cross-sectional area	Side-to-side differences were found in some individual muscles. Total quadriceps volume did not differ significantly between limbs.
Xie et al. (2020)	10 varsity and 8 club-level basketball players	MRI; individual muscle volumes; sprint and jump performance	VM volume was associated with jump performance. Volumes of specific adductor and quadriceps muscles were associated with different sprint sections.

Abbreviations: US, ultrasonography; MRI, magnetic resonance imaging; VL, vastus lateralis; VM, vastus medialis; VI, vastus intermedius; RF, rectus femoris; BF, biceps femoris; GM, medial gastrocnemius; GL, lateral gastrocnemius; TA, tibialis anterior; CMJ, countermovement jump.

3.3. Classification of the findings

Because the studies differed in sample characteristics, muscles examined, and reported outcomes, the findings were grouped into four themes:

1. Differences in muscle architecture across sports and running disciplines
2. Differences in muscle architecture and morphology between athletes and control groups
3. Associations of muscle architecture and morphology with athletic performance
4. Effects of sex, maturation, and bilateral differences on muscle characteristics

A single study could contribute to more than one theme. For example, some studies included comparisons by both sport and sex. Others contributed findings on sport, sex, and jump performance (Kanehisa et al., 2003; O'Brien et al., 2026).

3.4. Differences in muscle architecture and morphology across sports and performance levels

Comparisons of running disciplines identified different architectural patterns in sprint and endurance athletes. Elite male sprinters had longer fascicles in the vastus lateralis and the medial and lateral gastrocnemius than distance runners, together with smaller pennation angles. Vastus lateralis fascicle length was greatest in sprinters and lowest in distance runners, while the control group showed intermediate values. Sprinters also had greater muscle thickness than both distance runners and untrained controls (Abe et al., 2000).

Other studies of sprinters suggest that differences in fascicle length may be related to performance level. Faster male 100-m sprinters had longer fascicles and smaller pennation angles in the vastus lateralis and the medial and lateral gastrocnemius. Fascicle length was negatively associated with 100-m sprint time, meaning that longer fascicles were related to faster performance (Kumagai et al., 2000). Female sprinters also had longer vastus lateralis and lateral gastrocnemius fascicles than controls. The absolute fascicle lengths of these muscles were significantly associated with 100-m performance (Abe et al., 2001).

Findings based on muscle volume also point to anatomically specific differences between performance levels. One study compared five elite and 17 subelite female sprinters. Total absolute lower-extremity muscle volume was 15% greater in the elite group. Elite sprinters had 28% greater absolute hip-flexor volume, 22% greater hip-extensor volume, and 21% greater knee-extensor volume. Hip-flexor volume adjusted for body mass alone explained 48% of the

variation in sprint performance (Miller et al., 2022). However, the elite group included only five athletes, which limits the generalizability of these findings.

Comparisons of sports with different movement demands also revealed muscle-specific patterns. In a study of 38 soccer players and 27 swimmers, swimmers tended to have greater muscle thickness and longer fascicles, particularly in the vastus lateralis, whereas soccer players tended to have larger pennation angles. Male athletes generally had greater muscle thickness and larger pennation angles than female athletes, but sex differences in fascicle length varied by muscle and sport. Sport- and sex-related differences were therefore not represented by a single architectural characteristic (Kanehisa et al., 2003).

A comparison of 58 athletes from boxing, judo, taekwondo, soccer, wrestling, and Ssireum found differences across sports in the thickness of the rectus femoris, vastus medialis, vastus lateralis, and tibialis anterior, as well as in some pennation-angle measures. However, several measurements of the medial and lateral gastrocnemius were similar across sports. Sport-related differences were therefore specific to the muscle and architectural variable examined (Lee et al., 2021).

MRI was used to examine the volumes of 35 lower-extremity muscles in 27 collegiate athletes from basketball, American football, baseball, and track and field. Individual muscle phenotypes were created by comparing body-mass-normalized muscle volumes with reference data from non-athletes. Athletes with similar muscle-volume patterns did not always participate in the same sport (Knaus et al., 2023). Sport may influence the distribution of muscle volume, but muscle phenotypes cannot be explained by sport alone. Individual training history, playing position, and performance characteristics may also contribute to the observed variation.

Longer fascicles and greater volumes in specific muscle groups were more prominent in activities requiring high speed, but no uniform architectural pattern was observed across sports or lower-extremity muscles. The marked individual variation in muscle-volume distribution also argues against assigning a single, fixed muscle profile to each sport. As most of the evidence was cross-sectional, it remains unclear whether these characteristics developed through long-term training or reflected pre-existing differences between athletes (Abe et al., 2000; Kanehisa et al., 2003; Lee et al., 2021; Miller et al., 2022; Knaus et al., 2023).

3.5. Differences in muscle architecture and morphology between athletes and control groups

Studies comparing athletes with untrained or recreationally active individuals showed that regular participation in sport was associated with greater muscle thickness and muscle volume. However, the magnitude of these differences varied according to the muscle group, sport, sex, and measurement method.

One study compared 21 elite adolescent volleyball players, with a mean age of 16.7 years, with 24 age-matched controls. Vastus lateralis thickness was 38% greater and pennation angle was 27% larger in the volleyball players than in the controls (both $p < 0.001$). Fascicle length normalized to femur length did not differ significantly between the groups, whereas body-mass-normalized knee-extension moment was greater in the athletes (Mersmann et al., 2017). Greater knee-extensor strength in adolescent volleyball players was therefore accompanied by greater muscle thickness and pennation angle. Because the study was cross-sectional, these differences cannot be attributed solely to volleyball training.

A larger study compared 278 male and 200 female elite athletes with 35 male and 35 female non-athletes. Rectus femoris thickness was 2.3 ± 0.3 cm in male athletes and 1.9 ± 0.3 cm in male non-athletes ($p < 0.001$; Cohen's $d = 1.24$). Among women, muscle thickness was 2.1 ± 0.3 cm in athletes and 1.7 ± 0.3 cm in non-athletes ($p < 0.001$; Cohen's $d = 1.18$). Muscle thickness normalized to the cube root of body mass was also greater in athletes of both sexes,

indicating that the difference in rectus femoris thickness could not be explained by body size alone (Chino et al., 2018). However, athletes from different sports were combined into a single large group, which limits sport-specific interpretation.

Another study used MRI to compare 15 elite sprint or horizontal jump athletes with 15 recreationally active participants. The elite athletes had greater muscle volume in every hamstring muscle examined. Mean between-group differences ranged from 59.75 to 150.45 cm^3 across the muscles. In the elite group, the long head of the biceps femoris was, on average, 78.46 cm^3 larger than in the control group. The corresponding difference for the semitendinosus was 150.45 cm^3. Hamstring muscle volumes were also significantly associated with sprint speed and eccentric knee-flexor strength (Lazarczuk et al., 2025). Although the study also assessed tendon and aponeurosis properties, the present review considered only muscle volume and muscle cross-sectional area.

In a comparison of 26 female sprinters and 22 controls, the sprinters had greater absolute fascicle lengths in the vastus lateralis and lateral gastrocnemius. Vastus lateralis fascicle length was 8.40 ± 1.24 cm in sprinters and 5.98±1.03 cm in controls. Lateral gastrocnemius fascicle length was 7.44±1.07 cm and 6.26±0.87 cm, respectively. The between-group difference in medial gastrocnemius fascicle length was less pronounced (Abe et al., 2001). These findings show that athlete–control differences were not equally large across all muscles within the same individuals.

Athletes generally had greater muscle thickness or muscle volume than control participants, but differences in fascicle length and pennation angle were not consistent across muscles or athlete groups. Greater thickness and pennation angles were more apparent in adolescent volleyball players, whereas longer fascicles or greater hamstring volumes were observed in sprint and jump athletes. Athlete–control differences should therefore be interpreted according to the muscle examined, sport, age, and sex rather than as a general increase in all architectural measures (Abe et al., 2001; Mersmann et al., 2017; Chino et al., 2018; Lazarczuk et al., 2025).

3.6. Associations of muscle architecture and morphology with athletic performance

The relationships between muscle architecture, muscle morphology, and athletic performance were examined using sprint, jump, strength, anaerobic power, and sport-specific tests. The findings suggest that performance may be more closely related to the architectural and morphological characteristics of the muscles involved in a particular movement than to total lower-extremity muscle size. However, the direction and strength of these relationships vary according to the muscle and performance task.

Sprint performance

In male 100-m sprinters, fascicle lengths in the vastus lateralis and the medial and lateral gastrocnemius were negatively associated with 100-m sprint time, with correlation coefficients ranging from −0.40 to −0.57 across the muscles. Because a shorter time represents better performance, the negative correlations indicate that longer fascicles were associated with faster sprinting (Kumagai et al., 2000). In female sprinters, absolute fascicle lengths in the vastus lateralis and lateral gastrocnemius were associated with 100-m performance at $r = -0.51$ and $r = -0.44$, respectively (Abe et al., 2001). Fascicle lengths normalized to limb length, however, were not significantly associated with sprint performance. Absolute and normalized measures may therefore yield different results.

Studies assessing muscle volume suggest that its distribution across muscles may be more relevant to sprint performance than the absolute size of a single muscle. In 31 male sprinters, the ratio of gluteus maximus volume to quadriceps femoris volume was included in a regression model explaining 100-m sprint time. The model accounted for a limited proportion of the

variance (adjusted R^2 = 0.234), indicating that this muscle-volume ratio explained only part of the variation in sprint performance (Sugisaki et al., 2018).

The relationships between lower-extremity muscle volumes and on-field sprint speed were examined in 66 collegiate American football players. Psoas major volume explained 50% of the variance in sprint speed. Gluteus medius and gluteus maximus volumes explained 45% and 37%, respectively. Models that included the psoas major, gluteus medius, and piriformis provided only limited additional explanatory value compared with psoas major volume alone (Martin et al., 2026). These findings suggest that proximal muscle volumes may be particularly relevant to sprint speed. However, adding several muscles to a model does not necessarily produce a substantial increase in its explanatory value.

In a study of female sprinters, hip-flexor volume normalized to body mass explained 48% of the variation in sprint performance. A model combining the relative volumes of the sartorius and adductor magnus explained 58% of the variance in 100-m performance (Miller et al., 2022). However, the elite group included only five athletes. The small elite sample and the use of stepwise regression mean that these percentages should not be generalised without confirmation in larger samples.

Jump performance

The relationships between individual lower-extremity muscle volumes measured by MRI and jump and sprint performance were examined in 10 varsity and eight club-level male basketball players. Vastus medialis and semimembranosus were identified as the muscles most relevant to jump performance, whereas adductor longus and vastus medialis were selected for sprint performance. Among the varsity players, correlations between the selected muscles and their associated performance tests ranged from r = 0.664 to 0.909. The corresponding relationships were weaker and more variable in the club-level group (r = −0.203 to 0.635) (Xie et al., 2020). The muscles associated with performance therefore varied according to the task and the athletes' competitive level.

The volumes of 38 lower-extremity muscles were assessed in 207 NCAA Division I athletes from basketball, American football, ice hockey, and soccer. After adjustment for sex and sport, vastus lateralis volume was associated with both jump height (β = 0.36, p < 0.01) and peak power normalized to body mass (β=0.41, p<0.01). The model for jump height explained 54% of the variance, whereas the model for peak power explained 71%. The vastus lateralis was the only muscle included in both models (O'Brien et al., 2026). Other muscles contributed differently to the two models. This suggests that jump height and peak power do not represent exactly the same aspect of performance.

Anaerobic power and sport-specific performance

Muscle thickness and pennation angle measured by ultrasonography were compared with anaerobic power measures in 58 athletes from six sports. Mean power was positively associated with rectus femoris thickness (r = 0.592) and medial gastrocnemius thickness (r=0.498). Vastus medialis and medial gastrocnemius thickness were significant predictors of peak power. Rectus femoris and medial gastrocnemius thickness were significant predictors of mean power (Lee et al., 2021). These relationships varied across sports, showing that the link between muscle characteristics and performance should be interpreted in relation to the movement demands of each sport.

The relationships between the architectural characteristics of the vastus lateralis, vastus medialis, rectus femoris, and biceps femoris and several performance measures were examined in 30 collegiate badminton players. The tests included lunge force, vertical jump, standing long jump, and agility. Muscle thickness and pennation angle were generally positively associated with strength and jump performance. Some fascicle-length measures, however, showed

negative associations. Only vastus medialis and rectus femoris thickness and biceps femoris pennation angle were significantly associated with agility (Nadzalan et al., 2018). These results show that a particular architectural characteristic does not provide the same type of advantage across all athletic tasks.

The relationships of rectus femoris, vastus intermedius, and total thigh muscle thickness with cardiorespiratory performance were examined in 72 male soccer players. After adjustment for age, body mass index, and respiratory function, all three thickness measures were independently and positively associated with peak oxygen uptake. Of the measures examined, total thigh muscle thickness showed the strongest association with peak oxygen uptake (β=2.91; 95% CI: 0.65–5.16; p = 0.012; R^2 = 0.19; Komici et al., 2026). However, the model explained only 19% of the variance, indicating that muscle thickness accounted for a limited portion of cardiorespiratory performance.

Overall, muscle architecture and morphology appear to be associated with athletic performance, but they do not explain all aspects of performance on their own. Longer fascicles are associated with sprint performance. The volumes of the quadriceps and muscles around the hip are related to sprint and jump performance, while muscle thickness and pennation angle are associated with some measures of strength and anaerobic power. These findings vary according to the muscle, sport, and performance test. Because most of the studies were cross-sectional, it cannot be concluded that longer fascicles or greater muscle volume directly lead to better performance. The findings should be interpreted as associations rather than causal relationships (Kumagai et al., 2000; Sugisaki et al., 2018; Xie et al., 2020; Lee et al., 2021; O'Brien et al., 2026).

3.7. Sex, biological maturity, and bilateral differences

Sex-related differences

Sex differences in lower-extremity muscle architecture have been directly examined in only a limited number of studies. A comparison of female and male soccer players and swimmers found that male athletes generally had greater vastus lateralis and medial gastrocnemius thickness than female athletes. Most of these differences remained after muscle thickness was normalized to limb length. Male athletes also had larger pennation angles in most comparisons. In contrast, sex differences in fascicle length varied by muscle and sport, with no consistent pattern across all groups (Kanehisa et al., 2003).

In a study of adolescent volleyball players and untrained controls, male participants had larger body dimensions and greater knee-extensor strength than female participants. However, no significant sex difference was found in vastus lateralis fascicle length. The effects associated with athlete status on muscle thickness and pennation angle were similar in both sexes (Mersmann et al., 2017). These findings suggest that sex differences in muscle size may not be accompanied by differences of the same magnitude in fascicle length.

Differences related to biological maturity

A total of 144 female volleyball players aged 8–18 years were divided into three biological maturity groups: pre-, circa-, and post-peak height velocity. Fascicle length and muscle thickness in the medial gastrocnemius and vastus lateralis differed significantly across the maturity groups. Post-peak height velocity athletes generally had longer fascicles and greater muscle thickness than pre-peak height velocity athletes. Medial gastrocnemius pennation angle also differed between the pre- and post-peak height velocity groups. No significant group effect was found for vastus lateralis pennation angle (Panidi et al., 2025).

The same study found significant relationships between anthropometric characteristics and muscle architecture. Body mass and training experience explained 40% of the variance in medial gastrocnemius fascicle length. Body mass and height were the main factors associated with vastus lateralis fascicle length. Differences in muscle thickness also varied with body mass

and fascicle length. These findings show that biological maturity and body size should be considered alongside chronological age when muscle architecture is assessed in child and adolescent athletes. As the study was cross-sectional, it could not directly track changes during individual growth.

Differences between the preferred and non-preferred limbs

Medial gastrocnemius fascicle length and pennation angle were compared between the preferred and non-preferred legs of 16 jump athletes and 11 untrained participants. At the ankle position corresponding to tendon slack length, the athletes showed no significant between-leg differences in fascicle length or pennation angle. Measurements taken with the ankle at 90° also did not show consistently longer fascicles in the preferred leg. The athletes had greater medial gastrocnemius pennation angles than the untrained participants at the tendon slack position, whereas group differences in fascicle length varied with ankle position. Joint position may therefore influence comparisons of muscle architecture (Aeles et al., 2017).

Both lower limbs of 10 young athletes were examined using MRI. Side-to-side differences were found in the volume and cross-sectional area of several individual muscles. Vastus medialis volume was, on average, 59 ± 25 cm^3 greater in the dominant limb, whereas vastus lateralis volume was 54 ± 47 cm^3 greater in the non-dominant limb. Despite these opposing differences, total quadriceps volume was similar between limbs. Differences in individual muscles may therefore not be reflected in measurements of the muscle group as a whole. However, the small sample and the inclusion of athletes from different sports limit the generalisability of these findings (Tate et al., 2006).

The bilateral architecture of the rectus femoris and vastus lateralis was examined in nine professional basketball players. The magnitude and direction of the differences in muscle thickness, pennation angle, fascicle length, and cross-sectional area varied among players. A positive association was reported between rectus femoris cross-sectional area asymmetry and the proportion of games missed because of lower-extremity injury ($r = 0.657$, $p = 0.050$). Given the small sample, the number of comparisons performed, and the limited number of injured players, this association should be regarded as an exploratory finding (Mangine et al., 2014).

Overall, the effects of limb preference or dominance were not consistent across muscles. The preferred or dominant limb was not systematically greater in all architectural and morphological measures. Side-to-side differences appeared to be muscle-specific. In some cases, opposing differences between individual muscles balanced one another at the muscle-group level. Joint position also influenced some architectural measurements. Bilateral findings should therefore be interpreted in relation to the muscle examined, the measurement position, and the characteristics of the athlete sample (Aeles et al., 2017; Tate et al., 2006; Mangine et al., 2014).

3.8. Risk-of-bias assessment

The risk of bias in the 20 included studies was assessed using the eight-item JBI critical appraisal tool for analytical cross-sectional studies, updated in 2026 (Barker et al., 2026). The results are presented in Table 2.

Y: Yes, **N:** No, **U:** Unclear, **NA:** Not applicable

Table 2. Risk-of-bias assessment of the included studies

Study	JBI-1	JBI-2	JBI-3	JBI-4	JBI-5	JBI-6	JBI-7	JBI-8
Abe et al. (2000)	Y	NA	Y	Y	Y	U	Y	U
Abe et al. (2001)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Aeles et al. (2017)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Chino et al. (2018)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Study	JBI-1	JBI-2	JBI-3	JBI-4	JBI-5	JBI-6	JBI-7	JBI-8
Kanehisa et al. (2003)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Knaus et al. (2023)	Y	NA	Y	Y	U	U	Y	Y
Komici et al. (2026)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Kumagai et al. (2000)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Lazarczuk et al. (2025)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Lee et al. (2021)	Y	NA	Y	Y	U	N	Y	Y
Mangine et al. (2014)	Y	NA	Y	Y	Y	N	Y	Y
Martin et al. (2026)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Mersmann et al. (2017)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Miller et al. (2022)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Nadzalan et al. (2018)	Y	NA	Y	Y	N	N	Y	Y
O'Brien et al. (2026)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Panidi et al. (2025)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Sugisaki et al. (2018)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Tate et al. (2006)	Y	NA	Y	Y	U	N	Y	Y
Xie et al. (2020)	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y

JBI criteria

- **JBI-1:** Were the criteria for inclusion in the sample clearly defined?
- **JBI-2:** Were objective, standard criteria used to measure the condition?
- **JBI-3:** Was the exposure measured in a valid and reliable way?
- **JBI-4:** Were the outcomes measured in a valid and reliable way?
- **JBI-5:** Were confounding factors identified?
- **JBI-6:** Were strategies for dealing with confounding factors stated?
- **JBI-7:** Were the statistical analyses appropriate?
- **JBI-8:** Were the study participants and setting described in detail?

JBI-2 was rated as "Not applicable" because eligibility for the included studies was not based on the presence of a clinical condition requiring diagnostic or classification criteria. In Abe et al. (2000), the participants, group definitions, imaging methods, and statistical analyses were adequately described. However, the effect of the between-group difference in body mass was not fully addressed in the analyses. Details of the study setting and recruitment period were also limited. JBI-6 and JBI-8 were therefore rated as "Unclear." These limitations were considered when interpreting the findings, but the study was retained in the synthesis.

Most studies adequately described participant characteristics, the criteria used to define athlete groups, and the imaging methods. Anatomical measurement sites and image-analysis procedures were generally reported for both ultrasonography and MRI. Some studies also provided information on intra-rater or inter-rater reliability. The statistical analyses were generally appropriate for the stated research aims.

The main methodological differences between studies concerned the identification and control of confounding variables. In a study involving athletes from several sports, potential confounders such as age, body size, training experience, and sex were not controlled across all analyses (Lee et al., 2021). Another study relied mainly on bivariate correlations without accounting for body size or training history (Nadzalan et al., 2018). The small and heterogeneous sample in Tate et al. (2006), which included athletes of different ages, sexes, and

sports, made it difficult to separate possible confounding effects. In the study of nine professional basketball players, the small sample limited the precision of the injury-related findings (Mangine et al., 2014).

Some studies addressed potential confounding through normalized measurements or multivariable analyses. Muscle thickness was normalized to body mass, and analyses were conducted separately by sex (Chino et al., 2018). Relationships between muscle volume and jump performance were adjusted for sex and sport. Other models accounted for age, body mass index, and respiratory function (O'Brien et al., 2026; Komici et al., 2026). Anthropometric characteristics, training experience, and biological maturity were also considered together in regression models (Panidi et al., 2025).

Overall, the included studies provided adequate methodological detail on the assessment of muscle architecture and morphology. Important limitations remained, including small and heterogeneous samples, incomplete control of confounding variables, the simultaneous testing of multiple relationships, and the widespread use of cross-sectional designs. The reported associations were therefore interpreted as structural and performance-related patterns observed in specific athlete groups rather than as evidence of causality.

4. DISCUSSION

4.1. Overview of the main findings

This systematic review examined lower-extremity muscle architecture and morphology in athletes from different sports. Three broad findings emerged. First, athletes differed from untrained or recreationally active individuals in muscle thickness, fascicle length, pennation angle, and muscle volume. Second, these differences did not follow a consistent pattern across all muscles or sports. Third, measures of muscle architecture and morphology were associated with athletic performance, but the direction and strength of these relationships varied according to the muscle and movement task.

Athletes generally had greater muscle thickness or muscle volume than non-athletes. Rectus femoris thickness was greater in elite male and female athletes than in non-athletes (Chino et al., 2018). Adolescent volleyball players had greater vastus lateralis thickness and larger pennation angles than controls (Mersmann et al., 2017), while elite sprint and jump athletes had greater hamstring muscle volumes than recreationally active participants (Lazarczuk et al., 2025). These differences cannot be attributed solely to training because the studies were cross-sectional. Individuals with certain muscle characteristics may also be more likely to enter a particular sport or achieve a higher performance level.

The findings do not support the general conclusion that all measures of muscle architecture are greater in athletes. Adolescent volleyball players had greater muscle thickness and pennation angles than controls, but normalized fascicle length did not differ between the groups (Mersmann et al., 2017). Athlete–control differences in medial gastrocnemius architecture also varied according to the ankle angle used during measurement (Aeles et al., 2017). In comparisons across sports, some muscles showed significant differences, while certain measurements of the medial and lateral gastrocnemius remained similar (Lee et al., 2021). Muscle architecture should therefore be considered in relation to the specific muscle and task rather than as a single general athlete profile.

MRI studies revealed morphological variation that could not be explained by total muscle mass alone. Athletes with similar muscle-volume patterns did not always cluster according to their sport (Knaus et al., 2023). Among elite female sprinters, the hip flexor and extensor muscle groups were particularly prominent in terms of volume (Miller et al., 2022). Jump performance was associated more closely with the volumes of specific muscles, such as the vastus medialis and vastus lateralis, than with total lower-extremity muscle volume (Xie et al., 2020; O'Brien

et al., 2026). These findings suggest that the regional distribution and relative size of individual muscles may be as relevant to athletic performance as overall muscle size.

4.2. Muscle architecture in sprint and endurance disciplines

Sprint performance requires the production of high force within a very short time and the ability of muscles to operate at high shortening velocities. Longer fascicles may support faster shortening because they contain more sarcomeres arranged in series. A larger pennation angle may allow more contractile tissue to be packed within a given muscle volume. However, it also alters the component of fibre force transmitted along the tendon (Kawakami, 2005; Timmins et al., 2016). The functional effects of these structural features should therefore be considered in relation to the role of the muscle, the type of contraction, and movement velocity.

Elite male sprinters had longer vastus lateralis and gastrocnemius fascicles than distance runners, a pattern consistent with the high shortening velocities required during sprinting (Abe et al., 2000). Longer fascicles were also associated with faster 100-m performance in male sprinters (Kumagai et al., 2000). Similar relationships were reported for the vastus lateralis and lateral gastrocnemius in female sprinters (Abe et al., 2001). The consistency of these results across male and female athletes supports an association between fascicle length and sprint performance.

The relationship between fascicle length and sprint performance depends partly on whether measurements are reported as absolute values or normalized for body size. In female sprinters, absolute fascicle lengths were associated with 100-m performance, whereas values normalized for limb length were not (Abe et al., 2001). This suggests that the association between absolute fascicle length and performance may partly reflect overall body and limb size. Firm conclusions about the independent contribution of fascicle length should therefore not be drawn without accounting for anthropometric characteristics.

Studies of muscle volume also show the importance of anatomical specificity in sprint performance. In male sprinters, the ratio of gluteus maximus volume to quadriceps femoris volume was associated with 100-m time (Sugisaki et al., 2018). Elite female sprinters had greater hip flexor and extensor muscle volumes than sub-elite sprinters. Certain combinations of muscle volumes also explained a substantial proportion of the variation in sprint performance (Miller et al., 2022). These findings suggest that sprint performance is not determined solely by total lower-limb muscle volume. The distribution of muscle volume around the hip and knee may also be important.

The shorter fascicles and lower muscle thickness observed in distance runners should not be interpreted as either a performance advantage or a limitation. Sprinters and distance runners face different functional demands, and the architectural characteristics observed in one group cannot be evaluated using the performance requirements of the other. Although structural differences have been reported between these groups, cross-sectional comparisons cannot determine whether they result from training, inherited characteristics, or athlete selection (Abe et al., 2000).

The available evidence links longer fascicles and greater volume in specific muscles with sprint performance, but it does not show that these characteristics determine performance on their own. Sprint performance is multifactorial, and several relevant determinants fall outside the scope of this review. The present synthesis was therefore limited to muscle architecture and morphology.

4.3. Relationship of muscle architecture and morphology with performance

Athletic performance was more closely related to the architectural and morphological characteristics of specific muscles involved in a task than to overall muscle size. Vastus medialis volume was associated with jump performance in basketball players (Xie et al., 2020),

whereas vastus lateralis volume was related to jump height and peak power in NCAA Division I athletes from different sports (O'Brien et al., 2026). Because the muscles associated with performance varied across tests, no single morphological measure can be considered a general determinant of athletic performance.

The relationships of muscle thickness and pennation angle with strength and anaerobic power varied according to the sport, muscle, and performance test. The same architectural variable did not show associations of a consistent direction or magnitude across different movement tasks (Lee et al., 2021; Nadzalan et al., 2018). Measures of muscle architecture should therefore be interpreted as one component of performance rather than as independent explanations of athletic ability.

4.4. Interpretation of sex, maturation, and bilateral characteristics

Findings related to sex indicate that male athletes may have greater muscle thickness and larger pennation angles in some muscles. In contrast, no consistent difference in fascicle length has been observed across all muscles and sports. Biological maturation and body size are also closely related to muscle architecture during growth. Comparisons based only on chronological age may therefore be insufficient, particularly in samples of children and adolescents (Kanehisa et al., 2003; Mersmann et al., 2017; Panidi et al., 2025).

Bilateral studies did not support the assumption that the preferred or dominant limb is more developed in every muscle. Side-to-side differences varied according to joint position and the muscle examined. Measurements of an entire muscle group may therefore mask opposing differences between individual muscles. The reported association between asymmetry and injury in professional basketball players should be treated as exploratory rather than confirmatory because of the small sample size (Aeles et al., 2017; Tate et al., 2006; Mangine et al., 2014).

4.5. Limitations and future research

The findings of this review should be interpreted in light of several limitations. Most of the included studies had a cross-sectional design. It was therefore not possible to determine whether sport-specific differences reflected training-related adaptations, athlete selection, or inherited characteristics. Sample sizes were small in some studies, and the athletes were not homogeneous in terms of age, sex, performance level, or training history. Differences in the muscles examined, joint positions, imaging protocols, and normalisation methods prevented a quantitative meta-analysis and limited direct comparisons between studies.

Although the literature search covered PubMed, Scopus, and Google Scholar, the search and study-selection records were not managed through a single independently verifiable bibliographic record. This may limit the reproducibility of the review process. Future reviews should use prospectively registered protocols, comprehensive searches across multiple bibliographic databases, and clearly documented record-management procedures. Future primary studies would also benefit from standardized ultrasound and MRI protocols and analyses that account for body size and training history. Longitudinal research is needed to distinguish training-related adaptations from pre-existing individual characteristics.

5. CONCLUSION

This systematic review shows that lower-limb muscle architecture and morphology in athletes vary according to the sport, the muscle examined, and the performance task. Longer fascicles and the volumes of specific muscles around the hip and knee were prominent in relation to sprint performance. In jumping and anaerobic power tasks, the volume and thickness of the quadriceps muscles appeared to be more relevant. Athletes generally had greater muscle thickness or muscle volume than control participants. However, differences in fascicle length and pennation angle were not consistent across all muscles.

Sex, biological maturation, body size, and bilateral differences should be considered when interpreting these relationships. Because the available evidence is based largely on cross-sectional studies, the observed characteristics should not be regarded as adaptations caused directly by training. Muscle architecture and morphology do not determine athletic performance on their own. Rather, they represent anatomical components of a multifactorial performance profile that is specific to the sport and movement task.

REFERENCES

Abe, T., Fukashiro, S., Harada, Y., & Kawamoto, K. (2001). Relationship between sprint performance and muscle fascicle length in female sprinters. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science, 20*(2), 141–147. https://doi.org/10.2114/jpa.20.141

Abe, T., Kumagai, K., & Brechue, W. F. (2000). Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 32*(6), 1125–1129. https://doi.org/10.1097/00005768-200006000-00014

Aeles, J., Lenchant, S., Vanlommel, L., & Vanwanseele, B. (2017). Bilateral differences in muscle fascicle architecture are not related to the preferred leg in jumping athletes. *European Journal of Applied Physiology, 117*(7), 1453–1461. https://doi.org/10.1007/s00421-017-3638-5

Barker, T. H., Hasanoff, S., Aromataris, E., Stone, J. C., Leonardi-Bee, J., Sears, K., Klugar, M., Tufanaru, C., Moola, S., Liu, X. L., & Munn, Z. (2026). The revised JBI critical appraisal tool for the assessment of risk of bias for analytical cross-sectional studies. *JBI Evidence Synthesis, 24*(3), 401–408. https://doi.org/10.11124/JBIES-24-00523

Blazevich, A. J., Gill, N. D., Bronks, R., & Newton, R. U. (2003). Training-specific muscle architecture adaptation after 5-wk training in athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 35*(12), 2013–2022. https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000099092.83611.20

Chino, K., Ohya, T., Kato, E., & Suzuki, Y. (2018). Muscle thickness and passive muscle stiffness in elite athletes: Implications of the effect of long-term daily training on skeletal muscle. *International Journal of Sports Medicine, 39*(3), 218–224. https://doi.org/10.1055/s-0043-122737

Ichinose, Y., Kanehisa, H., Ito, M., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (1998). Relationship between muscle fiber pennation and force generation capability in Olympic athletes. *International Journal of Sports Medicine, 19*(8), 541–546. https://doi.org/10.1055/s-2007-971957

Ikegawa, S., Funato, K., Tsunoda, N., Kanehisa, H., Fukunaga, T., & Kawakami, Y. (2008). Muscle force per cross-sectional area is inversely related with pennation angle in strength-trained athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research, 22*(1), 128–131. https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31815f2fd3

Kanehisa, H., Muraoka, Y., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (2003). Fascicle arrangements of vastus lateralis and gastrocnemius muscles in highly trained soccer players and swimmers of both genders. *International Journal of Sports Medicine, 24*(2), 90–95. https://doi.org/10.1055/s-2003-38197

Kawakami, Y. (2005). The effects of strength training on muscle architecture in humans. *International Journal of Sport and Health Science, 3*(Special Issue 2), 208–217. https://doi.org/10.5432/ijshs.3.208

Knaus, K. R., Handsfield, G. G., Fiorentino, N. M., Hart, J. M., Meyer, C. H., & Blemker, S. S. (2023). Athlete muscular phenotypes identified and compared with high-dimensional clustering of lower limb muscle volume measurements. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 55*(10), 1913–1922. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003224

Komici, K., Parente, A., Di Trolio, R., Femminella, G. D., Di Lorenzo, C., Rengo, G., & Guerra, G. (2026). Associations of thigh muscle thickness with cardiorespiratory fitness and ventilatory efficiency in male soccer athletes. *Scientific Reports, 16*, 9115. https://doi.org/10.1038/s41598-026-38770-7

Kumagai, K., Abe, T., Brechue, W. F., Ryushi, T., Takano, S., & Mizuno, M. (2000). Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *Journal of Applied Physiology, 88*(3), 811–816. https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.3.811

Lazarczuk, S. L., Hams, A. H., Bellinger, P. M., Timmins, R. G., Lievens, E., Kennedy, B., Opar, D., Barrett, R. S., & Bourne, M. N. (2025). Differences in hamstring muscle-tendon unit geometry and function between elite sprint and jump athletes and recreationally active controls. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 35*(11), e70151. https://doi.org/10.1111/sms.70151

Lee, K.-L., Oh, T.-W., Gil, Y.-C., & Kim, H.-J. (2021). Correlation between muscle architecture and anaerobic power in athletes involved in different sports. *Scientific Reports, 11*, 13332. https://doi.org/10.1038/s41598-021-92831-7

Mangine, G. T., Hoffman, J. R., Gonzalez, A. M., Jajtner, A. R., Scanlon, T., Rogowski, J. P., Wells, A. J., Fragala, M. S., & Stout, J. R. (2014). Bilateral differences in muscle architecture are associated with increased rate of injury in National Basketball Association players. *Journal of Athletic Training, 49*(6), 794–799. https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.3.60

Martin, J. A., Joachim, M. R., Blemker, S. S., Opar, D. A., Mortensen, B., Heiderscheit, B. C., & The HAMIR Study Group. (2026). Lower-body muscle volumes can explain half of the variance in sprint speed between collegiate American football players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 36*(4), e70283. https://doi.org/10.1111/sms.70283

Mersmann, F., Charcharis, G., Bohm, S., & Arampatzis, A. (2017). Muscle and tendon adaptation in adolescence: Elite volleyball athletes compared to untrained boys and girls. *Frontiers in Physiology, 8*, 417. https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00417

Miller, R., Balshaw, T. G., Massey, G. J., Maeo, S., Lanza, M. B., Haug, B., Johnston, M., Allen, S. J., & Folland, J. P. (2022). The muscle morphology of elite female sprint running. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 54*(12), 2138–2148. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002999

Nadzalan, A. M., Mohamad, N. I., Lee, J. L. F., & Chinnasee, C. (2018). Relationship between muscle architecture and badminton-specific physical abilities. *Human Movement, 19*(1), 44–50. https://doi.org/10.5114/hm.2018.73611

Naruse, M., Trappe, S., & Trappe, T. A. (2022). Human skeletal muscle size with ultrasound imaging: A comprehensive review. *Journal of Applied Physiology, 132*(5), 1267–1279. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00041.2022

O'Brien, D. E., Ito, N., Kliethermes, S., & Heiderscheit, B. (2026). The role of lower-limb muscle volumes in vertical jump performance in NCAA Division I athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 58*(6), 1125–1131. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003943

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Panidi, I., Bogdanis, G. C., Donti, A., Gaspari, V., Kanna, D., Terzis, G., & Donti, O. (2025). Maturity-related differences in muscle architecture in growing female volleyball athletes: A cross-sectional study. *Children, 12*(10), 1415. https://doi.org/10.3390/children12101415

Sarto, F., Spörri, J., Fitze, D. P., Quinlan, J. I., Narici, M. V., & Franchi, M. V. (2021). Implementing ultrasound imaging for the assessment of muscle and tendon properties in elite sports: Practical aspects, methodological considerations and future directions. *Sports Medicine, 51*(6), 1151–1170. https://doi.org/10.1007/s40279-021-01436-7

Sugisaki, N., Kobayashi, K., Tsuchie, H., & Kanehisa, H. (2018). Associations between individual lower-limb muscle volumes and 100-m sprint time in male sprinters. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 13*(2), 214–219. https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0703

Tate, C. M., Williams, G. N., Barrance, P. J., & Buchanan, T. S. (2006). Lower extremity muscle morphology in young athletes: An MRI-based analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 38*(1), 122–128. https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000179400.67734.01

Timmins, R. G., Shield, A. J., Williams, M. D., Lorenzen, C., & Opar, D. A. (2016). Architectural adaptations of muscle to training and injury: A narrative review outlining the contributions by fascicle length, pennation angle and muscle thickness. *British Journal of Sports Medicine, 50*(23), 1467–1472. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094881

Xie, T., Crump, K. B., Ni, R., Meyer, C. H., Hart, J. M., Blemker, S. S., & Feng, X. (2020). Quantitative relationships between individual lower-limb muscle volumes and jump and sprint performances of basketball players. *Journal of Strength and Conditioning Research, 34*(3), 623–631. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003421

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) İLE KENTSEL GELİŞİM VE DEĞİŞİM ANALİZİ: GAZİANTEP ÖRNEĞİ

Dr. Öğr. Üyesi Şevket BEDİROĞLU
Gaziantep Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü
ORCID ID: 0000-0002-7216-6910

ÖZET

Kentsel gelişim ve değişim analizi, hızlı nüfus artışı ve göç baskısı yaşayan kentlerde arazi kullanımı planlaması ve sürdürülebilir kentleşme politikalarının oluşturulması açısından büyük önem taşımaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), farklı zamanlara ait mekânsal verilerin bir arada değerlendirilmesine olanak tanıyarak kentsel dokudaki değişimlerin nicel ve nitel olarak ortaya konmasını sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, Gaziantep ili örneğinde, mevcut CBS tabanlı kent atlası verileri ile Google Earth üzerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerini bütünleştiren, pratik ve uygulanabilir bir kentsel değişim analizi yöntemi geliştirmektir. Önerilen yöntemde, farklı zaman dilimlerine ait uydu görüntüleri coğrafi referanslama işleminden geçirilerek görsel yorumlama ve denetimli sınıflandırma teknikleriyle arazi kullanımı/arazi örtüsü sınıflarına (yerleşim, tarım, boş alan, yeşil alan vb.) ayrılmaktadır. Elde edilen sınıflandırma katmanları, kent atlasında yer alan imar planı, parsel ve altyapı verileriyle CBS ortamında çakıştırılarak değişim matrisi oluşturulmakta; bu matris üzerinden kentsel büyüme oranı, büyüme yönü (sektörel analiz) ve yoğunlaşma eğilimleri hesaplanmaktadır. Yöntem, ek saha çalışması veya ücretli uydu görüntüsü gerektirmeden, açık kaynaklı ve serbestçe erişilebilir veriler kullanılarak uygulanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Gaziantep örneğinde yöntemin uygulanmasıyla, kentin gelişim yönünün, yapılaşmış alan artış hızının ve tarım/boş arazi kayıplarının ortaya konması ve elde edilen sonuçların kent atlasına geri beslenerek güncel planlama kararlarına altlık oluşturması hedeflenmektedir. Geliştirilen yöntemin, benzer veri altyapısına sahip diğer orta ölçekli kentlere de kolaylıkla uyarlanabilir olması beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Coğrafi Bilgi Sistemleri, kentsel değişim analizi, uzaktan algılama, kent atlası, Gaziantep

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) BASED ANALYSIS OF URBAN DEVELOPMENT AND CHANGE: THE CASE OF GAZİANTEP

ABSTRACT

Urban development and change analysis is of great importance for land-use planning and the formulation of sustainable urbanization policies in cities experiencing rapid population growth and migration pressure. Geographic Information Systems (GIS) enable the joint evaluation of spatial data from different time periods, allowing changes in the urban fabric to be revealed both quantitatively and qualitatively. The aim of this study is to develop a practical and applicable urban change analysis method for the case of Gaziantep province, integrating existing GIS-based city atlas data with high-resolution satellite imagery obtained from Google Earth. In the proposed method, satellite images from different time periods are georeferenced and classified into land use/land cover classes (settlement, agriculture, vacant land, green space, etc.) using visual interpretation and supervised classification techniques. The resulting classification layers are overlaid in a GIS environment with the zoning plan, parcel, and

infrastructure data available in the city atlas to generate a from-to change detection matrix; from this matrix, the urban growth rate, growth direction (sectoral analysis), and densification tendencies are calculated. The method is designed to be applicable using open-source and freely accessible data, without requiring additional field surveys or commercial satellite imagery. By applying the method to Gaziantep, the study aims to reveal the direction of urban development, the rate of built-up area increase, and the loss of agricultural/vacant land, and to feed these results back into the city atlas as a basis for current planning decisions. The developed method is expected to be readily adaptable to other medium-sized cities with similar data infrastructure.
Keywords: Geographic Information Systems, urban change analysis, remote sensing, city atlas, Gaziantep

1. GİRİŞ

Hızlı kentleşme, 21. yüzyılın en önemli küresel dönüşümlerinden biri haline gelmiştir. Nüfus artışı ve göçle tetiklenen kentsel büyüme, doğal kaynaklar üzerinde baskı oluşturmakta ve yerel iklim koşullarını değiştirmektedir (Khawaldah, 2024; Rahman, 2016). Bu dinamiklerin anlaşılması ve yönetilmesi için uydu görüntüleri ve CBS teknikleri, geniş alanların zaman serili olarak izlenmesine olanak tanıyan maliyet etkin ve güvenilir yöntemler sunmaktadır. Literatür, kentsel alanların fiziksel sınırlarının genişlemesinin yanı sıra, bu genişlemenin çevresel sürdürülebilirlik, hava kalitesi ve termal çevre üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır (Sundarakumar, vd., 2019; Mohammady ve Delavar, 2016).

Kentsel gelişim analizlerinde en yaygın kullanılan veri kaynağı Landsat serisidir. Çok zamanlı Landsat TM, ETM+ ve OLI görüntüleri, 30 metrelik uzamsal çözünürlükleri ve on yıllara yayılan arşivleri sayesinde kentsel yayılmanın uzun vadeli izlenmesinde temel oluşturmaktadır (Sundarakumar, vd., 2019; Abdeljawad, 2018). Sentinel-2 misyonu ise 10 metrelik daha yüksek çözünürlüğü ile kentsel detayların ve bitki örtüsü değişimlerinin daha hassas bir şekilde haritalanmasına imkan tanımaktadır (Mushore vd., 2022, Tempa, 2023) Gece ışığı verileri (DMSP/OLS ve NPP-VIIRS), kentsel ayak izinin çıkarılması ve ekonomik aktivitenin mekânsal dağılımının analizi için alternatif bir perspektif sunmaktadır (Xu vd., 2020). LULC sınıflandırması için geleneksel yöntemlerin yerini giderek makine öğrenimi algoritmaları almaktadır. Random Forest (RF) algoritması, yüksek sınıflandırma doğruluğu ve karmaşık veri setlerini işleme yeteneği nedeniyle en popüler tercihlerden biridir
(Biswas vd., 2024, Adeyemi, 2015).

Kentsel yayılmanın karmaşıklığını ve homojenliğini ölçmek için Shannon Entropi indeksi yaygın bir gösterge olarak kullanılmaktadır (Rahman, 2016). Gelecekteki büyüme senaryolarını tahmin etmek için ise Hücresel Otomat tabanlı Markov modelleri (Ca-Markov) ve hibrit yaklaşımlar tercih edilmektedir (Khawaldah, 2016; Sajan vd., 2016). Google Earth Engine (GEE) platformu, büyük veri setlerinin bulut tabanlı işlenmesi sayesinde analiz sürelerini önemli ölçüde kısaltmaktadır (Patel vd., 2025; Ding, 2025).

Literatürdeki çalışmalar, kentsel alanlarda muazzam bir büyüme olduğunu tutarlı bir şekilde rapor etmektedir. Örneğin, Hindistan'ın Thoothukudi şehrinde yapılı alanların 2010-2024 yılları arasında %283,5 oranında arttığı gözlemlenmiştir (Soundranayagam vd., 2025). Benzer şekilde, Vijayawada'da kentsel alanlar 36 yıllık bir süreçte %372,28 artış göstermiştir (Sundarakumar vd., 2022). Amman'da 1984-2014 yılları arasındaki kentsel genişleme %147 olarak kaydedilmiştir. Bu kentsel büyüme genellikle doğal peyzaj alanları pahasına gerçekleşmektedir: Chattogram'da tarım alanları azalırken düzensiz yapılaşma hızlanmıştır

(Biswas vd., 2024). Bhubaneswar'da kentsel alanlar %31,58 artarken, bitki örtüsü ve orman alanları yaklaşık %30 oranında azalmıştır.

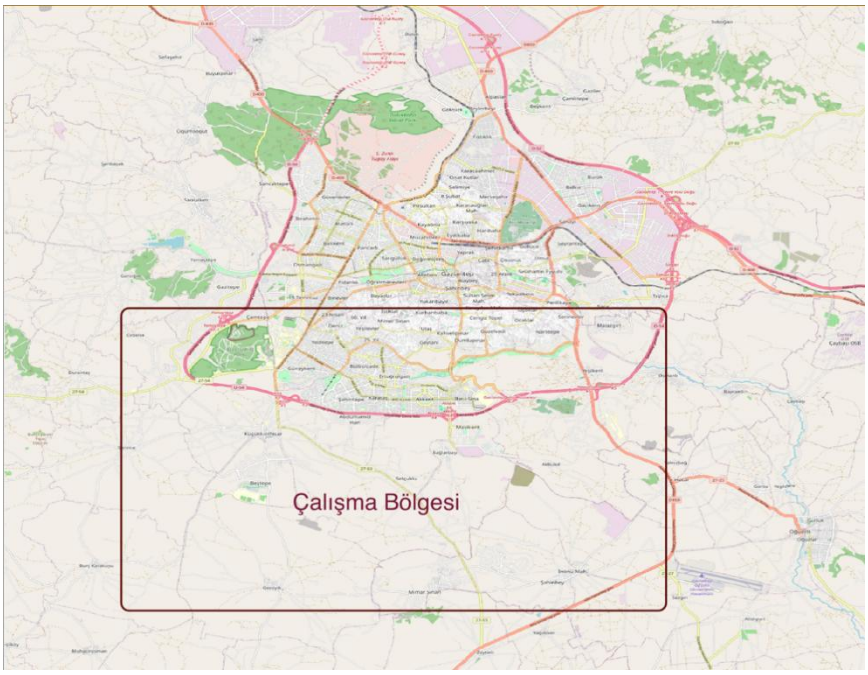
Uydu tabanlı izleme yöntemlerinin bazı sınırlamaları bulunmaktadır: Uzamsal Çözünürlük: Özellikle eski Landsat misyonlarının (TM, MSS) çözünürlüğü, karmaşık kentsel morfolojilerin ayrıntılı analizinde yetersiz kalabilmektedir (Lo, 2000). Veri Kalitesi: Bulut örtüsü, uydu sensörlerinin optik veriler elde etmesini engelleyebilmekte ve bu da zaman serisi analizlerinde boşluklara yol açabilmektedir. Metodolojik Farklılıklar: Farklı sınıflandırma algoritmaları ve doğruluk değerlendirme yaklaşımları, sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını zorlaştırabilmektedir. Örneğin, aynı bölge için farklı sınıflandırıcılar farklı artış oranları (bir çalışmada %4, diğerinde %32) üretebilmektedir (Adeyemi, 2015) Mevcut literatürdeki bazı eksiklikler ve gelecekteki araştırma olanakları şunlardır: Yüksek Çözünürlüklü Termal Haritalama: Kentsel ısı azaltma stratejileri için daha yüksek çözünürlüklü LST verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Random Forest tabanlı ölçek küçültme (downscaling) bu alanda gelecek vaat eden bir yöndür (Ardianto, vd., 2025)

2. MATERYAL VE METODLAR

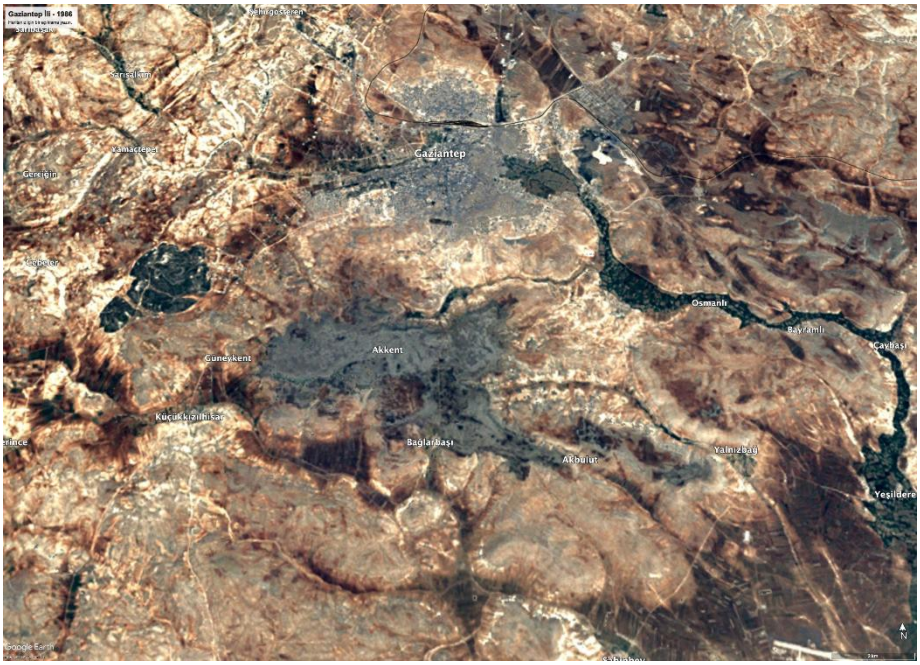
2.1. Veri toplama, hazırlık ve analiz

Bu çalışmada Gaziantep iline ait 1985, 2020 ve 2026 yıllarının uydu görüntüleri Google Earth Pro programı ile kayedilmiş ve daha sonra Arcgis programında georeferanslandırılmıştır. Çalışmanın ikincil veri seti 2023 yılına ait CBS formatındaki kent atlası verisi olmuştur. Çalışmada 3 farklı zaman dilimine ait uydu görüntüleri Unsupervised (Eğitimsiz) Görüntü işleme yöntemi ile Arcgis programında otomatik sınıflandırılmıştır.

2.2. Çalışma Bölgesi



Şekil 1: Gaziantep ili içerisindeki çalışma bölgesi sınırları



Şekil 2. Çalışma bölgesi 1985 uydu görüntüsü



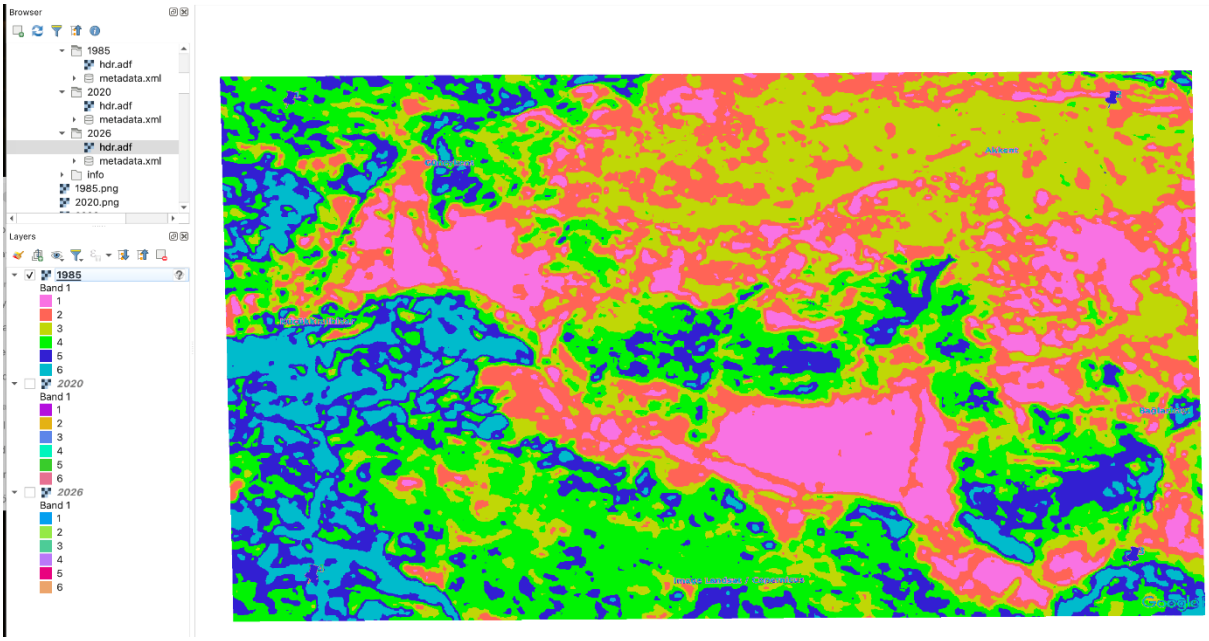
Şekil 3. Çalışma bölgesi 2020 uydu görüntüsü



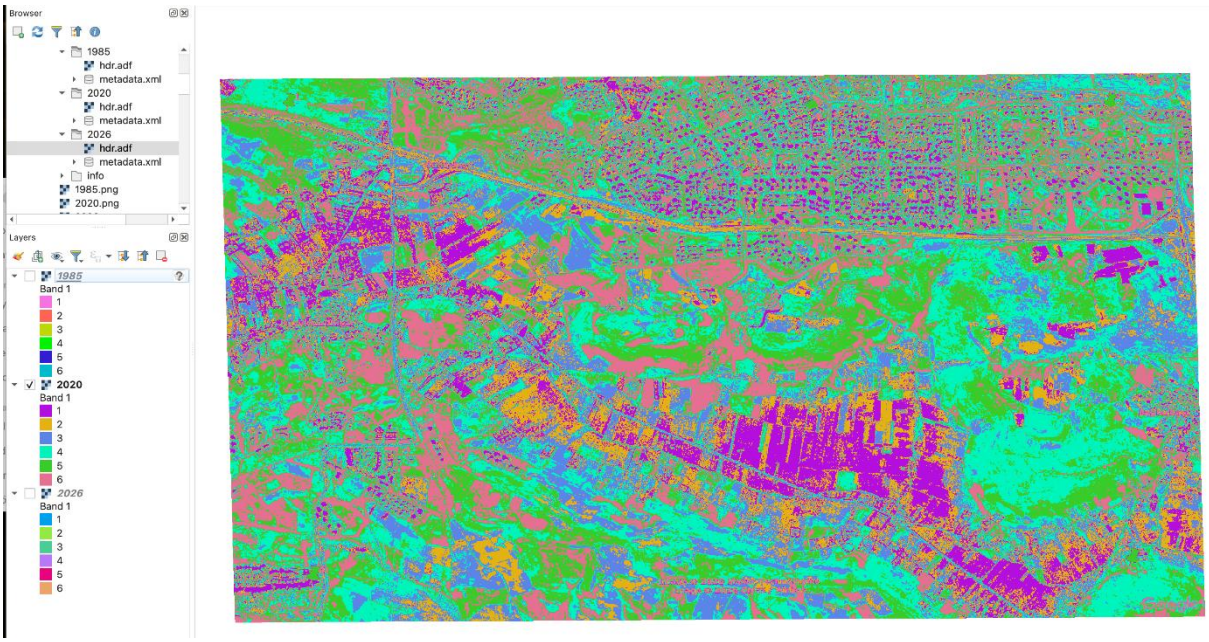
Şekil 4. Çalışma bölgesi 2026 uydu görüntüsü

2.3. Eğitimsiz (Unsupervised) Sınıflandırma ile Uydu Görüntlerinin Sınıflandırılması

Çalışmada 1985, 2020 ve 2026 yıllarına ait uydu görüntülerinin aynı çalışma alanı içerisinde sınıflandırılması, Gaziantep'teki mekânsal değişimin farklı dönemler üzerinden karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte değerlendirildiğinde, üç dönemde de arazi örtüsünün tekdüze bir yapı göstermediği; yerleşim dokusu, açık alanlar, tarımsal alanlar ve diğer yüzey özelliklerinin farklı mekânsal örüntüler oluşturduğu görülmektedir. Özellikle 2020 ve 2026 sınıflandırmalarında kentsel dokuya ilişkin mekânsal ayrışmanın daha belirgin hale geldiği, çalışma alanının farklı bölümlerinde yüzey özelliklerinin daha parçalı bir yapı sergilediği görsel olarak izlenebilmektedir.

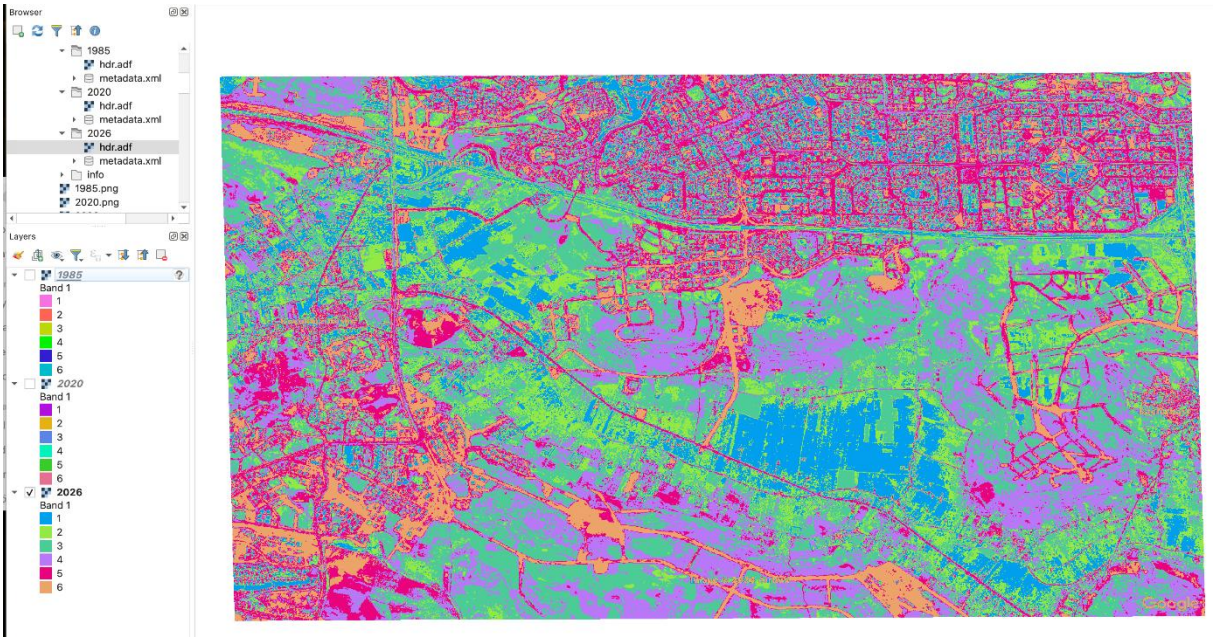


Şekil 5. 1985 yılı arazi örtüsü sınıflandırması



Şekil 6. 2020 yılı arazi örtüsü sınıflandırması

1985 yılı sınıflandırması, çalışma alanının daha düşük kentsel yoğunluk ve daha geniş süreklilik gösteren açık/yeşil yüzeylerle karakterize edildiği erken dönem mekânsal yapıyı ortaya koymaktadır. 2020 yılı görüntüsünde ise kentsel dokunun ve buna bağlı yüzey farklılaşmalarının daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. 2026 yılı sınıflandırmasında mevcut kentsel dokunun daha da karmaşıklaştığı ve farklı arazi örtüsü sınıflarının birbirleriyle daha fazla iç içe geçtiği gözlenmektedir. Bu görsel değerlendirme, kentleşme sürecinin yalnızca merkezdeki yapılaşma artışıyla sınırlı olmadığını, aynı zamanda kent çeperindeki arazi örtüsü örüntüsünü de dönüştürdüğünü düşündürmektedir.



Şekil 7. 2026 yılı arazi örtüsü sınıflandırması

Üç zaman diliminin karşılaştırılması, Gaziantep çalışma alanında kentsel gelişimin zamansal olarak süreklilik gösteren bir dönüşüm niteliğinde olduğunu ortaya koymaktadır. 1985'ten 2020'ye ve 2020'den 2026'ya doğru gidildikçe sınıflandırılmış yüzeylerin mekânsal çeşitliliği ve parçalanma düzeyi artmaktadır. Bu durum, kentsel alanın yalnızca mevcut dokunun yoğunlaşması yoluyla değil, aynı zamanda çevresindeki açık alanlarla kurduğu ilişkinin değişmesi yoluyla da büyüdüğünü göstermektedir. Dolayısıyla kentsel gelişim, merkez-çeper ilişkisi bakımından değerlendirildiğinde, zaman içerisinde daha geniş ve karmaşık bir mekânsal organizasyona dönüşmektedir.

Mevcut bulgular öncelikle görsel ve nitel bir değişim değerlendirmesi olarak ele alınmalıdır. Çalışmanın ilerleyen aşamasında her sınıfın hektar veya kilometrekare cinsinden alanının hesaplanması ve 1985–2020, 2020–2026 ve 1985–2026 dönemleri için "from-to" değişim matrislerinin oluşturulması, kentsel büyümenin nicel boyutunu açık biçimde ortaya koyacaktır.

3. BULGU ve İRDELEMELER

Elde edilen mekânsal gözlemler, çok zamanlı uydu görüntülerinin kentsel yayılma ve arazi örtüsü değişimini izlemek için kullanılabileceğini gösteren önceki çalışmalarla yöntemsel olarak örtüşmektedir. Çok zamanlı Landsat verilerinin uzun dönemli kentsel değişimin izlenmesinde kullanılması (Lo, 2000; Sundarakumar vd., 2012), kentsel yayılmanın arazi örtüsü değişimleriyle birlikte değerlendirilmesi (Mohammady ve Delavar, 2016; Rahman, 2016) ve GIS tabanlı değişim analizlerinin kullanılması (Khawaldah, 2016) mevcut çalışmanın yaklaşımını desteklemektedir. Daha yeni çalışmalarda Google Earth Engine, makine öğrenmesi ve yüksek çözünürlüklü verilerin kullanılmasıyla benzer analizlerin daha otomatik ve ayrıntılı biçimde gerçekleştirildiği görülmektedir (Patel vd., 2024; Tempa, 2023; Biswas vd., 2024).

Bu çalışmanın söz konusu araştırmalardan ayrılan temel yönü, yüksek düzeyde otomatikleştirilmiş bir makine öğrenmesi yaklaşımı yerine Google Earth Pro üzerinden elde edilen görüntülerin ArcGIS ortamında işlenmesi ve eğitimsiz sınıflandırma yönteminin kullanılmasıdır. Bu yaklaşım, veri ve yazılım olanakları sınırlı araştırma ortamlarında

uygulanabilirlik açısından avantaj sağlayabilir. Bununla birlikte eğitimsiz sınıflandırmada oluşturulan sınıfların gerçek arazi örtüsü türleriyle eşleştirilmesi ve sınıflandırma doğruluğunun bağımsız doğrulama verileriyle test edilmesi önemlidir.

3.1. CBS tabanlı planlama açısından irdeleme

Çalışmada 2023 yılı kent atlası verisinin ikincil veri seti olarak kullanılması, uydu görüntülerinden elde edilen zamansal değişim bilgisinin mevcut planlama ve mekânsal veri altyapısıyla ilişkilendirilmesi açısından önemlidir. Uydu sınıflandırmaları ile imar planı, parsel ve altyapı verilerinin çakıştırılması; hangi bölgelerde planlı gelişme ile fiili arazi örtüsü değişiminin örtüştüğünün, hangi bölgelerde ise farklılaştığının incelenmesine olanak sağlayabilir. Böyle bir entegrasyon, yalnızca geçmişte meydana gelen değişimin belirlenmesi için değil, gelecekteki gelişme alanlarının izlenmesi ve plan kararlarının güncellenmesi için de kullanılabilecek bir CBS tabanlı izleme mekanizmasının temelini oluşturabilir.

Bulguların planlama açısından bir diğer önemi, kentsel gelişimin çevresindeki açık ve doğal yüzeylerle olan ilişkisini görünür hale getirmesidir. Literatürde kentsel yayılmanın arazi örtüsü değişimi, yüzey sıcaklığı ve kentsel ısı adası etkisiyle ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Aslan ve Koc-San, 2016; Yao vd., 2020; Duan vd., 2025). Bu nedenle Gaziantep için oluşturulacak daha ileri bir analizde arazi örtüsü değişiminin yanı sıra NDVI, NDBI ve yüzey sıcaklığı gibi göstergelerin aynı CBS ortamında birlikte değerlendirilmesi, kentsel büyümenin çevresel etkilerinin daha kapsamlı biçimde ortaya konmasını sağlayabilir.

3.2. Yöntemin sınırlılıkları ve geliştirme olanakları

Çalışmanın en önemli sınırlılığı, kullanılan görüntülerin farklı yıllara ait olması ve eğitimsiz sınıflandırma sonucunda elde edilen sınıfların doğrudan arazi örtüsü sınıflarıyla eşleştirilmesinin doğruluk analiziyle desteklenmemiş olmasıdır. Ayrıca Google Earth üzerinden elde edilen görüntülerin sensör, tarih, atmosferik koşullar ve görüntü işleme özelliklerinin dönemler arasında aynı olmaması, doğrudan zamansal karşılaştırmalarda dikkat edilmesi gereken bir husustur. Bu nedenle sonraki aşamada mümkün olduğunca aynı mevsime ait ve benzer özelliklerde görüntülerin kullanılması; sınıflandırma sonuçlarının yüksek çözünürlüklü referans verileriyle doğrulanması ve sınıf alanlarının sayısal olarak hesaplanması önerilmektedir.

4. SONUÇLAR

Uydu görüntüleri ve CBS teknolojileri, kentsel gelişim ve arazi kullanımı değişimlerinin izlenmesinde vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir. İncelenen literatür, kontrolsüz kentsel yayılmanın doğal ekosistemleri tahrip ettiğini ve kentsel ısı adası etkisini artırarak şehirlerin termal konforunu olumsuz etkilediğini kesin bir şekilde ortaya koymaktadır. Landsat ve Sentinel verilerinin makine öğrenimi algoritmalarıyla analizi, şehir plancıları için eyleme geçirilebilir bilgiler sunmaktadır. Sürdürülebilir bir gelecek için, kentsel büyümenin ekolojik koruma ile dengelenmesi ve kentsel ısı etkilerini azaltmaya yönelik yeşil altyapı stratejilerinin benimsenmesi kritik öneme sahiptir. Sonraki çalışmalarda ayrıca değişim matrisi, kentsel büyüme oranı ve yönsel/sektörel büyüme analizlerinin hesaplanması; Shannon Entropi gibi yayılma göstergelerinin kullanılması ve gerekirse CA-Markov benzeri modellerle geleceğe yönelik senaryoların oluşturulması mümkündür (Rahman, 2016; Soundranayagam vd., 2025; Sajan vd., 2022). Böylece mevcut çalışma, görsel değişim tespitinden ölçülebilir kentsel büyüme analizine ve senaryo üretimine doğru geliştirilebilir.

REFERANSLAR

N. S. M. Abdeljawad, V. Adedokun, and I. Nagy, "Managing, assessing and monitoring urban sprawl using remote sensing; change detection, urban expansion intensity index (ueii), and shannon entropy: a case study of amman city, jordan (1990–2022)," Xinan Jiaotong Daxue Xuebao, vol. 57, no. 6, pp. 413–429, Dec. 2022, doi: 10.35741/issn.0258-2724.57.6.39.

A. A. Adeyemi, "Analysis of impervious surfaces and surface temperature over Tshwane metropolitan using in-situ and remotely sensed data," Sept. 2015.

R. R. Andriambololonaharisoamalala et al., "Enhanced Downscaling of Urban Land Surface Temperatures Using a Land Cover–Enhanced Nonlinear Model with Landsat-8/9 and Sentinel-2 Imagery," Annals of the American Association of Geographers, pp. 1–21, Nov. 2025, doi: 10.1080/24694452.2025.2574331.

N. Ardianto, A. Afandhi, and A. B. Sambah, "High-Resolution Thermal Mapping for Urban Heat Mitigation: Random Forest Downscaling in a Rapid Urbanization Context (Case Study Malang City, Indonesia)," JPPIPA (Jurnal Penelitian Pendidikan IPA), Dec. 2025, doi: 10.29303/jppipa.v11i12.13393.

N. Aslan and D. Koc-San, "Analysis of relationship between urban heat island effect and land use/cover type using landsat 7 etm+ and landsat 8 oli images", doi: 10.5194/isprsarchives-xli-b8-821-2016.

J. Biswas, Md. A. Jobaer, S. F. Haque, Md. S. I. Shozib, and Z. A. Limon, "Mapping and monitoring land use land cover dynamics employing Google Earth Engine and machine learning algorithms on Chattogram, Bangladesh," June 2024, doi: 10.60692/48ty0-6s144.

Z. Chen et al., "Mapping Global Urban Areas From 2000 to 2012 Using Time-Series Nighttime Light Data and MODIS Products," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 12, no. 4, pp. 1143–1153, Mar. 2019, doi: 10.1109/JSTARS.2019.2900457.

J. T. Dadole, K. S. Companion, E. E. Albiento, and R. Masalig, "Multitemporal Analysis of Urban Heat Island Dynamics in Response to Land Use/Land Cover (LULC) Changes in Bukidnon Province, Philippines (2017–2024)," Apr. 2025, doi: 10.20944/preprints202502.1170.v2.

Z. Ding, "Explore the application of remote sensing in the dynamic monitoring of urban heat island effect," Highlights in Science Engineering and Technology, vol. 147, pp. 247–252, July 2025, doi: 10.54097/rzat8x07.

X. Duan et al., "A geospatial and statistical analysis of land surface temperature in response to land use land cover changes and urban heat island dynamics," Dental science reports, vol. 15, Feb. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-89167-x.

E. Głowienka and Z. Micek, "Multitemporal assessment of Krakow's urban microclimate (2002–2023) using satellite-derived land surface temperature, NDVI, and NDBI," Geomatics, Landmanagement and Landscape, Dec. 2025, doi: 10.15576/gll/211223.

X. He, C. Zhou, J. Zhang, and X. Yuan, "Using Wavelet Transforms to Fuse Nighttime Light Data and POI Big Data to Extract Urban Built-Up Areas," Remote Sensing, vol. 12, no. 23, p. 3887, Nov. 2020, doi: 10.3390/RS12233887.

H. Khawaldah, "A Prediction of Future Land Use/Land Cover in Amman Area Using GIS-Based Markov Model and Remote Sensing," Journal of Geographic Information System, vol. 8, no. 3, pp. 412–427, May 2016, doi: 10.4236/JGIS.2016.83035.

C.-P. Lo, "Mapping atlanta's land use/cover change and its impact on the environment using time sequential landsat images," Jan. 2000.

S. Mohammady and M. R. Delavar, "Urban sprawl assessment and modeling using landsat images and GIS," Modeling Earth Systems and Environment, vol. 2, no. 3, p. 155, Aug. 2016, doi: 10.1007/S40808-016-0209-4.

T. D. Mushore, J. Odindi, and O. Mutanga, "'Cool' Roofs as a Heat-Mitigation Measure in Urban Heat Islands: A Comparative Analysis Using Sentinel 2 and Landsat Data," Remote sensing, vol. 14, no. 17, pp. 4247–4247, Aug. 2022, doi: 10.3390/rs14174247.

A. R. Patel, D. Vyas, N. Chaudhari, R. Patel, K. Patel, and D. Mehta, "Novel approach for the LULC change detection using GIS & Google Earth Engine through spatiotemporal analysis to evaluate the

urbanization growth of Ahmedabad city," Results in engineering, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101788.

M. T. Rahman, "Detection of Land Use/Land Cover Changes and Urban Sprawl in Al-Khobar, Saudi Arabia: An Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Data," ISPRS international journal of geo-information, vol. 5, no. 2, p. 15, Feb. 2016, doi: 10.3390/IJGI5020015.

B. Sajan, V. N. Mishra, S. Kanga, G. Meraj, S. K. Singh, and P. Kumar, "Cellular Automata-Based Artificial Neural Network Model for Assessing Past, Present, and Future Land Use/Land Cover Dynamics," Agronomy, vol. 12, no. 11, pp. 2772–2772, Nov. 2022, doi: 10.3390/agronomy12112772.

J. P. Soundranayagam, N. Sidhu, S. Sharma, V. S. Pitchaimani, A. A. A. Promilton, and L. Kaur, "Quantifying spatiotemporal land use land cover change and urban expansion using geospatial modelling and shannon's entropy in a coastal city of India," vol. 2, no. 1, Oct. 2025, doi: 10.1007/s44290-025-00341-6.

I. M. Soufiane, R. D. Djaouad, B. Farah, and S. Djamel, "Spatiotemporal Impact of Urbanization on Urban Heat Island Using Landsat Imagery in Oran, Algeria: 1984–2024," Urban science, vol. 9, no. 4, pp. 95–95, Mar. 2025, doi: 10.3390/urbansci9040095.

K. Sundarakumar, M. Harika, A. Begum, S. Yamini, and K. Balakrishna, "Land use and land cover change detection and urban sprawl analysis of vijayawada city using multitemporal landsat data," Jan. 2012, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Sundarakumar-Kusuma/publication/293821516_Land_use_and_land_cover_change_detection_and_urban_sprawl_analysis_of_Vijayawada_city_using_multi-temporal_Landsat_data/links/56bc475d08ae47fa3956ce7a/Land-use-and-land-cover-change-detection-and-urban-sprawl-analysis-of-Vijayawada-city-using-multi-temporal-Landsat-data.pdf

K. Tempa, "Spatiotemporal Land Use Land Cover Mapping with Sentinel-2 Using a Semi-Automatic Random Forest Classifier and Assessment of Vegetation Change Dynamics for Gelephu, Bhutan," Jan. 2023, doi: 10.2139/ssrn.4551325.

D. V. Thong et al., "Analysis of urban heat islands combining Sentinel 2 and Landsat 8 satellite images in Hochiminh city," IOP conference series, vol. 1349, no. 1, pp. 012032–012032, May 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1349/1/012032.

Z. Wang, S. Cao, M. Du, W. Song, and J. Quan, "Local Climate Zone Classification by Seasonal and Diurnal Satellite Observations: An Integration of Daytime Thermal Infrared Multispectral Imageries and High-Resolution Night-Time Light Data," Remote sensing, vol. 15, no. 10, pp. 2599–2599, May 2023, doi: 10.3390/rs15102599.

P. Xu, P. Jin, and Q. Cheng, "Monitoring Regional Urban Dynamics Using DMSP/OLS Nighttime Light Data in Zhejiang Province," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, pp. 1–10, May 2020, doi: 10.1155/2020/9652808.

Y. Yao, C. Chang, F. Ndayisaba, and S. Wang, "A New Approach for Surface Urban Heat Island Monitoring Based on Machine Learning Algorithm and Spatiotemporal Fusion Model," IEEE Access, vol. 8, pp. 164268–164281, Sept. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022047.

Y. Zheng, K. Yang, H. Lin, and W. Zhao, "Evolution of Urban Spatial Morphology and Its Driving Mechanisms in Fujian Province Based on Multi-Source Nighttime Light Remote Sensing," Remote sensing, Jan. 2026, doi: 10.3390/rs18020331.

ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLER İÇİN YAPAY ZEKÂ TABANLI SANAL İKİZ MODELLERİYLE ÇEVRİM DIŞI OPTİMİZASYON

Ulviyya ALİYEVA
Gazi University, Institute of Informatics, Department of Information Systems, Ankara, Turkey
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-7469-0468
Prof. Dr. Murat YÜCEL
Gazi University, Faculty of Technology, Ankara, Turkey
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0349-4013

ÖZET

Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler (EDFA), modern dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) tabanlı optik haberleşme omurgalarında optik kayıpları doğrudan optik alanda telafi eden en temel aktif bileşenlerdir. Bununla birlikte, EDFA'ların kazanç profili giriş sinyal gücüne, dalga boyuna ve pompa lazeri akımına bağlı olarak yüksek oranda doğrusal olmayan dinamikler sergilemekte; doyum etkisi ve Yükseltilmiş Kendiliğinden Emisyon (ASE) gürültüsü spektral homojenliği bozmaktadır. Aktif iletim hatlarında optimal çalışma noktalarının belirlenmesi amacıyla fiziksel donanım üzerinde yapılan deneme-yanılma süreçleri hem kesinti riski yaratmakta hem de optik bileşenlerin aşınmasına ve yüksek işletme maliyetlerine yol açmaktadır. Bu çalışmada, tam otomatik bir laboratuvar test düzeneğinden elde edilen deneysel verilerle beslenen, fiziğe duyarlı (physics-informed) öznitelik mühendisliğiyle zenginleştirilmiş ve LightGBM regresyon algoritması üzerine kurulu yüksek doğruluklu bir EDFA Sanal İkiz (Digital Twin) modeli geliştirilmiştir. 1525 – 1570 nm bandında 501 ayrık dalga boyu noktasını kapsayan spektral ölçümler, nokta-bazlı (pointwise) veri mimarisine dönüştürülmüş ve model 2500 iterasyonla optimize edilmiştir. Geliştirilen sanal ikiz, milisaniyeler mertebesinde spektral güç kestirimi gerçekleştirerek tepe gücü (P_{peak}), kazanç (G) ve ASE tabanını R^2 ≈0.99 doğrulukla simüle etmiştir. Elde edilen sanal ortam, canlı hatta müdahale gerektirmeyen sıfır riskli bir çevrim dışı analiz ve Pekiştirmeli Öğrenme (RL) optimizasyon platformu sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (EDFA), Sanal İkiz (Digital Twin), LightGBM, Spektral Güç Simülasyonu, Çevrim Dışı Optimizasyon, Makine Öğrenmesi.

OFFLINE OPTIMIZATION WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED DIGITAL TWIN MODELS FOR ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIERS

ABSTRACT

Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFAs) represent indispensable active components that compensate for transmission attenuation directly in the optical domain within modern Wavelength Division Multiplexing (WDM) communication backbones. However, EDFA gain profiles exhibit highly nonlinear dynamics governed by input signal power, operating wavelength, and pump laser current, with gain saturation and Amplified Spontaneous Emission (ASE) noise significantly degrading spectral flatness. Dynamic tuning of operational parameters on physical hardware introduces risks of transmission outages, hardware wear, and high operational costs. In this research, a high-fidelity EDFA Digital Twin framework, driven by empirical data from an automated optoelectronic laboratory testbed and empowered by physics-informed feature engineering, is established using an optimized LightGBM regression engine. Spectral measurements at 501 discrete wavelengths within the 1525–1570 nm window

were mapped into a pointwise tabular structure and trained on 2500 estimators. The proposed digital twin synthesizes full optical spectrum responses with millisecond latency, accurately modeling peak power (P_{peak}), net optical gain (G), and ASE profiles with an $R^2 \approx accuracy\ of$ 0.99. This virtual surrogate provides a risk-free offline optimization testbed suitable for Reinforcement Learning (RL) agent deployment without physical network interruptions.
Keywords: Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA), Digital Twin, LightGBM, Spectral Power Simulation, Offline Optimization, Machine Learning.

1. GİRİŞ

Optik haberleşme omurgalarında artan veri trafiği, iletim kanallarının kararlılığını ve sinyal kalitesini doğrudan optik yükselteçlerin performansına bağımlı hale getirmiştir. Fiber optik hat boyunca ilerleyen optik darbeler; saçılma, soğurma ve bükülme gibi nedenlerle zayıflamakta; bu kayıplar elektro-optik dönüşüme ihtiyaç kalmadan Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler (EDFA) ile telafi edilmektedir (Agrawal, 2012; Desurvire, 2002).
EDFA'lar, optik haberleşmenin C-Bandı (1530 – 1565 nm) bölgesinde geniş spektrumlu kazanç sunar. Sistem temel olarak silika çekirdeğe katkılanmış Er^{+3} iyonlarının 980 nm veya 1480 nm pompa lazerleriyle uyarılması ve uyarılmış ışıma ile sinyalin yükseltilmesi prensibine dayanır (Becker vd., 1999). Ancak bu süreç kuantum seviyesinde iki temel kısıt doğurur:

1. **Kazanç Doyumu (Gain Saturation):** Giriş sinyal gücü arttıkça üst enerji seviyesindeki iyon popülasyonu hızla temel seviyeye döner; bu durum kazançta doyum eğrisine ve logaritmik düşüşe yol açar.
2. **Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayılma (ASE):** Üst seviyedeki iyonların spontane olarak temel düzeye dönmesi geniş bantlı bir gürültü tabanı üretir ve 1530 nm civarında tepe yapan istenmeyen bir gürültü profili oluşturur (Giles & Desurvire, 1991).

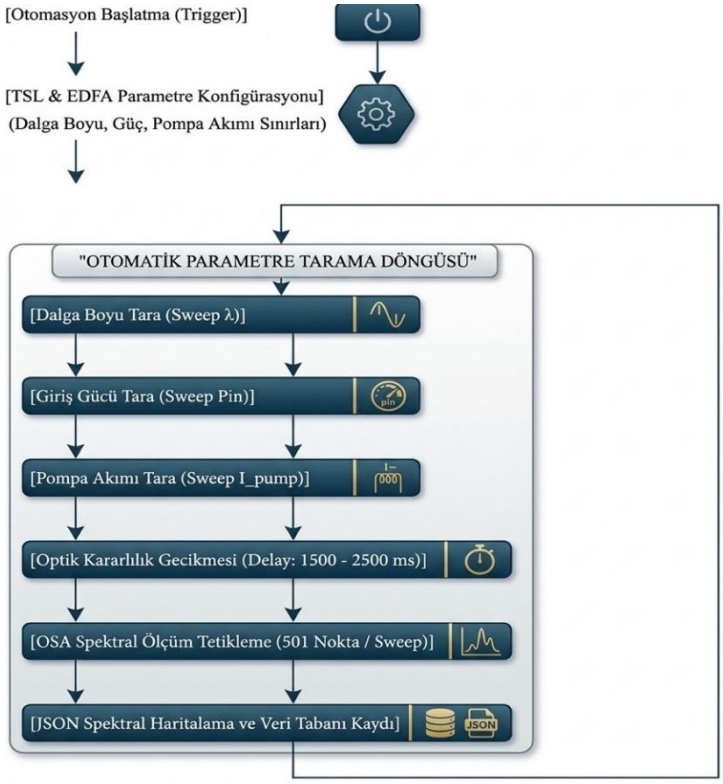
Dinamik optik ağlarda kanal ekleme/çıkarma durumlarında veya sinyal dalgalanmalarında pompa lazer akımının anlık olarak ayarlanması gerekir. Bu ayarlamayı canlı hatta deneme-yanılma yoluyla yapmak, iletimde paket kayıplarına yol açabileceği gibi lazer diyotlarının aşırı akımla zorlanmasına da sebep olabilir. Analitik diferansiyel denklem çözücülerine dayalı klasik fizik modelleri, gerçek zamanlı optimizasyon için yeterli hesaplama hızına sahip değildir (Huang vd., 2020).

Bu çalışma, fiziksel laboratuvarda kurulan tam otomatik ölçüm altyapısından alınan deneysel verileri temel alarak, EDFA'nın tüm spektral tepkisini milisaniyeler mertebesinde sentezleyen hafif ve yüksek hassasiyetli bir Sanal İkiz (Digital Twin) modeli geliştirmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen LightGBM tabanlı altyapı, çevrim dışı kontrolcüler ve Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning) ajanları için risksiz bir test ortamı sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Otomatik Laboratuvar Test Düzeneği ve Veri Toplama Akışı

Sanal ikizin gerçeği yansıtması, laboratuvar ölçümlerinin doğruluğuna dayanmaktadır. Bu amaçla Şekil 1'de gösterilen otomatik kontrol ve veri toplama protokolü kurulmuştur.



Şekil 1. *Otomatik EDFA karakterizasyonu ve veri toplama mimarisi.*

Deneysel düzenek üç ana bileşenden oluşmaktadır:

1. **Ayarlanabilir Lazer Kaynağı (TSL):** C-Bandında $\pm$0.001 nm dalga boyu kararlılığıyla test sinyallerini üretir.
2. **EDFA Modülü (CSDFA):** 980 nm pompa lazeri, WDM kuplörler ve Erbiyum katkılı fiber içeren ana yükselteç ünitesidir. Pompa akımı harici dijital devre üzerinden hassas mA adımlarıyla sürülür.
3. **Optik Spektrum Analizörü (OSA):** Çıkış sinyalini 1525 - 1570 nm aralığında 501 ayrık dalga boyu noktasında dijitalleştirerek kaydeder.

Ölçümlerde optik kararlılığı garanti altına almak için her akım ve dalga boyu değişiminden sonra 1500 - 2500 ms termal denge gecikmesi uygulanmış; elde edilen spektral eğriler JSON formatında kaydedilmiştir.

2.2. Veri Ön İşleme ve Fiziğe Dayalı Öznitelik Mühendisliği

Toplanan spektrumlar, makine öğrenmesi modelinin her bir spektral dalga boyunu bağımsız olarak öğrenebilmesi amacıyla nokta bazlı bir formata dönüştürülmüştür. Her bir fiziksel ölçüm 501 satıra açılarak hedef değişken ilgili dalga boyundaki çıkış gücü ($Pout$) olarak belirlenmiştir.

Lazer fiziğinin temel kurallarını modele aktarmak için ham parametrelerin yanına dört temel öznitelik türetilmiştir:

1. **Spektral Mesafe ($\Delta\lambda$):** Ölçülen dalga boyu ile sinyal dalga boyu arasındaki fark:

$$\Delta\lambda = |\lambda_{measured} - \lambda_{TSL}|$$

2. **ASE Tepe Noktası Uzaklığı (ASE_{dist}):** Erbiyum iyonlarının 1530.0 nm ışıma tepe noktasına olan mesafesi:

$$ASE_{dist} = |\lambda_{measured} - 1530.0\ nm|$$

3. **Güç-Akım Etkileşim Terimi ($Inter_{P,I}$):**

$$Inter_{P,I} = P_{in}(dBm)\ x\ I_{pump}(A)$$

4. **Doğrusal Güç Dönüşümü (P_{mW}):** Logaritmik gücün foton yoğunluğunu temsil eden doğrusal karşılığı:

$$P_{mW} = 10^{\frac{P_{in}}{10}}$$

2.3. Sanal İkiz Makine Öğrenmesi Mimarisi: LightGBM Regresyonu

Spektrum tahmininde derin yapay sinir ağları yerine, düşük çıkarım gecikmesi ve yüksek genelleştirme kabiliyeti nedeniyle LightGBM regresyon algoritması tercih edilmiştir (Ke vd., 2017). Modelin hiperparametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. *LightGBM sanal ikiz modeli optimize edilmiş hiperparametreleri.*

Hiperparametre	Değer	Açıklama
Kestirici Sayısı (n_estimators)	**2500**	Maksimum karar ağacı sayısı
Öğrenme Oranı (learning_rate)	**0.03**	Gradyan adım büyüklüğü
Maksimum Yaprak Sayısı (num_leaves)	**127**	Ağaç başına düşen terminal yaprak sayısı
Maksimum Derinlik (max_depth)	**10**	Ağacın büyüme sınırı
Alt Örnekleme Oranı (subsample)	**0.85**	Rastgele veri seçim oranı
Öznitelik Örnekleme (colsample_bytree)	**0.85**	Düğüm bölme öznitelik oranı
Erken Durdurma (early_stopping)	**100 tur**	Aşırı öğrenmeyi önleme penceresi
Veri Ayrımı	**%85 / %15**	Eğitim/Test

2.4. Gerçek Zamanlı Simülatör Altyapısı

Eğitilen model booster ağırlıkları .txt formatında dışa aktarılarak Streamlit tabanlı bir kullanıcı arayüzü kurulmuştur. Bu arayüz kullanıcıdan λ, P_{in} ve I_{pump} girdilerini alarak anlık olarak 501 spektral noktayı üretmekte; tepe gücü (P_{peak}), tepe dalga boyu (λ_{peak}) ve net kazancı dBm cinsinden $(G = P_{peak} - P_{in})$ hesaplamaktadır.

3. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

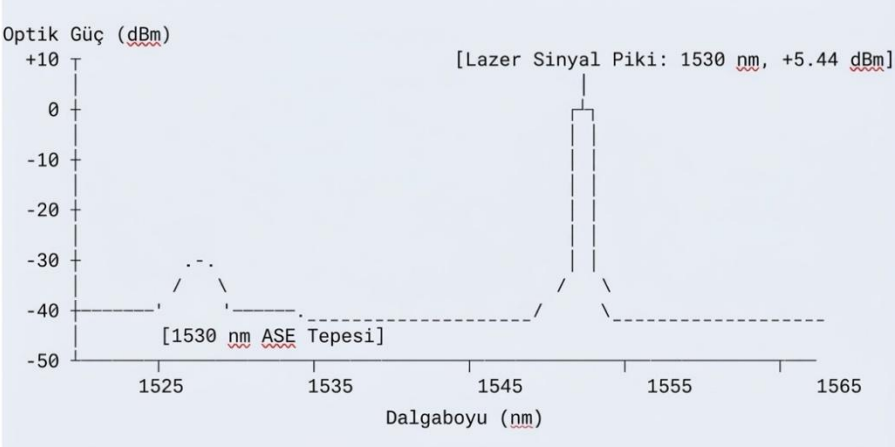
Geliştirilen EDFA Sanal İkiz modelinin doğruluğu, eğitimde kullanılmamış %15'lik test veri kümesi üzerinde Belirleme Katsayısı (R^2), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Kök Ortalama

Kare Hata (RMSE) metrikleriyle sınanmıştır. Tablo 2 elde edilen sayısal performansı özetlemektedir.

Tablo 2. *Sanal İkiz Modelinin Doğrulama ve Hata Metrikleri.*

Metrik	Değer	Birim	Değerlendirme
Belirleme Katsayısı (R^2)	**0.9942**	Boyutsuz	Varyansın %99.4'ü açıklanmaktadır
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	**0.1284**	dBm	Donanım gürültüsü seviyesindedir
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	**0.2140**	dBm	Uç değer sapması düşüktür
Ortalama Çıkarım Süresi (501 Nokta)	**< 8.5**	milisaniye	Gerçek zamanlı kontrole uygundur

Test sonuçlarına göre 0.1284 dBm düzeyinde kalan ortalama hata, standart bir laboratuvar spektrum analizörünün kendi optik kalibrasyon toleransları içerisindedir. Şekil 2'de model tarafından üretilen örnek bir spektral yanıt gösterilmektedir.



Şekil 2. *Sanal İkiz simülatörünün örnek bir spektral güç çıktısı (*P_{in} = 0 dBm, I = 300 mA, λ = 1530 nm*).*

Çalışmadan elde edilen temel çıkarımlar ve sistem kazanımları aşağıda özetlenmiştir:

1. **Fiziksel Doğruluk:** Model, hem 1530.0 nm lazer rezonans pikini (+5.44 dBm) hem de arka plandaki -35 dBm ile -45 dBm bandındaki karakteristik ASE gürültü eğimini aslına sadık biçimde taklit etmiştir.
2. **Yüksek Hesaplama Hızı:** Analitik diferansiyel denklem çözücülerinin saniyeler süren işlem yüküne karşılık, LightGBM tabanlı model 501 spektral noktayı 8.5 ms altında sentezlemektedir.
3. **Sıfır Riskli Çevrim Dışı Ortam:** Canlı optik ağlarda iletim kesintisi veya lazer diyot yıpranması riski olmadan, Pekiştirmeli Öğrenme (RL) algoritmalarının yüz binlerce deneme yapabileceği güvenli bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur.

Gelecek çalışmalarda, bu tek kanallı sanal ikiz yapısının çok kanallı dinamik WDM ağlarına genişletilmesi ve ortam sıcaklığı gibi çevresel parametrelerin modele dâhil edilerek otonom kazanç kontrolcülerinin geliştirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

Agrawal, G. P. (2012). *Fiber-optic communication systems* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Becker, P. C., Olsson, N. A., & Simpson, J. R. (1999). *Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology*. Academic Press.

Desurvire, E. (2002). *Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications*. John Wiley & Sons.

Giles, C. R., & Desurvire, E. (1991). Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 9(2), 271-283.

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on risk and vulnerability* (pp. 85-113). Springer, Cham.

Huang, Y., Yin, S., & Zhang, J. (2020). Machine learning-based digital twin for optical network performance monitoring and optimization. *IEEE Communications Magazine*, 58(8), 56-62.

Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., & Liu, T. Y. (2017). Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 30, 3146-3154.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., & Vanderplas, J. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.

Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction* (2nd ed.). MIT Press.

Zibar, D., Wymeersch, H., & Lyubomirsky, I. (2021). Machine learning in optical communication systems: Principles and applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(1), 1-17.

NÖROLEPTİK MALİGN SENDROM: OLGU SUNUMU

Doç. Dr. Ahmet ATLAS
Department of Anesthesiology and Reanimation, Faculty of Medicine, Harran University,63040¸ Sanlıurfa,
ORCID ID: 0000-0001-5999-0510

ÖZET

Nöroleptik malign sendrom (NMS), santral dopaminerjik sistemi etkileyen ilaçların, en sık da antipsikotiklerin kullanımı sonrası ortaya çıkan nadir görülen fakat hayatı tehdit eden bir sendromdur. Klinik olarak yüksek ateş, rijidite, bilinç değişiklikleri, otonomik disfonksiyon, serum kreatin fosfokinaz düzeyinde yükselme ve lökositoz ile karakterizedir. Antipsikotik tedavinin herhangi bir döneminde görülebilmekle birlikte genellikle ilaca başlandıktan ya da ilaç dozu arttırıldıktan sonraki ilk 24–72 saatlik süre içerisinde gelişebilmektedir. Bu olgu sunumunda antipsikotik ilaç başlanan ve nöroleptik maling sendrom gelişen hastanın seyrini sunmayı amaçladık. 24 yaş erkek hasta dış merkezden ateş yüksekliği, şuur bozukluğu şikayetiyle acil servisimize getirilen hasta yoğun bakım ünitemize yatırıldı. Hikayesinde; 2 hafta önce psikiyatri polikliniği tarafından olanzapin, ketiapin, xeplion amp başlanmış. 2. enjeksiyondan sonra eklemlerde katılık, bilinç bulanıklığı başlamış. Hastanemize sevk edilen hasta nöroleptik maling sendrom ön tanısı ile yoğun bakım ünitemize yatırıldı.

İlk muayenesinde şuuru konfüze, GKS:12, TA: 150/80 mmHg, Kalp tepe atımı: 112/dk, solunum sayısı: 30/ dk, ateş 42ºC olarak saptandı. Nörolojik muayenesinde, konfüzyon ve üst ekstremitede daha belirgin olmak üzere iki taraflı yaygın rijidite ve akinezi tespit edildi. Diğer sistem muayene bulguları normal sınırlarda bulundu. Laboratuvar bulgularında; Kreatin fosfokinaz (CPK): 2651U/L, AST: 70 U/L, ALT: 39 U/L,CRP: 15.29 mg/L,WBC: 16.55 10^3/uL olarak bulundu. Antipisikotik ilaç kullanım öyküsü bulunan hasta, Nierenberg tanı kriterlerine göre NMS tanısıyla yoğun bakım ünitesine yatırıldı. Monitörize edilen hastanın kullanmakta olduğu tüm ilaçları kesildi. Periferik soğuk uygulamasına, maske ile oksijen (2-4 l/dk) verilmesine ve intravenöz hidrasyon tedavisine başlandı. Bromokriptin 10 mg /gün (oral olarak 4 eşit doza bölünerek) verildi. Tedavisinin 5. gününde Laboratuvar takiplerinde CPK, AST, ALT ve diğer biyokimya değerleri normal sınırlara geriledi. Takiplerinde kas rijiditesi düzeldi. Hasta yatışının yedinci gününde GKS:15, vital bulguları stabil olarak psikiyatri servisine devir edildi.

Psikiyatri servisinde 8 gün yatırılan hasta, tedavisi düzenlendikten sonra şifa ile taburcu edildi.

Anahtar kelimeler: Nöroleptik malign sendrom, Antipsikotik ilaçlar, Dantrolen

NEUROLEPTIC MALIGNANT SYNDROME: A CASE REPORT

ABSTRACT

Neuroleptic malignant syndrome (NMS) is a rare but life-threatening syndrome that occurs following the use of drugs affecting the central dopaminergic system, most commonly antipsychotics. Clinically, it is characterised by high fever, rigidity, altered consciousness, autonomic dysfunction, elevated serum creatine phosphokinase levels, and leukocytosis. Although it can occur at any stage of antipsychotic treatment, it usually develops within the first 24–72 hours after starting the drug or increasing the dose. In this case report, we aimed to present the course of a patient who developed neuroleptic malignant syndrome after starting antipsychotic medication. A 24-year-old male patient was admitted to our intensive care unit after being brought to our emergency department from another centre with complaints of high

fever and impaired consciousness. His history included the initiation of olanzapine, quetiapine, and Xeplion amp by the psychiatry outpatient clinic two weeks prior. After the second injection, joint stiffness and confusion began. The patient was transferred to our hospital and admitted to our intensive care unit with a preliminary diagnosis of neuroleptic malignant syndrome.
On initial examination, he was found to be confused, GCS: 12, BP: 150/80 mmHg, heart rate: 112/min, respiratory rate: 30/min, and temperature: 42ºC. Neurological examination revealed confusion and bilateral rigidity and akinesia, more pronounced in the upper extremities. Findings from examination of other systems were within normal limits. Laboratory findings were as follows: Creatine phosphokinase (CPK): 2651 U/L, AST: 70 U/L, ALT: 39 U/L, CRP: 15.29 mg/L, WBC: 16.55 10^3/uL. The patient, who had a history of antipsychotic medication use, was admitted to the intensive care unit with a diagnosis of NMS according to Nierenberg criteria. All medications the monitored patient was taking were discontinued. Peripheral cold application, oxygen via mask (2-4 l/min), and intravenous hydration therapy were initiated. Bromocriptine 10 mg/day (divided into 4 equal oral doses) was administered. On the 5th day of treatment, laboratory follow-up showed that CPK, AST, ALT, and other biochemical values had returned to normal limits. Follow-up showed improvement in muscle rigidity. On the seventh day of hospitalisation, the patient was transferred to the psychiatric ward with a GCS of 15 and stable vital signs.
The patient was hospitalised in the psychiatric ward for 8 days and was discharged after recovery following treatment.
Keywords: Neuroleptic malignant syndrome, Antipsychotic drugs, Dantrolene

1. GİRİŞ

Nöroleptik Malign Sendrom (NMS), santral dopaminerjik sistemi etkileyen, en sık antipsikotik ajanlara bağlı olarak gelişen nadir fakat potansiyel olarak yaşamı tehdit eden bir klinik tablodur (Morcos et al., 2019). Klinik olarak yüksek ateş, kas rijiditesi, bilinç değişiklikleri, otonomik disfonksiyon, serum kreatin-fosfokinaz (CK) düzeyinde yükselme ve lökositoz ile karakterizedir. Bu sendrom, antipsikotik tedavinin herhangi bir döneminde ortaya çıkabilmekle birlikte, özellikle ilacın başlama ya da doz artışı sonrası ilk **24-72 saat** içerisinde gelişme eğilimindedir (Simon et al., 2025). Epidemiolojik olarak, antipsikotik kullanan hasta grubunda insidansı yaklaşık %0,01 ile %3,2 arasında değişmekte, genç erişkinlerde, erkeklerde ve yüksek doz/enjeksiyon formu antipsikotik kullanımında risk artışı gözlenmektedir. NMS'nin birincil tetikleyicisi, çoğunlukla antipsikotik bir ajandan kaynaklanan dopamin reseptör blokajıdır. NMS genellikle yüksek etkili birinci nesil nöroleptik ajanlarla ilişkilendirilmekle birlikte, düşük etkili ve atipik antipsikotik ajanlar, antiemetikler, trisiklik antidepresanlar ve lityum da neden olabilir. Levodopa ve amantadin gibi çoğunlukla Parkinson hastalıklarını yönetmek için kullanılan dopaminerjik ilaçların hızlı kesilmesi de bu sendroma neden olabilir(Kane et al., 2019) . Tipik klinik görünümü yüksek ateş, müsküler rijidite, bilinç değişiklikleri ve otonomik disfonksiyon şeklindedir. Ateş oldukça yüksektir. Genellikle vücut ısısı 38.5–42 derece arasındadır. Ateşteki yükselme ani olmakla birlikte, günlük dalgalanmalar ve zirveler görülmez. Geleneksel ateş düşürücülere yanıt alınamaz (Belvederi Murri et al., 2015). Rijidite daha çok kas tonusunda yaygın artış ya da kurşun boru rijiditesi şeklindedir. Simetriktir. Hafif tonus artışından opistotonusa kadar değişen bir skalada karşımıza çıkabilmektedir. İstisnalar olmakla birlikte, genelde tüm vakalarda görülebilmektedir. Kas tonusundaki fokal artışlar blefarospazm, okülerjik kriz veya trismus şeklinde de kendini gösterebilmektedir. Artan müsküler tonusun sonucunda patolojik refleksler, tremor, bradikinezi, kore, distoni, nistagmus, disfaji, dizartri veya afoni de tabloya eşlik edebilmektedir (İŞERİ & SELEKLER, 2005). Zihinsel durum söz konusu olduğunda, komadan konfüzyona kadar değişebilen dalgalanmalar görülebilmektedir.

Ayrıca dezoryantasyon, psikomotor ajitasyon ve deliryum da tabloya eşlik edebilmektedir. Kalp hızında düzensizlik (taşikardi), takipne, kan basıncı değişiklikleri, solukluk, üriner retansiyon, sialore ve aşırı terleme (diaforez)gibi otonomik belirtileri izlenir (Tse et al., 2015). Bu olgu sunumunda antipsikotik ilaç başlanan ve nöroleptik maling sendrom gelişen hastanın seyrini sunmayı amaçladık.

2. OLGU SUNUMU

24 yaş erkek hasta dış merkezden ateş yüksekliği, şuur bozukluğu şikayetiyle acil servisimize getirilen hasta yoğun bakım ünitemize yatırıldı. Hikayesinde; 2 hafta önce psikiyatri polikliniği tarafından olanzapin, ketiapin, xeplion amp başlanmış. 2. enjeksiyondan sonra eklemlerde katılık, bilinç bulanıklığı başlamış. Hastanemize sevk edilen hasta nöroleptik maling sendrom ön tanısı ile yoğun bakım ünitemize yatırıldı.

İlk muayenesinde şuuru konfüze, GKS:12, TA: 150/80 mmHg, Kalp tepe atımı: 112/dk, solunum sayısı: 30/ dk, ateş 42ºC olarak saptandı. Nörolojik muayenesinde, konfüzyon ve üst ekstremitede daha belirgin olmak üzere iki taraflı yaygın rijidite ve akinezi tespit edildi. Diğer sistem muayene bulguları normal sınırlarda bulundu. Laboratuvar bulgularında; Kreatin fosfokinaz (CPK): 2651U/L, AST: 70 U/L, ALT: 39 U/L,CRP: 15.29 mg/L,WBC: 16.55 10^3/uL olarak bulundu. Antipisikotik ilaç kullanım öyküsü bulunan hasta, Nierenberg tanı kriterlerine göre NMS tanısıyla yoğun bakım ünitesine yatırıldı. Monitörize edilen hastanın kullanmakta olduğu tüm ilaçları kesildi. Periferik soğuk uygulamasına, maske ile oksijen (2-4 l/dk) verilmesine ve intravenöz hidrasyon tedavisine başlandı. Bromokriptin 10 mg /gün (oral olarak 4 eşit doza bölünerek) verildi. Tedavisinin 5. gününde Laboratuvar takiplerinde CPK, AST, ALT ve diğer biyokimya değerleri normal sınırlara geriledi. Takiplerinde kas rijiditesi düzeldi. Hasta yatışının yedinci gününde GKS:15, vital bulguları stabil olarak psikiyatri servisine devir edildi.

Psikiyatri servisinde 8 gün yatırılan hasta, tedavisi düzenlendikten sonra şifa ile taburcu edildi.

3. TARTIŞMA

Nöroleptik malign sendrom (NMS), dopamin reseptör antagonisti ilaçların kullanımı veya dopaminerjik ilaçların hızla kesilmesiyle ilişkili, yaşamı tehdit eden bir sendromdur. Klasik klinik özellikleri arasında mental durum değişiklikleri, ateş, kas sertliği ve otonomik instabilite bulunur. Nadir görülen bir durum olsa da NMS, önemli mortalite ve ölümü önlemek için erken tanı ve tedavi gerektirdiğinden, ateş ve mental durum değişikliklerinin ayırıcı tanısının önemli bir parçası olmaya devam etmektedir. Bu sendrom, antipsikotik tedavinin herhangi bir döneminde ortaya çıkabilmekle birlikte, özellikle ilacın başlama ya da doz artışı sonrası ilk **24-72 saat** içerisinde gelişme eğilimindedir (Simon et al., 2025). Epidemiolojik olarak, antipsikotik kullanan hasta grubunda insidansı yaklaşık %0,01 ile %3,2 arasında değişmekte, genç erişkinlerde, erkeklerde ve yüksek doz/enjeksiyon formu antipsikotik kullanımında risk artışı gözlenmektedir (Ware et al., 2018). NMS'nin birincil tetikleyicisi, çoğunlukla antipsikotik bir ajandan kaynaklanan dopamin reseptör blokajıdır. NMS genellikle yüksek etkili birinci nesil nöroleptik ajanlarla ilişkilendirilmekle birlikte, düşük etkili ve atipik antipsikotik ajanlar, antiemetikler, trisiklik antidepresanlar ve lityum da neden olabilir (Kane et al., 2019). Tanıda, elektrolitler ve serum kreatinin, kreatin fosfokinaz düzeyi, miyoglobinüri için idrar tahlili ve metabolik asidozu taramak için arteriyel veya venöz kan gazı içeren kapsamlı bir metabolik paneli içermelidir. Tanı klinik olarak konulabilir, ancak destekleyici laboratuvar çalışmaları genellikle yüksek CK ve akut olarak azalan böbrek fonksiyonu ile rabdomiyoliz ile uyumludur. Yüksek CK derin olabilir ve tipik olarak hastalığın şiddetiyle ilişkilidir. Lökositoz yaygındır ve sola kayma ile 10,00 ila 40,000 mm3 arasında değişen beyaz kan hücresi sayıları vardır.

Transaminazlar da hafifçe yükselebilir (Tablo 1). Tanının daha az net olduğu hastalarda, yapısal ve enfeksiyöz tanıyı ayırıcı tanıdan dışlamak için nörogörüntüleme ve lomber ponksiyon gerekebilir(Simon et al., 2025).

Tablo 1. Nöroleptik malign sendrom laboratuvar bulguları

Parametre	**Değişiklik**
LDH	Artar
CPK	Artar
ALP	Artar
ALT/AST	Artar
Miyoglobin	Artar
Fosfat	Hiperfosfatemi
Potasyum	Hiperpotasem
Kalsiyum	Hipokalsemi
Magnezyum	Hipomagnezemi
Sodyum	Hiponatremi/ Hipernatremi
BUN	Artar
Serum demiri	Azalır
Lökosit	Lökositoz
Trombosit	Trombositoz/nadiren trombositopeni
PH (kan gazı)	Metabolik asidoz
İdrar proteini	Proteinüri
İdrarda miyoglobin	Miyoglobinüri
LDH: Laktat dehidrogenaz; PK: Kreatin fosfokinaz; ALP: Alkalen fosfotaz; ALT: Alanin aminotransferaz; AST: Aspartat aminotransferaz. Oruch R, Pryme IF, Engelsen BA, Lund A. Neuroleptic malignant syndrome: an easily overlooked neurologic emergency. Neuropsychiatr Dis Treat. 2017; 13:161-175.	

NMS'de ayırıcı tanı çok önemlidir ve hatta birincil öneme sahip en önemli konulardan biridir. Ateş ve rijiditenin bulunduğu, rabdomiyolizin olduğu, bilinç değişikliklerinin olduğu tüm tıbbi durumlarla ayırıcı tanısı (Tablo 2) çok iyi yapılmalıdır. Çeşitli nörolojik ve metabolik bozukluklar, MSS enfeksiyonları, lityum intoksikasyonu, ısı şoku, malign katatoni, merkezi antikolinerjik sendrom, malign hipertermi, madde ve ilaçla ilişkili durumlar da yine ayırıcı tanıda düşünülmesi gereken diğer önemli konulardır.

Tablo 2. Nöroleptik malign sendrom ayırıcı tanısında düşülmesi gereken hastalıklar

Enfeksiyöz nedenler	**Psikiyatrik ve nörolojik nedenler**	**Toksik ve farmokolojik nedenler**	**Endokrinolojik nedenler**	**Diğer**
Menenjit Ensefalit Tetanoz Beyin apsesi Sepsis Pnömoni Botilizm	İdiyopatik malign katatoni Ajite deliryum Akut distoni Epilepsi İnme Orta beyin lezyonları Serebral	Antikolinerjik deliryum Malign hipertermi Serotonin sendromu Ekstrapiramidal ilaç etkileşimleri Antipsikotiklerle ilgili benign yan etkiler Salisilat zehirlenmesi	Trotoksikoz Feokromasitoma Hipokalsemi Hipomagnezemi	Sıcak çarpması Akut İntermittant porfiria Sistemik lupus eritematozus

	vaskülit Akut hidrosefali Akut spinal kord injürisi	İlaç/madde İntoksikasyonu ve kötüye kullanımı (metamfetaminler, halüsinojenler) Dopaminerjik ajanların ani kesilmesi Alkol/benzodiazepin yoksunluğu		
Oruch R, Pryme IF, Engelsen BA, Lund A. Neuroleptic malignant syndrome: an easily overlooked neurologic emergency. Neuropsychiatr Dis Treat. 2017; 13:161-175.				

NMS nörolojik bir acil durumdur ve tanı ve tedavideki gecikmeler önemli morbiditeye veya ölüme yol açabilir. Sorumlu ilacın kesilmesi ve ardından destekleyici tedavi uygulanması son derece önemlidir (Kaliora et al., 2018). Tedavi mutlaka yoğunbakım şartlarında yapılmalıdır. Destekleyici tedavi, yaşamsal fonksiyonların desteklenmesi (sıvı-elektrolit açığının giderilmesi, asit-baz dengesinin sağlanması, ateşin kontrol altına alınması) ve olası komplikasyonların (kardiyorespiratuar yetmezlik, böbrek yetmezliği, aspirasyon pnömonisi ve koagülopatiler) önlenmesine yönelik olmalıdır (Strawn et al., 2007). Antipsikotik ilaçların kesilmesinden sonra, destekleyici tedavi ile hastaların büyük bir kısmı düzelmektedir. Düzelmediği takdirde farmakolojik yöntemler düşünülmelidir (Oruch et al., 2017). Bromokriptin, amantadin, levadopa/karbidopa gibi dopaminerjik ajanlar, dantrolen sodyum gibi kas gevşeticiler ve benzodiyazepinler bu konuda yararı kanıtlanmış ilaçlardır (Nagel et al., 2015). Bromokriptin, güçlü santral etkinliği olan bir dopamin agonistidir. NMS tedavisinde klinik belirtileri düzeltmek amacıyla kullanılmaktadır. Günlük doz üçe bölünmek suretiyle 8 saatte bir verilmektedir. Başlangıç dozu günde iki ya da üç kez olmak üzere 2.5–10 mg/ oral şeklindedir. Amantadin, presinaptik depolardan dopamin sekresyonu yapmak suretiyle etkisini gösteren dopaminerjik bir ajandır. Rijidite üzerine etkilidir. Günlük doz oral ya da nazogastrik tüp yoluyla 200–400 mg/ gün şeklindedir. Günde 2 kez olmak üzere bölünmüş dozlar şeklinde uygulanır (Nagel et al., 2015). Dantrolen, endoplazmik retikulumdan kalsiyum salınımını inhibe ederek kas gevşemesine ve hücre içi kalsiyum miktarında düşüşe neden olan hidantoin türevi kas gevşetici bir ajandır. Hem kasın kasılmasını ve hem de kasta ısı üretimini azaltmak suretiyle etkili olmaktadır.

Özgün olmamakla birlikte anestezi esnasında ortaya çıkan malign hiperterminin tedavisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Sarkoplazmik retikulumundan kalsiyum salınımını inhibe etmek suretiyle merkezi vücut ısısını ve periferal kas rijiditesini azaltabilmektedir. NMS için önerilen başlama dozu 1–2.5 mg/ kg, idame doz 6 saat arayla 1 mg/kg, maksimum günlük doz ise 10 mg/kg şeklindedir (2). Bizim hastamızda da 2 hafta önce psikiyatrik ilaç başlanması öyküsü olduğu için ve mental durum değişiklikleri, ateş, rijidite ve otonomik instabilite olduğu için NMS tanısı ile yoğunbakım ünitemize yatırıldı. İlk muayenesinde şuuru konfüze, GKS:12, TA: 150/80 mmHg, Kalp tepe atımı: 112/dk, solunum sayısı: 30/ dk, ateş 42ºC olarak saptandı. Nörolojik muayenesinde, konfüzyon ve üst ekstremitede daha belirgin olmak üzere iki taraflı yaygın rijidite ve akinezi tespit edildi. Diğer sistem muayene bulguları normal sınırlarda bulundu. Laboratuvar bulgularında; Kreatin fosfokinaz (CPK): 2651U/L, AST: 70 U/L, ALT: 39 U/L,CRP: 15.29 mg/L,WBC: 16.55 10^3/uL olarak bulundu. . Monitörize edilen hastanın kullanmakta olduğu tüm ilaçları kesildi. Periferik soğuk uygulamasına, maske ile oksijen (2-4 l/dk) verilmesine ve intravenöz hidrasyon tedavisine başlandı. Bromokriptin 10 mg /gün (oral olarak 4 eşit doza bölünerek) verildi. Tedavisinin 5. gününde Laboratuvar takiplerinde CPK, AST, ALT ve diğer biyokimya değerleri normal sınırlara geriledi. Takiplerinde kas rijiditesi

düzeldi. Hasta yatışının yedinci gününde GKS:15, vital bulguları stabil olarak psikiyatri servisine devir edildi.
Psikiyatri servisinde 8 gün yatırılan hasta, tedavisi düzenlendikten sonra şifa ile taburcu edildi.

4. SONUÇ

NMS, antipsikotik ilaç kullanımına bağlı gelişen, ayırıcı tanıdaki güçlükler nedeniyle zaman zaman atlanabilen, gecikmiş müdahalelerde mortalite ile sonuçlanabilen, ciddi bir komplikasyondur. Özellikle çoklu ilaç kullanımı olan, geçmişinde NMS öyküsü olan, yüksek potensli antipsikotik kullanımı olan
ve parenteral tedavi alan hastalarda dikkatli olunmalıdır. Şüphelenilen vakalarda neden olan antipsikotik ilaç derhal kesilmeli ve hasta yoğun bakım şartlarını karşılayan bir merkezde izlenmelidir.

KAYNAKÇA

Belvederi Murri, M., Guaglianone, A., Bugliani, M., Calcagno, P., Respino, M., Serafini, G., Innamorati, M., Pompili, M., & Amore, M. (2015). Second-generation antipsychotics and neuroleptic malignant syndrome: systematic review and case report analysis. *Drugs in R&D*, *15*(1), 45–62. https://doi.org/10.1007/s40268-014-0078-0

İŞERİ, P., & SELEKLER, M. (2005). Nöroleptik Malign Sendrom. *Turkiye Klinikleri Journal of Internal Medical Sciences*, *1*(5), 39–42. https://www.turkiyeklinikleri.com/article/en-noroleptik-malign-sendrom-36227.html

Kaliora, S. C., Zervas, I. M., & Papadimitriou, G. N. (2018). [Electroconvulsive therapy: 80 years of use in psychiatry]. *Psychiatrike = Psychiatriki*, *29*(4), 291–302. https://doi.org/10.22365/jpsych.2018.294.291

Kane, J. M., Correll, C. U., Delva, N., Gopal, S., Savitz, A., & Mathews, M. (2019). Low Incidence of Neuroleptic Malignant Syndrome Associated With Paliperidone Palmitate Long-Acting Injectable: A Database Report and Case Study. *Journal of Clinical Psychopharmacology*, *39*(2), 180–182. https://doi.org/10.1097/JCP.0000000000001019

Morcos, N., Rosinski, A., & Maixner, D. F. (2019). Electroconvulsive Therapy for Neuroleptic Malignant Syndrome: A Case Series. *The Journal of ECT*, *35*(4), 225–230. https://doi.org/10.1097/YCT.0000000000000600

Nagel, M., Freisberg, S., Junghanns, K., Moll, C. K. E., & Willenborg, B. (2015). [The Neuroleptic Malignant Syndrome]. *Fortschritte Der Neurologie-Psychiatrie*, *83*(7), 373–380. https://doi.org/10.1055/S-0035-1553246

Oruch, R., Pryme, I. F., Engelsen, B. A., & Lund, A. (2017). Neuroleptic malignant syndrome: an easily overlooked neurologic emergency. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, *13*, 161–175. https://doi.org/10.2147/NDT.S118438

Simon, L. V., Hashmi, M. F., & Callahan, A. L. (2025). *Neuroleptic Malignant Syndrome*.

Strawn, J. R., Keck, P. E., & Caroff, S. N. (2007). Neuroleptic malignant syndrome. *The American Journal of Psychiatry*, *164*(6), 870–876. https://doi.org/10.1176/ajp.2007.164.6.870

Tse, L., Barr, A. M., Scarapicchia, V., & Vila-Rodriguez, F. (2015). Neuroleptic Malignant Syndrome: A Review from a Clinically Oriented Perspective. *Current Neuropharmacology*, *13*(3), 395–406. https://doi.org/10.2174/1570159x13999150424113345

Ware, M. R., Feller, D. B., & Hall, K. L. (2018). Neuroleptic Malignant Syndrome: Diagnosis and Management. *The Primary Care Companion for CNS Disorders*, *20*(1). https://doi.org/10.4088/PCC.17r02185

AKIŞ METRE ARAŞTIRMALARININ BİBLİYOMETRİK PROFİLİ: EĞİLİMLER, YAZARLAR VE TEKNOLOJİK KÜMELENMELER

Doç. Dr. İbrahim PAZARKAYA
Afyonkocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü 03200 Afyonkarahisar
ORCID ID: 0000-0002-7046-2572

ÖZET
Bu çalışmada, 1980-2026 yılları arasında akış ölçer (flowmeter) teknolojileri üzerine yapılan akademik çalışmaları inceleyen bir bibliyometrik analiz gerçekleştirilmiştir. Web of Science (WOS) veri tabanı üzerinden özetlerde (abstract) "flowmeter veya flowmeter's" kelimeleriyle filtrelenen 869 araştırma makalesi, VOSviewer yazılımı kullanılarak; yayın trendleri, en etkin dergiler, yazarlar, ülkeler ve konu kümeleri açısından analiz edilmiştir. Akış metrelerle ilgili en fazla yayının 64 adetle 2022 yılında yapılmış ve bu çalışmaların %95,972'sinin İngilizce olarak yazılmıştır. En fazla atıf (173 atıf) alan çalışmanın Roshani (2020) tarafından gerçekleştirilen "Application of GMDH neural network technique to improve measuring precision of a simplified photon attenuation based two-phase flowmeter" isimli çalışma olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde 3148 atıfla en fazla atıf sayısına sahip derginin "Flow Measurement and Instrumentation" dergisi ve en fazla atıf alan yazar ise 195 atıfla Prabhu, S.V. isimli yazar olduğu belirlenmiştir. Akış metreler üzerine en fazla çalışma 244 makaleyle ÇİN Halk Cumhuriyeti tarafından yapılmış ve bu çalışmaların ve 2290 atıf aldığı görülmüştür.
Anahtar kelimeler: Bibliyometrik analiz, Akış metre, VOSviewer, Akışkanlar mekaniği

BIBLIOMETRIC PROFILE OF FLOWMETER RESEARCH: TRENDS, AUTHORS, AND TECHNOLOGICAL CLUSTERS

ABSTRACT
In this study, a bibliometric analysis was conducted to examine academic research on flowmeter technologies between 1980 and 2026. A total of 869 research articles filtered using the terms "flowmeter" or "flowmeter's" in their abstracts from the Web of Science (WOS) database were analyzed using VOSviewer software to examine publication trends, the most influential journals, authors, countries, and subject clusters. The highest number of publications on flowmeters, 64, was published in 2022, and 95.972% of these studies were written in English. The study with the highest number of citations (173 citations) was identified as "Application of GMDH neural network technique to improve measuring precision of a simplified photon attenuation based two-phase flowmeter" by Roshani (2020). Similarly, the journal with the highest number of citations (3,148 citations) was "Flow Measurement and Instrumentation," and the most cited author was Prabhu, S.V., with 195 citations. The People's Republic of China produced the most studies on flow meters, with 244 articles, and these studies received 2,290 citations.
Keywords: Bibliometric analysis, Flow meter, VOSviewer, Fluid mechanics

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)
Endüstri süreçlerin sürdürülebilirliği, verimliliği ve güvenliği, akışkanların kullanıldığı sistemlerde hassas ölçümlerin yapılmasına doğrudan ilişkilidir [1], [2]. Akış ölçümü; gıda, ilaç ve petrol endüstrisi gibi birçok sektörde kaynak yönetiminin, standartlara uyumun ve saha operasyon kararlarının temelidir [1], [3], [4].

Günümüzde artan enerji ihtiyacı, sıvı ve gazların tüketim değerlerinin verimli bir biçimde ölçülmesi gerekliliği doğmuştur. Literatürde araştırılmış bazı çalışmalarda, tropikal bölgelerde sıklıkla kullanılan frigorifik kamyonların enerji tüketimlerinin tespitinde hava debisini ölçmek, tarım alanında traktörlerin yakıt tüketim verilerini elde etmek, denizcilik sektöründe motor bakım programlarının yapılabilmesi için gemilerin yakıt tüketim verilerinin doğru elde edilmesi gerekliliğinden dolayı bu tür sistemlerde eliptik dişli debimetreler kullanıldığı belirlenmiştir [5], [6], [7]. Bununla birlikte, petrol sahalarında çok fazlı akış ölçümlerinde eliptik dişli debimetrelerin, türbin tip debimetreler yerine kullanılabileceği tespit edilmiştir [8].

Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren yeniliklerle birlikte, akış metre teknolojileri ve diğer ölçüm cihazlarının fiziksel birimi gerçek zamanlı sanal kopyasına “Dijital İkiz” (Digital Twin) evrilmektedir. Oluşturulan dijital ikizler, sadece ölçüm yapmayıp, arızaları tahmin etme ve sistem performansını optimize etme işlevini de görür [3], [9]. Literatürde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri tasarım aşamasında gerçek ölçüm değerlerine çok yakın sonuçlar verse de dijital ikiz kadar hızlı yanıt veremezler. Çünkü CFD modeller yüksek hesaplama maliyetine sahip olmaları nedeniyle hesap güçleri sınırlanmaktadır [10], [11]. Bu durumdan dolayı makine öğrenmesi (ML) algoritmaları, CFD ve gerçek testlerin fiziksel doğruluğunu çok kısa sürede tahmin edebilen “sanal akış metreler” olarak öne çıkmaktadır [1], [3].

Çok fazlı akışlar için geliştirilen bir sanal akış metreyi (VFM) inceleyen bir diğer çalışmada, özellik mühendisliğinin ve sensör seçiminin akış rejimiyle nasıl ilişkilendirileceği açıklanmıştır. Böylece hibrit/fizik temelli modellerin ekstrapolasyon yeteneğini artırdığı belirtilmiştir [3]. Bir başka çalışmada ise, çok fazlı akış metreler için "AD4MPFM" isminde ve zaman serisi verilerinden aykırı verileri belirleyerek ölçüm güvenirliğini artıran bir makine öğrenmesi modeli önerilmiştir [12]. Gemi yakıt tüketimi tahminlemesine yönelik IoT tabanlı bir makine öğrenmesi modellerini birleştiren çalışma, XGBoost ve Random Forest modellerin yüksek korelasyonla başarılı sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur [13]. Geçmişte elde edilen saha test verilerinin kullanılarak gaz, su ve petrol debilerini tahmini üzerine yapılan bir çalışmada, LightGBM ve GBML algoritmalarının başarılı tahmin oranlarına ulaştığı beyan edilmiştir [14]. Ultrasonik akış metrelerin ölçüm hatalarının tahmini için Bayesyen optimizasyonlu Random Forest modeli geliştirilen çalışmada ise, modelin ölçüm hatalarını yakalama kapasitesini belirgin bir şekilde artırdığı ifade edilmiştir [15].

Bu çalışmada, sıvı ve gazların ölçümünde kullanılan akış metrelerin literatürdeki yerini belirmenin yanı sıra akış metreler üzerine çalışmayı düşünen araştırmacılara, en çok atıf alan çalışmaları, yazarları ve ülkeler hakkında bilgiler vermek amaçlanmıştır.

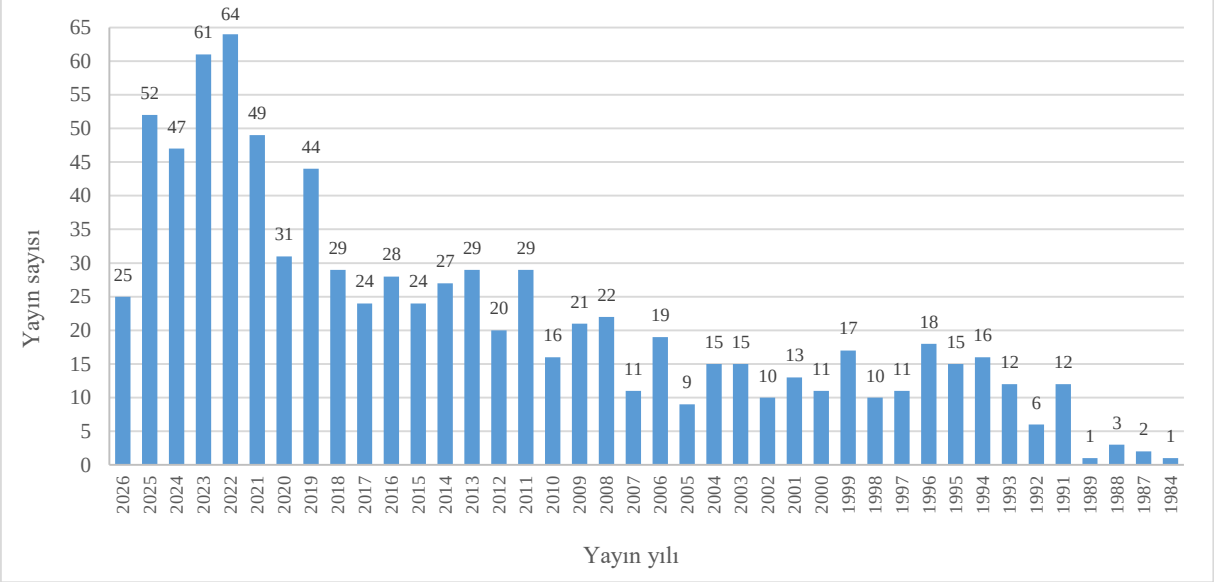
2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHODS)

Lepleme işlemiyle ilgili çalışmaların verileri Web of Science (WOS) sitesinden 26.05.2026 tarihinde “flowmeter veya flowmeter’s” kelimeleriyle özet (abstract) seçilerek arattırılmıştır. Araştırmaya dahil edilen WOS kategorileri ise Enstrümanlar Enstrümantasyon, Makine Mühendisliği, Çok Disiplinli Mühendislik, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Termodinamik, Disiplinler arası Bilimler, Mekanik, Enerji Yakıtları, Biyomedikal Mühendisliği, Petrol Mühendisliği, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Uzay ve Havacılık Mühendisliği, Tarım Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği ve İmalat Mühendisliği tercih edilmiştir. Doküman tipi “Araştırma Makalesi”, WOS indeks ise Science Citation Index Expanded (SCIE) ve Emerging Sources Citation Index (ESCI) şeklinde belirlenmiştir. Ayrıca 1980 – 2026 yılları arasında akış

ölçer (flowmeter) ile ilgili olarak yapılan çalışmaların bibliyometrik analizleri VOSviewer ortamında gerçekleştirilmiştir.

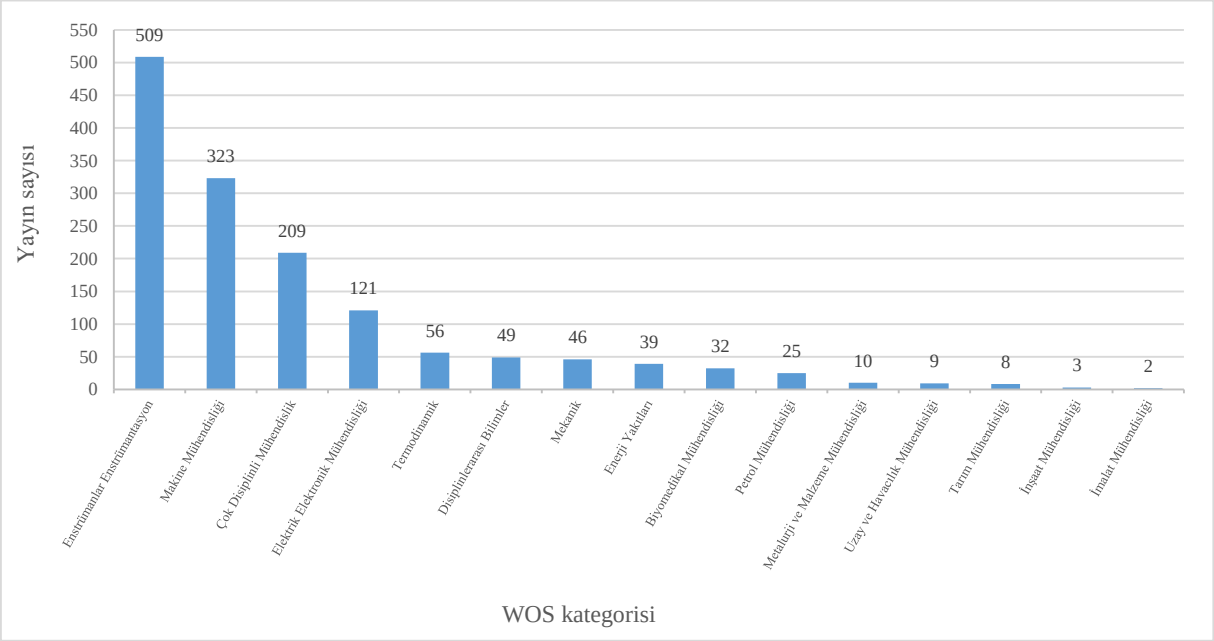
3. BULGULAR (RESULTS)

WOS veri tabanında akış metrelerle ilgili 869 adet araştırma makalesi yapıldığı görülmüştür. 1980 – 2026 yılları arasında akış metrelerle ilgili ilk çalışmanın Kou, Ah ve arkadaşları tarafından "A Pulsed Phase Measurement Ultrasonic Flowmeter For Medical Gases" ismiyle "Annals Of Biomedical Engineering" isimli dergide yayımlandığı tespit edilmiştir.
Akış metreler üzerine gerçekleştirilen çalışmaların yıllara göre dağılımını gösteren grafik Şekil 1'de verilmiştir. Akış metreyle ilgili en çok yayın 64 adetle 2022 yılı, ikinci sıradaysa 61 adet yayınla 2023 yılında yapıldığı tespit edilmiştir. 2026 yılı bitmediğinden bu yıldaki çalışmalar göz ardı edilmiştir.



Şekil 1. Yıllara göre yapılan çalışmaların dağılımı.

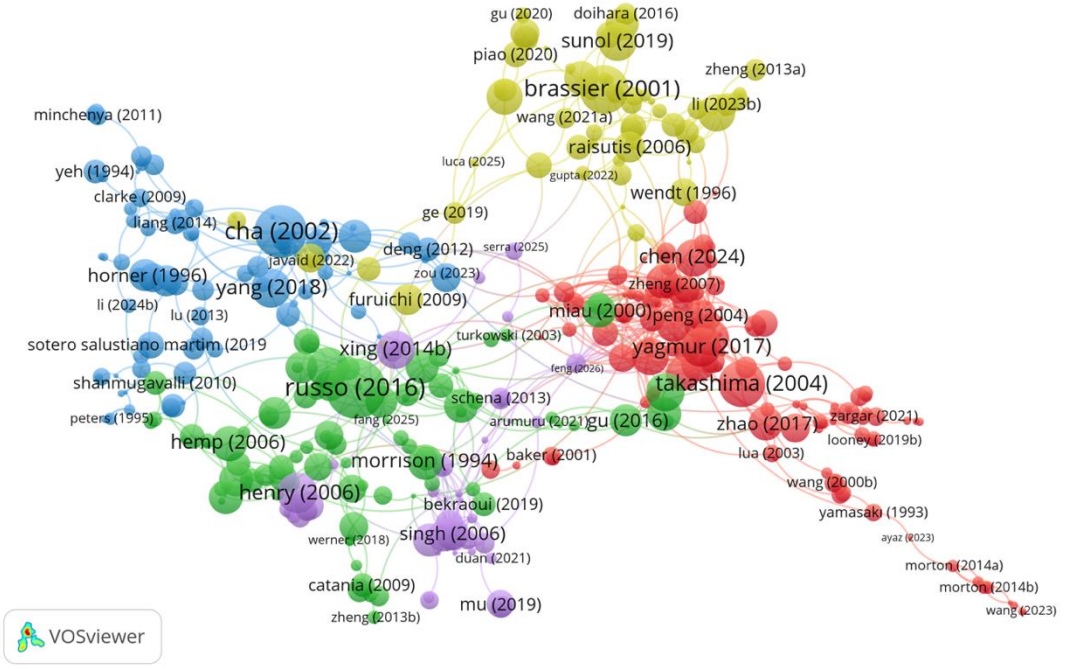
Şekil 2'de en çok çalışmanın hangi alanda yapıldığı gösterilmiştir. Akış metrelerle ilgili en çok çalışma 509 adetle "Enstrümanlar Enstrümantasyon" alanında gerçekleştirildiği görülmüştür. Diğer taraftan akış metrelerle ilgili çalışmalar sadece enstrümanlar enstrümantasyon, makine, elektrik elektronik ve çok disiplinli mühendislik alanlarında değil, aynı zamanda diğer bilim dallarında da gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır. İkinci olarak en çok yayın 323 yayınla "Makine Mühendisliği" alanında olduğu belirlenmiştir. Akış metreler üzerine yapılan çalışmaların 834 adedinin (%95,972) İngilizce, 16 adedinin (%1,841) Korece, 6 adedinin (%0,690) Almanca ve diğer çalışmalarınsa Fransızca, Lehçe, Rusça, İspanyolca ve Türkçe dilince yazıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 2. WOS kategorileri ve yayın sayıları.

3.1. En etkin makaleler analizi

Akış metreler konularının ele alındığı en etkin çalışmanın tespiti için Atıf/Doküman analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz en az sıfır atıf alan ve toplamda 869 makale VOSviewer programı tarafından en etkili 433 çalışma (item) ve 5 küme olarak görselleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. En etkin makaleler ağ analizi.

Yapılan doküman atıf analizi sonucunda, literatürdeki makalelerin atıf ilişkilerine göre beş ana küme (cluster) altında toplandığı görülmüştür. Haritadaki düğüm (node) büyüklükleri

makalelerin toplam atıf etkisini, düğümler arası çizgiler ise atıf bağlarının gücünü (Total Link Strength) temsil etmektedir. Ağ haritasının yapısal dağılımı incelendiğinde şu bulgular öne çıkmaktadır:

Kırmızı küme (Vorteks Akış Metreler ve Girdap Dinamikleri): Bu kümenin merkezinde bulunan Takashima (2004) ve Yağmur (2017) çalışmaları incelendiğinde kırmızı kümedeki çalışmaların özellikle vorteks akış metrelerin (vortex flowmeters) tasarımı ve küt cisimler (bluff bodies) etrafındaki akış karakteristikleri üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Odak noktasının ise girdap kopma frekansı ((vortex shedding frequency) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Strouhal sayısı analizleri ve hidrodinamik durumlar için parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PIV) gibi deneysel yöntemler veya FBG sensörler aracılığıyla ölçümlenmesi olduğu tespit edilmiştir. Bu durum akış metreleri hem deneysel hem de sensör teknolojilerini birleştiren çalışmalar olduğu sonucuna varılmıştır.

Yeşil Küme (Akışkan Fiziği, Sıkıştırılabilirlik ve Hata Analizi): Bu kümenin odağında deneysel hata analizi ve akışkanlar mekaniği üzerine kurulmuştur. Hemp (2006) tarafından Coriolis tipi akış metrelerdeki sıkıştırılabilirlik hataları üzerine yapılan çalışma ile Russo (2016)'nın türbülans yoğunluğu ve hız profili ölçeklendirmeleri üzerine yaptığı analizler, bu kümenin "teorik doğrulama" odaklı olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan bu kümedeki çalışmalar akışkanın termodinamiği üzerine olduğu belirlenmiştir.

Mavi Küme (Çok Fazlı Akışlar ve Elektromanyetik Ölçüm): Cha (2002) ile Yang (2018) merkezli olan bu kümedeki çalışmaların, elektromanyetik akış ölçümü ve çok fazlı (gaz-sıvı) akış rejimleri üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Özellikle Cha (2002)'nin kabarcıklı ve tıkalı akış (slug flow) rejimlerinde sinyal analizi yapması ve Yang (2018)'in faz izolasyonu yöntemiyle akışı düzgünleştirerek ölçüm hatasını minimize etmesi, bu kümenin "sinyal işleme ve akış rejimi kontrolü" konusunda özelleştiğini göstermektedir. Ayrıca bu küme, genel akış metre literatüründen ziyade, daha spesifik ve teknolojik olarak zorlu olan "çok fazlı akışkan ölçümü" ekosistemini oluşturmaktadır.

Sarı Küme (Ultrasonik Akış Ölçümü ve Sinyal İşleme): Ağın üst kısmında konumlanan sarı küme, ultrasonik uçuş süresi (Time-of-Flight - TOF) temelli ölçüm teknikleri üzerine uzmanlaşan bölümünü oluşturmaktadır. Kümenin merkezine konumlanan Brassier (2001) ve Sunol (2019) tarafından yapılan çalışmalar, bu kümenin "akustik sinyal işleme" ve "çapraz korelasyon (cross-correlation)" algoritmalarına dayalı yüksek hassasiyetli ölçüm arayışını göstermektedir. Bu çalışmaların fiziksel akış yapısından ziyade, tamamen sensör bazlı sinyal işleme ve gelişmiş matematiksel modelleme yöntemlerine (örn: underdamped oscillator modelleri) odaklanan teknolojik bir alan olduğu tespit edilmiştir.

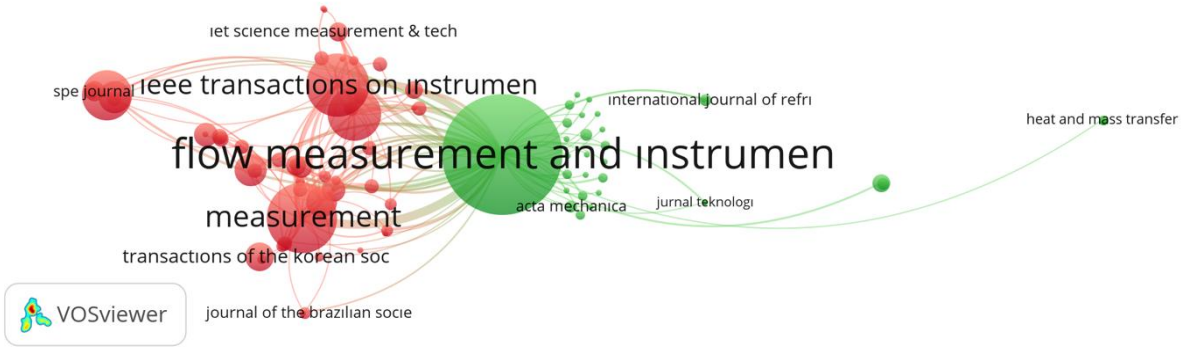
Mor Küme (Endüstriyel Uygulama ve Performans Doğrulama): Ağın alt kısmında, Henry (2006) ve Singh (2006) etrafında kümelenen mor bölge, akış metrelerin laboratuvar ortamından çıkıp endüstriyel sahalara (petrol kuyuları, boru hatları vb.) adaptasyonunu elen çalışmalardır. Bu küme, akademik teoriden ziyade, akış metrelerin saha ve endüstriyel performansının optimizasyonu, hata paylarının %1-5 seviyelerine düşürülmesi ve kalibrasyon standartlarının belirlenmesi konularında çalışan uygulamaları ele almaktadır.

Tablo 1. En çok atıf alan 5 makale.

Yazar(lar) Adı ve Yılı	Makale adı	Dergi ismi	Atıf sayısı
Roshani (2020)	Application of GMDH neural network technique to improve measuring precision of a simplified photon attenuation based two-phase flowmeter	Flow Measurement and Instrumentation	173
Zheng (2020)	Analysis and improvement of the hot disk transient plane source method for low thermal conductivity materials	International Journal of Heat and Mass Transfer	131
Shung (1992)	The Effects of Hematocrit, Shear Rate, and Turbulence on Ultrasonic Doppler Spectrum From Blood	IEEE Transactions on Biomedical Engıneering	130
Elkins (2003)	4D Magnetic resonance velocimetry for mean velocity measurements in complex turbulent flows	Experiments in Fluids	124
Russo (2016)	Scaling of turbulence intensity for low-speed flow in smooth pipes	Flow Measurement and Instrumentation	108

3.2. En etkin kaynaklar analizi

WOS veri tabanında bulunan akış metrelerle ilgili makalelerin atıf sayılarına göre en etkin kaynakları belirlemek amacıyla Atıf/Kaynak analizi yapılmıştır. Analiz en küçük 1 yayın yapan kaynakları ve sıfır atıf alan çalışmaları kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda WOS veri tabanında 181 kaynak tespit edilmiştir. Analizin görseli Şekil 4'te verilmiştir. Atıf sayılarına göre en etkin kaynak 213 adet çalışmayla "Flow Measurement and Instrumentation" dergisi olduğu görülmüştür. Bu dergiyi sırasıyla 65 makaleyle "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement", 78 çalışmayla "Measurement" ve 47 makaleyle "Measurement Science and Technology", ve 17 çalışmayla "Sensors and Actuators A-Physical" dergileri takip etmiştir. Akış metrelerle ilgili 869 makalenin yer aldığı ve 181 kaynağın atıf sayısına göre ilk 5 dergi Tablo 2'de sunulmuştur.



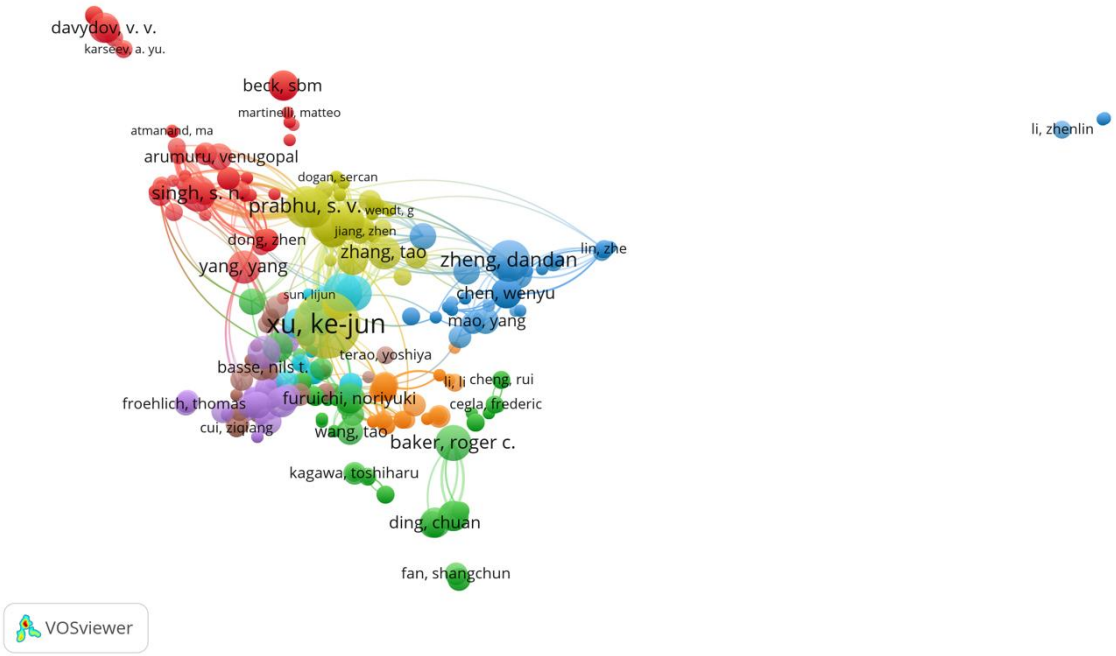
Şekil 4. En etkin kaynaklar ağ analizi.

Tablo 2. Atıf sayısına göre en etkin kaynaklar.

Kaynak Adı	Çalışma Sayısı	Atıf Sayısı	Toplam bağlantı gücü
Flow Measurement and Instrumentation	213	3148	392
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	65	862	138
Measurement	78	697	190
Measurement Science and Technology	47	696	50
Sensors and Actuators A-Physical	17	377	72

3.3. En etkin yazarlar analizi

Akış metreler üzerine çalışmış en etkin yazarlar WOS veri tabanıyla sınırlı olmak üzere Atıf/Yazar analizi yapılmıştır. Analiz 10 ortak yazar olacak şekilde sınırlandırılmış, en az 1 çalışması ve 10 atıf alan yazarlar dahil edilmiştir. Ayrıca 869 çalışmada 2601 yazar olduğu belirlenmiş ve en çok atıf alan 987 yazarla sınırlandırılmıştır. Atıf/Yazar analizinin görseli Şekil 5'te verilmiştir. En fazla çalışma yapan yazarlar sırasıyla Xu, Ke-Jun 22, Prabhu, S.V. 9, Venugopal, A. 8, Yang, Yang 6 ve Peshawa Jammal Muhammed, Ali 1 makale yayınladığı tespit edilmiştir. Ancak atıf sayısı (195) en fazla olan yazarlar Prabhu, S.V.'nin 9 çalışma yaptığı belirlenmiştir. En fazla çalışma yapan ilk 5 yazar Tablo 3'te verilmiştir.



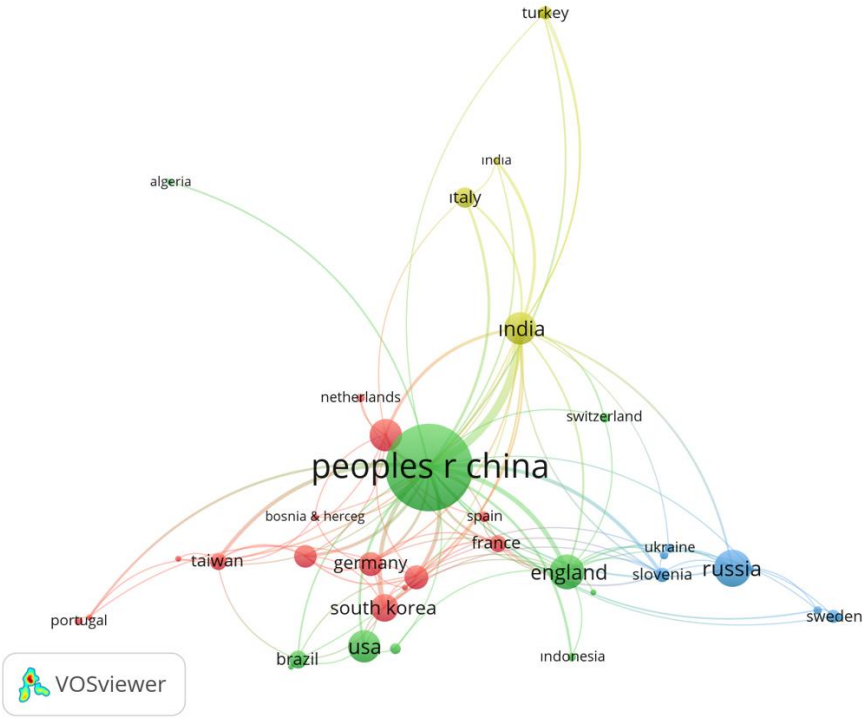
Şekil 5. En etkin yazar ağ analizi.

Tablo 3. En fazla yayın yapan yazarlar.

Yazar Adı	Çalışma Sayısı	Atıf Sayısı	Toplam bağlantı gücü
Prabhu, S.V.	9	195	269
Venugopal, A.	8	194	249
Xu, Ke-Jun	22	175	291
Yang, Yang	6	174	80
Peshawa Jammal Muhammed, Ali	1	173	0

3.4. En etkin ülkeler analizi

Akış metreler üzerine en fazla çalışma yapan ülkeler analizi, en az 1 yayın ve sıfır atıf alan çalışmalar değerlendirilerek Atıf/Ülke seçilerek yapılmıştır. Akış metrelerle ilgili 53 ülkenin makale yayınladığı görülmüştür. Analiz sonucunda 3 küme oluşmuştur. En fazla çalışmanın 244 makaleyle Çin tarafından yapıldığı tespit edilmiştir. Ülkemizde ise 1 yayın yapılmıştır. Akış metrelerle ilgili çalışma yapan ülkelerin ağ bağlantısı Şekil 7'de, en fazla çalışma yapan 5 ülke ve atıf sayıları Tablo 5'te verilmiştir. Akış metrelerle ilgili en fazla makale üreten ülkelerin gelişmiş ülkeler olduğu belirlenmiştir. 1. küme (kırmızı); en fazla makale çalışması yapan ilk üç ülke ve bağlantı sayıları sırasıyla Japonya 31, İran ve Güney Kore 29 bağlantıya sahiptir. 2. küme (yeşil); Çin Halk Cumhuriyeti 270 bağlantı, İngiltere 46 bağlantı ve Amerika Birleşik Devletleri 10 bağlantıyla en çok makale yayınlayan 3 ülkedir. 3. küme (mavi); Slovenya 23 bağlantı, Rusya 15 bağlantı ve Danimarka 6 bağlantıya sahiptir. 4. Küme (sarı); Hindistan 150, İtalya 13 ve Singapur'un 5 bağlantıya sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7. En fazla makale yayımlayan ülkeler ağ analizi.

Tablo 4. En fazla makale yapan ülkeler.

Ülke Adı	Makale Sayısı	Atıf Sayısı	Toplam bağlantı gücü
Çin Halk Cumhuriyeti	244	2290	270
Amerika Birleşik Devletleri	38	595	10
Hindistan	39	526	150
İngiltere	44	486	46
Japonya	37	451	31

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan bu bibliyometrik analiz çalışmasında şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Akış metrelerle ilgili ilk çalışma 1980 yılında yayımlanmış olup, en yoğun yayın üretimi 2022 (64 adet) ve 2023 (61 adet) yıllarında gerçekleşmiştir.
- Çalışmaların %95,9'u İngilizce dilindedir ve en çok "Enstrümanlar ve Enstrümantasyon" (509 çalışma) ile "Makine Mühendisliği" (323 çalışma) alanlarında yoğunlaşmıştır.
- En etkin dergi "Flow Measurement and Instrumentation" dergisi, Xu, Ke-Jun 22 makale ile en çok yayın yapan, Prabhu, S.V. ise 195 atıf ile en etkin yazar olarak öne çıkmaktadır.
- Akış metrelerle ilgili çalışmalarda Çin Halk Cumhuriyeti (244 makale) en fazla makale üreten ülkedir ve onu ABD, Hindistan ve İngiltere takip etmektedir. Türkiye'nin bu alanda WOS kayıtlarında sınırlı (1 yayın) katkısı olduğu görülmüştür.

- Yapılan bibliyometrik analiz sonucunda; Vorteks akış metreler, akışkan fiziği, çok fazlı akışlar, ultrasonik ölçüm teknikleri ve endüstriyel uygulama/kalibrasyon olmak üzere beş ana tematik kümede toplandığı tespit edilmiştir

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] R. P. P. da Silva, F. Samadi, K. Woodbury, and J. Carpenter, 'A low-cost non-intrusive thermal flow meter and fault detector enhanced by machine learning', *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 249, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127260.

[2] F. Liang *et al.*, 'An integrated approach of throttling physical model and machine learning for gas-liquid two-phase flow rates measurement', *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 104, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2025.102866.

[3] A. AL-Dogail, M. Hassan, R. Gajbhiye, A. Alsarkhi, and M. Alnaser, 'Machine learning approaches and multiphase flow characteristics for advancing virtual flow metering', *Machine Learning with Applications*, vol. 24, p. 100865, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.mlwa.2026.100865.

[4] S. U. Wadike, I. Eze Ihua-Maduenyi, and J. K. Oghenetega, '"Application of Machine learning as alternative to multiphase flow meters for Oil Production Rates Estimation Application of Machine Learning as an Alternative to Multiphase Flow Meters for Oil Production Rates Estimation', *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, vol. 10, no. 1, pp. 174–181, 2025.

[5] A. M. Moinfar, G. Shahgholi, Y. A. Gilandeh, and T. M. Gundoshmian, 'The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption', *Energy*, vol. 202, p. 117803, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117803.

[6] K. Rongping, 'Port Ship Energy Consumption Management Based On Beidou Satellite Communication[J]', *Jimei University*, 2017.

[7] J. Yan, S. Li, and R. Li, 'Numerical study on the auxiliary entrainment performance of an ejector with different area ratio', *Appl. Therm. Eng.*, vol. 185, no. August 2020, p. 116369, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116369.

[8] M. Meribout, A. Azzi, N. Ghendour, N. Kharoua, L. Khezzar, and E. AlHosani, 'Multiphase Flow Meters Targeting Oil & Gas Industries', *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 165, p. 108111, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108111.

[9] K. Wen *et al.*, 'Digital twin-driven intelligent control of natural gas flowmeter calibration station', *Measurement*, vol. 217, no. June, p. 113140, 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113140.

[10] S. Dindar, S. E. Akyurt, and M. Sorgun, 'A novel nonlinear regression equation for predicting critical flow velocity in slurry transport: A comparative study with advanced machine learning methods and classical empirical correlations', *Powder Technol.*, vol. 467, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.powtec.2025.121604.

[11] C. Wang and H. Ma, 'Research on a Rapid Three-Dimensional Compressor Flow Field Prediction Method Integrating U-Net and Physics-Informed Neural Networks', *Mathematics*, vol. 13, no. 15, Aug. 2025, doi: 10.3390/math13152396.

[12] T. Barbariol, E. Feltresi, and G. A. Susto, 'Self-diagnosis of multiphase flow meters through machine learning-based anomaly detection', *Energies (Basel).*, vol. 13, no. 12, Jun. 2020, doi: 10.3390/en13123136.

[13] V. N. Nguyen, N. Chung, G. N. Balaji, K. Rudzki, and A. T. Hoang, 'Internet of things-driven approach integrated with explainable machine learning models for ship fuel consumption prediction', *Alexandria Engineering Journal*, vol. 118, pp. 664–680, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.aej.2025.01.067.

[14] W. A. Farag, 'Virtual multiphase flow meter for high gas/oil ratios and water-cut reservoirs via ensemble machine learning', *Exp. Comput. Multiph. Flow*, vol. 7, no. 1, pp. 133–148, Mar. 2025, doi: 10.1007/s42757-024-0199-3.

[15] M. Li, Z. Li, and C. Li, 'Machine learning model with Bayesian optimization for ultrasonic flowmeter in-use measurement', in *Measurement: Sensors*, Elsevier Ltd, May 2025. doi: 10.1016/j.measen.2024.101570.

TORNALAMA OPERASYONLARINDA TOPLAM KESME KUVVETİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE KESTİRİMİ: DESTEK VEKTÖR REGRESYONU (SVR) MODELİ VE PARAMETRİK ANALİZ

Doç. Dr. İbrahim PAZARKAYA
Afyonkocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü 03200 Afyonkarahisar
ORCID ID: 0000-0002-7046-2572

ÖZET
İmalat mühendisliğinin önemli bir alanı olan talaşlı üretim süreçlerinde kesici takımların üzerine gelen kesme kuvvetlerinin doğru tahmin edilmesi, iş parçasının yüzey kalitesinin artırılması, takım tezgâhının güç tüketimi analizi ve kesici takım ömür optimizasyonu üzerinde önemlidir. Bu çalışmada, Paulo Campos tarafından gerçekleştirilen Turning of Titanium alloy using TNMG 160408 and TNMG160404 tools" isimli çalışması sonucunda elde edilen kesme kuvveti tahminine yönelik Destek Vektör Regresyonu (SVR) esaslı bir makine öğrenmesi modeli geliştirilmiştir. Modelleme sürecinde farklı kesme hızları (Vc), ilerleme (f), kesme derinliği (ap) ve kesme boylarında (Lc) yapılan deneyler sonucunda 57 farklı veri noktası kullanılmış ve toplam kesme kuvveti (Fr) tahmin ettirilmiştir. Modelin genelleme yeteneği 5-katlı çapraz doğrulama (5-Fold CV) yöntemiyle test edilmiştir. SVR modelin analiz sonuçlarına göre, belirleyicilik katsayısı (R2) %64,88, ortalama mutlak hata (MAE) 6,27 N ve karesel ortalama hata (RMSE) 8,42 N olarak belirlenmiştir. Böylece, SVR modelin talaşlı üretimin doğasındaki doğrusal olmayan ilişkileri başarıyla öğrendiği ve endüstriyel ortamlarda düşük hatayla bir kestirim modeli olarak kullanılabileceği görülmüştür.
Anahtar kelimeler: Tornalama, Kesme Kuvveti Tahmini, Makine Öğrenmesi, Destek Vektör Regresyonu (SVR).

PREDICTION OF TOTAL CUTTING FORCE IN TURNING OPERATIONS USING MACHINE LEARNING: A SUPPORT VECTOR REGRESSION (SVR) MODEL AND PARAMETRIC ANALYSIS

ABSTRACT
In machining processes, a crucial area of manufacturing engineering, accurately estimating the cutting forces acting on cutting tools is vital for improving workpiece surface quality, analyzing machine tool power consumption, and optimizing tool life.In this study, a machine learning model based on Support Vector Regression (SVR) was developed for cutting force estimation, utilizing the results from the study titled "Turning of Titanium Alloy Using TNMG 160408 and TNMG 160404 Tools" conducted by Paulo Campos. During the modeling process, 57 distinct data points were used from experiments conducted at varying cutting speeds (Vc), feed rates (f), cutting depths (ap), and cutting lengths (Lc), and the total cutting force (Fr) was estimated. The model's generalization ability was tested using 5-fold cross-validation (5-Fold CV). According to the SVR model analysis, the coefficient of determination (R^2) was 64.88%, the mean absolute error (MAE) was 6.27 N, and the root mean square error (RMSE) was 8.42 N. Thus, it was observed that the SVR model successfully learned the nonlinear relationships inherent in turning operations and can be used as a prediction model with low error in industrial settings.
Keywords: Turning, Cutting Force Prediction, Machine Learning, Support Vector Regression (SVR).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Makine öğrenmesi, makineler üzerindeki sensörlerden elde edilen verilerle sistemlerin doğruluğunu artırmak için çeşitli algoritmalarla tahminlerde bulunulması için tercih edilir [1]. Makine öğrenimi algoritmaları sayesinde talaşlı üretim yöntemleriyle malzemelere şekil verilmesi esnasında meydana gelen kesme kuvvetleri ve kesici takım aşınması tahminleri yapılabilir [1]. Takım durumu izleme (TCM) sistemleri üzerine yapılan bir çalışmada, yapay zekâ (AI) ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojilerinin endüstriyel ortam uygulamalarında çeşitli fabrikalar arasında paylaşılan veri setleriyle çözümler önerilmiştir. Ayrıca TCM sistemlerinin önümüzdeki yıllardaki beklentileri belirtilmiştir [2]. Kesici takım dinamiği tahminine için bir ML modeli öneren bir diğer çalışmada, sonlu elemanlar (FE) yöntemiyle veriler elde edilmiş ve takım – takım tutucu bilgileriyle modal analiz sonuçlarının tahminine yönelik birden fazla yapay sinir ağı (YSA) eğitildiği tespit edilmiştir. Eğitilen bu YSA'ların ilk üç titreşim modunu %4,25'lik bir başarıyla tahmin ettiği tespit edilmiştir [3]. Çeşitli kesme şartlarında gerçekleştirilen frezeleme işlemi esnasında, iş mili gücü ve eksenel kuvvet sinyal verileriyle ML ve beş topluluk modeli analizi yapılan bir çalışmada, topluluk modellerinin, ML modele göre daha iyi bir performans sergilediği belirlenmiştir [4].

Takım aşınmasının belirlenmesine yönelik Bohler çeliği tercih edilen çalışmada, serbest yüzey aşınması (flank wear) hem gerçek hem de sanal şartlar altında kesme işlemine hangi ortamın en sağlıklı olduğu ML modelleriyle belirlendiği görülmüştür [5]. Benzer şekilde AA7075 alüminyum alaşımının tornalanması sırasında meydana gelen kesici takım aşınmasını tahmin etmek için ML ve görüntü işleme yönteminin tercih edildiği bir diğer çalışmada, gerçek değerler ve görüntü işleme modeli arasında oluşan farkın %3,5 olduğu beyan edilmiştir [6]. Evrişimli sinir ağı (CNN) ve çok aşamalı Wiener tercih edilen ve kesici takım ömür (RUL) tahmini yapabilen hibrit bir ML modelin önerildiği çalışmada, parametreleri tahmin etmek ve güncellemek amacıyla sırasıyla maksimum olabilirlik tahmini ve Bayes yöntemleri kullanılmış ve farklı aşınma şartlarındaki RUL değerine karşılık gelen olasılık fonksiyonu elde edilmiştir [7]. AISI 4140 çeliğinin kuru tornalama şartları altında titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve akustik etkilerinin incelendiği ve tepkileri tahmin etmek için ML yaklaşımı tercih edildiği belirlenmiştir [8].

Cam elyaf takviyeli (GFRP) kompozit malzemenin delinmesi sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve delaminasyon arasındaki bağlantının incelendiği araştırmada, beş ML regresyon modeli (Doğrusal Regresyon; Karar Ağacı Regresörü; Ada Boost'lu Karar Ağacı Regresörü; XGBRF Regresörü; Gradyan Artırma Regresörü) tercih edildiği belirlenmiştir [9]. Cam elyaf alüminyum takviyeli epoksi (GLARE) kompozit malzemenin delik delme işlemi sırasında delaminasyon hasarının araştırıldığı bir diğer çalışmada, derin sinir ağları (DNN) ve uzu-kısa süreli bellek (LSTM) makine öğrenmesi modelleriyle delaminasyon tahmini yapıldığı görülmüş ve ML modellerin sırasıyla %95 ve %98 oranında tahmin yeteneği olduğu beyan edilmiştir [10]. Al-Mg esaslı metal kompozitlerin şekillendirilmesi sırasında yüzey pürüzlülüğü tahminine yönelik ML metodunun uygulandığı tespit edilmiş ve ML modelin ortalama karesel hata (MSE) ve tahmin hatası (FPE) ile doğrulandığı görülmüştür [11]. İmalat sektöründe çalışan teknisyenlerin, tornalama işlemi öncesinde kendi tecrübelerine göre belirledikleri ilerleme miktarı hatalarını en aza indirmeyi amaçlayan bir diğer çalışmada, Sandvik Coromant firmasına ait 2020 kataloğundan üç farklı kesici takıma ait verilerle DNN ve LSTM makine öğrenmesi modelleri eğitilmiş ve en uygun ilerleme değerini tahmin edebilen bir makine öğrenmesi modeli geliştirildiği görülmüştür [12].

Tornalama işleminin gerçekleştirilebilmesi için kesme kuvvetinin tahminine yönelik rastgele orman regresörü (RF), gradyan artırıcı regresör (GBR) ve aşırı gradyan artırıcı regresör (XGBoost) makine öğrenmesinin kullanıldığı çalışmada; R^2 değerleri RF için 0,9026, GBR için 0,91148 ve XGBoost model için 0,93628 olarak tespit edilmiş ve XGBoost modelin tahmin yeteneğini diğerlerine göre daha iyi olduğu beyan edilmiştir [13]. Tornalama işlem parametrelerini iyileştirmek için hazırlanan bir diğer çalışmada; rastgele orman, XGBoost ve karar ağacı modellerinin performansları değerlendirilmiş ve en iyi tahmin gücüne sahip modelin XGBoost olduğu beyan edilmiştir [14].

Talaşlı üretimin en önemli değişkenlerden birisi kesme kuvvetidir; bu kuvvet, iş parçasını üretmek için gerekli olan enerjiyi, kesici takım ömrünü ve iş parçasının yüzey kalitesini etkilemektedir. Ayrıca üretim maliyetini düşürmenin yolu kesme kuvvetlerini minimum seviyede tutulmasından geçmektedir [13]. Bu sebeple kesme kuvvetlerinin önceden tahmin edilmesi, iş parçasının şekillendirilmesi sırasında enerji tasarrufu sağlayacak, iş parçasının yüzey kalitesini ve kesici takım ömrünü artıracaktır.

Bu çalışmada, Paulo Campos'a ait "Turning of Titanium alloy using TNMG 160408 and TNMG160404 tools" isimli veri seti [15] kullanılarak Destek Vektör Regresyonu (SVR) makine öğrenmesi modeliyle kesici takım üzerine gelen kesme kuvvetlerinin bileşkesi (F_r) tahmini gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS and METHOD)

Paulo Campos tarafından oluşturulan ve bir Excel tablosu halinde sunulan Turning of Titanium alloy using TNMG 160408 and TNMG160404 tools" isimli çalışma [15] SVR makine öğrenmesi modeli için veri setine dönüştürülmüştür. Veri setinde kesme kuvvetleri 100 mm ve 50 mm tornalama boyunda elde edilmiştir. Excel tablosuna her bir kesme boyunda sırasıyla "Lc=100 mm - R=0,4 mm", "Lc=50 mm - R=0,4 mm" ve "Lc=50 mm - R=0,4 mm - Parâm=0,8" sayfa isimleriyle ayrı ayrı olacak şekilde kaydedilmiştir. Bu çalışmada, bu sayfalarda bulunan veriler tek bir sayfa olacak şekilde ve toplamda 57 veri olarak "csv" uzantılı olarak kaydedilmiştir. Veri setindeki hiçbir değer değiştirilmemiştir.

Yeni oluşturulan veri setindeki ortalama kesme kuvveti (Fc), ortalama ilerleme kuvveti (Ff) ve ortalama radyal kuvvet (Fp) değerleriyle Eşitlik 1'de verilen eşitlikle bileşke kuvvet (Fr) hesaplanmıştır.

$$F_r = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (1)$$

SVR model Spyder IDE ortamında Python dilinde oluşturulmuştur. Kesici takımın burun radyusu sabit olduğundan veri setine dahil edilmemiştir. SVR modele girdi parametreleri olarak kesme hızı (Vc, m/dk), ilerleme miktarı (f, mm/dev), kesme derinliği (ap, mm) ve tornalama boyu (Lc, mm) belirlenmiştir. Çıktı parametresi ise Fr olarak ayarlanmıştır. Girdi parametreleri "RobustScaler" ile ölçeklendirilmiştir. SVR modelin hiper parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. SVR modelinin tahmin performansını en üst seviyeye çıkarmak ve aşırı öğrenme (overfitting) riskini minimize etmek amacıyla hiper-parametreler deneme-yanılma yöntemiyle değil, sistematik bir ızgara araması (GridSearchCV) ile belirlenmiştir. Ayrıca belirlenen arama uzayındaki her bir parametre kombinasyonu, 5-katlı çapraz doğrulama (5-Fold CV)

süzgecinden geçirilerek tüm veri alt gruplarında test edilmiştir. SVR modele ait Python kodları Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. SVR modelin hiper parametreleri.

Hiper parametre	Seçilen optimum değer	Görevi
Çekirdek fonksiyon	RBF	Giriş parametreleri ile toplam kuvvet arasındaki doğrusal olmayan (non-linear) ilişkileri yüksek boyutlu uzayda modellemeyi sağlar.
Ceza katsayısı (C)	500	Modelin eğitim verisindeki hatalara ne kadar tolerans göstereceğini belirler. Yüksek değer, karmaşık trendlerin yakalanmasını sağlar.
Epsilon (e)	0,001	Modelin tahminde bulunurken hata olarak kabul etmeyeceği hoşgörü tünelinin genişliğidir. Küçük değer, hassas bir fit sağlar.
Gamma (g)	0,01	Tek bir deney noktasının model üzerindeki etki menzilini belirler. Düşük değer, aşırı öğrenmeyi (overfitting) engelleyerek pürüzsüz sınırlar çizer.
Ölçeklendirme	RobustScaler	Girdileri medyan ve IQR ile ölçeklendirerek, deneysel gürültülere ve uç değerlere (outliers) karşı modeli dirençli kılar.



```
# Girdi parametreleri
features = ['Vc (m/min)', 'f (mm/rev)', 'ap (mm)', 'Lc (mm)']
X = df[features]

# Toplam (Bileşke) Kuvvetin Hesaplanması (Fr)
df['Mean Fr (N)'] = np.sqrt(df['Mean Fc (N)']**2 + df['Mean Ff (N)']**2 + df['Mean Fp (N)']**2)
y = df['Mean Fr (N)']

# 2. Çapraz Doğrulama Ayarları (%20 Test Oranı - 5-Fold)
kf = KFold(n_splits=5, shuffle=True, random_state=42)

# 3. SABİT OPTİMUM PARAMETRELERLE MODEL TANIMLAMA
# GridSearchCV kaldırıldı, en iyi parametreler doğrudan SVR içine yazıldı
best_model = Pipeline([
    ('scaler', RobustScaler()),
    ('svr', SVR(C=500, degree=2, epsilon=0.001, gamma=0.01, kernel='rbf'))
])

print("Model sabit optimum parametrelerle doğrudan eğitiliyor ve katman bazlı analiz yapılıyor...\n")

# 4. Her Bir Katman (Fold) İçin Hesaplama Döngüsü
fold_results = []
all_y_actual = []
all_y_pred = []

for fold_idx, (train_idx, test_idx) in enumerate(kf.split(X, y), 1):
    X_train, X_test = X.iloc[train_idx], X.iloc[test_idx]
    y_train, y_test = y.iloc[train_idx], y.iloc[test_idx]

    # Modeli bu katmanın verisiyle eğitiyoruz
    best_model.fit(X_train, y_train)
    y_pred = best_model.predict(X_test)

    # Katman bazlı performans ölçümleri
    r2_f = r2_score(y_test, y_pred)
    mae_f = mean_absolute_error(y_test, y_pred)
    mse_f = mean_squared_error(y_test, y_pred)
    rmse_f = np.sqrt(mse_f)

    fold_results.append({
        'Katman (Fold)': f'Fold {fold_idx}',
        'R2 Skoru': round(r2_f, 4),
        'MAE': round(mae_f, 4),
        'MSE': round(mse_f, 4),
        'RMSE': round(rmse_f, 4)
    })

    # Grafikler için değerleri topluyoruz
    all_y_actual.extend(y_test)
    all_y_pred.extend(y_pred)

# Sonuçları Tabloya Dönüştürme ve Ortalama Satırı Ekleme
fold_df = pd.DataFrame(fold_results)
mean_row = pd.DataFrame([{
    'Katman (Fold)': 'Ortalama (Mean)',
    'R2 Skoru': round(fold_df['R2 Skoru'].mean(), 4),
    'MAE': round(fold_df['MAE'].mean(), 4),
    'MSE': round(fold_df['MSE'].mean(), 4),
    'RMSE': round(fold_df['RMSE'].mean(), 4)
}])
fold_df = pd.concat([fold_df, mean_row], ignore_index=True)

print("--- KATMAN BAZLI (FOLD-BY-FOLD) PERFORMANS TABLOSU ---")
print(fold_df.to_string(index=False))
print("\nKullanılan Optimum Parametreler: C=500, degree=2, epsilon=0.001, gamma=0.01, kernel='rbf'\n")
```

Şekil 1. SVR modelin Python kodları.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Bu çalışmada, Paulo Campos tarafından oluşturulan tornalama işleminden elde edilen deneysel verilerle [15] eğitilen SVR modelinin kararlılığı, genelleme yeteneği ve tahmin başarıları 5-katlı çapraz doğrulama yöntemiyle incelenmiştir. Katman bazlı (Fold-by-Fold) elde edilen istatistiksel performans kriterleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2 incelendiğinde, 5 foldda elde edilen belirlilik katsayılarının (R2) 0,4016 – 0,8398 arasında olduğu belirlenmiştir. SVR model Fold 4(%83,98), Fold 2 (%75,38) ve Fold 5'te (%71,59) yüksek varyans oranı yakalamıştır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir, RobustScaler ölçeklendirmesi ve RBF çekirdek fonksiyon optimizasyonuyla, tornalama girdi parametreleri

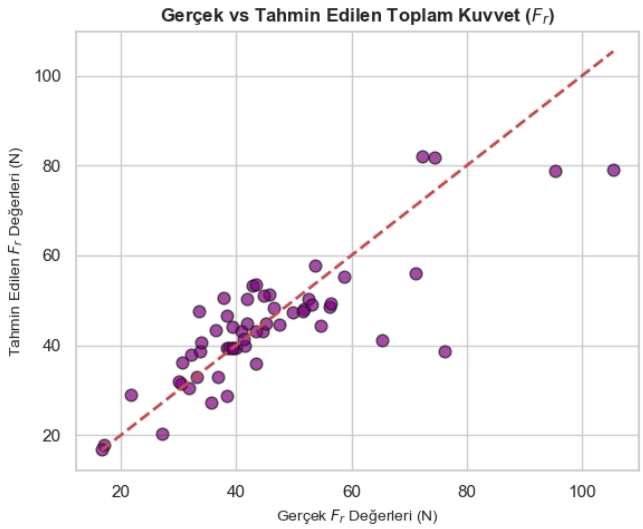
olan Vc, f, ap, Lc ile çıktı parametresi olan Fr arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri başarıyla tespit edebildiği görülmüştür. Diğer taraftan Fold 1'de R2 değerinin %40,16 seviyesinde olması, talaşlı üretim süreçlerinin rastgele doğasıyla ilişkilendirilebilir. Çapraz doğrulamada veri seti rastgele olarak ayrılır. Böylece Fold 1'e denk gelen test verileri, kesici takımda meydana gelen aşınma mekanizmaları, anlık tezgah titreşimleri veya malzemenin mikro yapısındaki değişikliklerden kaynaklanan gürültüleri ve uç değerlere (outliers) sahip olduğu düşünülmektedir. Parça şekillendirmenin doğası gereği bu anlık dinamik değişimlerden dolayı Fold 1'de düşük bir değer almıştır. Ancak, ortalama R2 değeri ele alındığında (R2=%64,88) SVR modelin kararlı olduğunu göstermektedir. Elde edilen %64,88'lik ortalama R2 değeri mühendislik uygulamaları ve talaşlı imalatın karmaşık doğası göz önüne alındığında akademik olarak anlamlı ve uygun bir değer olarak değerlendirilebilir. Çünkü, istatistiksel literatürde, bir modelin başarısı sadece çok yüksek R2 değerlerine bağlı değildir. Literatürde, pratikte varyasyonun %30 ila %40'ının açıklanması önemli değerde bilgiler sağlayabileceği belirtilmiştir [16].

SVR modelin başarısını istatiksel olarak sadece R2 değeri üzerinden değil, aynı zamanda mühendislik toleransları üzerinden değerlendirmek için MAE, MSE ve RMSE değerleri de elde edilmiştir. Beş katlı çapraz doğrulama sonuçlarının MAE ortalaması 6,2786 N ve RMSE değeriyse 8,4273 N olarak belirlenmiştir. Tornalama işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetleri oldukça yüksek kuvvet değerlerine çıkabilmektedir. Bu nedenle, SVR modelin ortalama bileşke kuvvetini tahmin ederken yalnızca 8,42 N'luk sapması, mühendislik açısından oldukça iyi bir sonuçtur. Özellikle en yüksek RMSE değerinin alındığı Fold 1'de bile bu değer 15,72 N seviyesinde olması, modelin en kötü durumda bile endüstriyel olarak kabul edilebilir bir hatayla çalıştığını göstermekte ve aşırı öğrenme sorunu yaşamadığını ortaya koymaktadır.

Tablo 2. SVR modelin başar metrikleri.

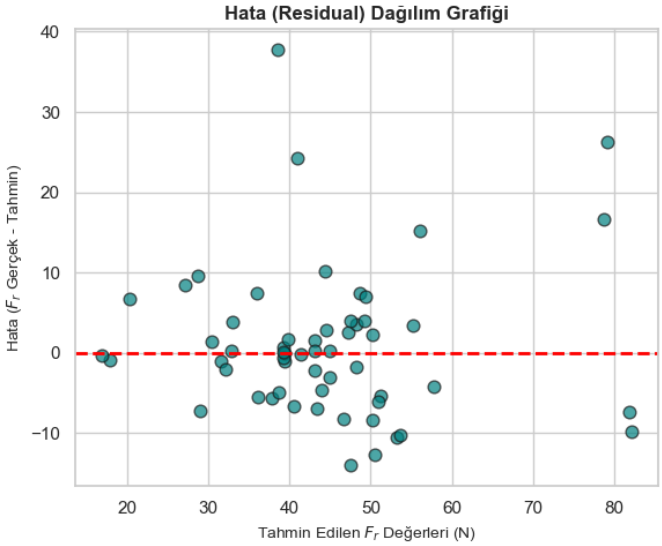
Katman (Fold)	R^2 skoru	MAE	MSE	RMSE
Fold 1	0,4016	10,8859	247,4181	15,7295
Fold 2	0,7538	4,4218	35,9914	5,9993
Fold 3	0,5329	3,8016	25,0493	5,0049
Fold 4	0,8398	7,0032	69,4062	8,3310
Fold 5	0,7159	5,2805	50,0073	7,0716
Ortalama	0,6488	6,2786	85,5745	8,4273

Şekil 2'de SVR modelin gerçek ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması görselleştirilmiştir. Şekil 2'deki kırımızı kesikli çizgi (referans çizgi), modelin mükemmel tahminini göstermektedir. Mor renkteki deneysel veri noktalarının büyük bölümü referans çizgisi etrafında, doğrusal bir şekilde kümelendiği görülmüştür. Bu durum, SVR modelin Fr kuvvetinin genel trendini başarıyla öğrendiğini şeklinde yrumlanabilir. Özellikle 40 – 140 N aralığında veriler referans çizgiye neredeyse yapışıktır. Bu durum, SVR modelin veri setinde olmayan imalat parametrelerinde kararlı ve hassas tahminler yapabileceğini göstermektedir. Kuvvet değerinin 140 N üzerinde olduğu durumda, veri noktalarının referans çizgiden uzaklaştığı görülmektedir. Bu durum çok doğaldır. Çünkü talaş derinliğinin artması veya ilerlemenin en yüksek değerlerde çalıştığı sonucuna varılabilir. Bu sınırlarda takım tezgahında anlık titreşimler ve kesici takım aşınmaları olabileceğinin bir göstergesidir. Ancak bu sapmalar bile makul sınırlar içerisinde kalmıştır.



Şekil 2. SVR modelin gerçek ve tahmin değerleri.

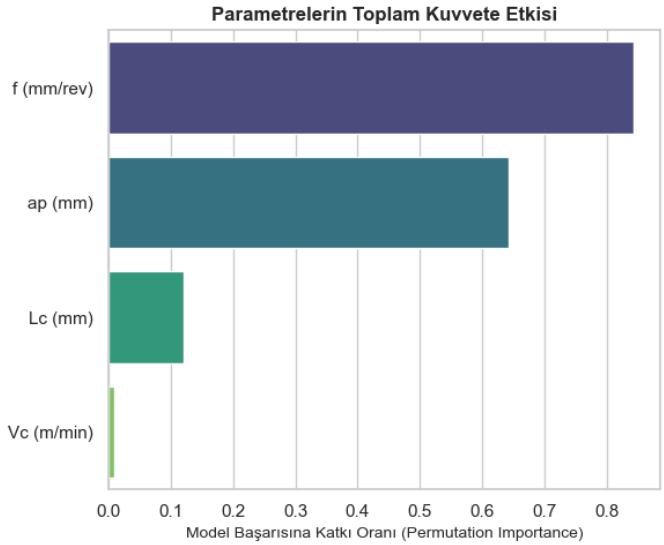
SVR modele ait hata dağılım grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Mavi-yeşil renkli deneysel veri noktaları hem sıfır çizgisinin altında hem de üzerinde büyük oranda homojen bir şekilde dağılması, modelin kakarlı çalıştığının kanıtıdır. Matematiksel olarak modelin sabit bir yönde yanlılık (bias) barındırmadığını göstermektedir. Noktaların belirli bir geometrik şekil (huni, U veya sinüs dalgası gibi) almamıştır. SVR modelin girdi parametrelerindeki tüm anlamlı fiziksel ilişkileri ve ana trendleri başarıyla ayırabildiği, kalan hataların ise tamamen tornalama işleminin doğasından kaynaklı gürültüler olduğu bu şekilde kanıtlanmıştır.



Şekil 3. SVR modelin hata dağılım grafiği.

Önem özellik grafiği (Şekil 4) incelendiğinde en büyük katkıyı ilerleme miktarının verdiği görülmüştür. İmalat mühendisliğinde ilerleme miktarı kesici takımın bir devirde kaldırdığı talaş kalınlığını (h) belirleyen en önemli parametredir. Talaş kalınlığındaki artış, kesici takım ve iş parçası arasındaki sürtünme ve plastik deformasyonu logaritmik olarak artıran en önemli unsurdur. SVR modelin ilerleme miktarını en önemli parametre seçmesi imalat teorisiyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Modelin kesme derinliğini ikinci önemli parametre olarak

seçmesi, kesme derinliğinin kesilmemiş talaş derinliği alanının genişliğini (b) belirlemesidir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir, kesme derinliği arttıkça kesici takımın iş parçasıyla temas eden kenar uzunluğu artar ve kesme kuvvetlerini büyütür. Şekil 4'te ilerme miktarı ve kesme derinliğinin toplam önem derecesinin yaklaşık %80- 90'ını oluşturması, kesme kuvvetlerini oluşturan ana unsur olan kesilmemiş talaş kesit alanıdır (A=ap□f). Böylece SVR modelin deneysel verilerden bu durumu öğrendiği sonucuna varılabilir. Kesme hızının düşük çıkması, belirli bir kritik hızın üzerine çıkıldığında kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasıyla birlikte malzemesinin kesme bölgesinde yumuşaması ve sürtünme katsayısının düşmesine neden olur. SVR modelin kesme hızına düşük önem vermesi termal-mekanik dengenin doğru bir şekilde anlamlandırdığını göstermektedir. Modelin kararlılığına en az katkı sağlayan parametre kesme boyu olmuştur. Kesme boyu, operasyonun ilerleyişini ve takımın toplam katettiği mesafeyi gösterir. İşleme esnasında rijitlik dalgalanmaları veya aşınma takibi açısından bir trend sunsa da anlık kesme kuvvetinin büyüklüğünü doğrudan belirleyen geometrik bir çarpan değildir. Bu nedenle listenin en altında kalması tamamen mantıklıdır.



Şekil 4. SVR modelin önem özellik grafiği.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, tornalama operasyonlarında kesici takım üzerindeki bileşke kuvveti (Fr) tahmin etmek üzere geliştirilen makine öğrenmesi modeli (SVR) istatistiksel ve fiziksel açıdan değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgularla aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Geliştirilen SVR modeli, 5-katlı çapraz doğrulama testlerinin genel ortalamasında %64,88 (R2) varyans açıklama oranına ulaşmıştır. Çapraz doğrulamadaki bazı katmanlarda bu oranın %83,98 seviyelerine kadar çıkması, modelin statik kesme parametreleriyle toplam kuvvet arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi başarıyla modellediğini göstermektedir.
- Oldukça yüksek kuvvet seviyesine ulaşabilen kesme kuvvetleri tahmininde, modelin ortalama hatasının (MAE) yalnızca 6.27 N ve karesel standart sapmasının (RMSE) 8.42 N seviyesinde kaldığı görülmüştür. Bu düşük hata, geliştirilen modelin takım ömrü hesaplamaları ve tezgâh emniyet sınır şartlarının belirlenmesinde sanayi düzeyinde uygulanabilir olduğunu kanıtlamıştır.
- Özellik önemi (Feature Importance) analizi sonuçlarına göre, toplam kesme kuvvetini belirleyen en baskın girdi parametreleri sırasıyla ilerleme miktarı (f, mm/rev) ve talaş derinliği

(ap, mm) olmuştur. SVR modelinin tamamen deneysel verilerden yola çıkarak, talaş kaldırma mekaniğindeki kesilmemiş talaş kesit alanı teorisini doğrulaması, geliştirilen algoritmanın sağlamlığını tescillemiştir.

- Sonuçlar; pahalı donanımlara ve uzun deneysel süreçlere ihtiyaç duyan dinamometre testleri yerine, optimize edilmiş bir makine öğrenmesi modelinin talaşlı üretim alanında hızlı, güvenilir ve uygun maliyetli bir dijital kesme kuvveti tahmin aracı olarak tercih edilebileceğini ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

"Turning of Titanium alloy using TNMG 160408 and TNMG160404 tools" isimli veri setini [15] hazırlayan Paulo Campos'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, "Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools, A review," *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, vol. 2, no. October 2022, p. 100009, 2023, doi: 10.1016/j.smse.2023.100009.

[2] M. Q. Tran, H. P. Doan, V. Q. Vu, and L. T. Vu, "Machine learning and IoT-based approach for tool condition monitoring: A review and future prospects," *Measurement (Lond).*, vol. 207, no. December 2022, p. 112351, 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2022.112351.

[3] H. Mostaghimi, S. S. Park, D. Y. Lee, S. Nam, and E. Nam, "Prediction of Tool Tip Dynamics Through Machine Learning and Inverse Receptance Coupling," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 24, no. 10, pp. 1739–1752, 2023, doi: 10.1007/s12541-023-00831-6.

[4] A. Schueller and C. Saldaña, "Indirect Tool Condition Monitoring Using Ensemble Machine Learning Techniques," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 145, no. 1, pp. 1–10, 2023, doi: 10.1115/1.4055822.

[5] M. E. Korkmaz *et al.*, "Prediction and classification of tool wear and its state in sustainable machining of Bohler steel with different machine learning models," *Measurement (Lond).*, vol. 223, no. November, 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113825.

[6] M. E. Korkmaz, M. K. Gupta, E. Çelik, N. S. Ross, and M. Günay, "Tool wear and its mechanism in turning aluminum alloys with image processing and machine learning methods," *Tribol. Int.*, vol. 191, no. November 2023, p. 109207, 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2023.109207.

[7] X. Zhang, B. Shi, B. Feng, L. Liu, and Z. Gao, "A hybrid method for cutting tool RUL prediction based on CNN and multistage Wiener process using small sample data," *Measurement (Lond).*, vol. 213, no. October 2022, p. 112739, 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.112739.

[8] I. Asiltürk, M. Kuntoğlu, R. Binali, H. Akkuş, and E. Salur, "A Comprehensive Analysis of Surface Roughness , Vibration ," *Metals (Basel).*, vol. 13, p. 437, 2023, doi: 10.3390/met13020437.

[9] K. Biruk-Urban, P. Bere, and J. Józwik, "Machine Learning Models in Drilling of Different Types of Glass-Fiber-Reinforced Polymer Composites," *Polymers (Basel).*, vol. 15, no. 23, 2023, doi: 10.3390/polym15234609.

[10] E. Ekici, İ. Pazarkaya, and G. Uzun, "Delamination and thrust force analysis in GLARE: Influence of tool geometry and prediction with machine learning models," *J. Compos. Mater.*, vol. 59, no. 10, pp. 1233–1249, 2025, doi: 10.1177/00219983241305706.

[11] R. Sekhar, T. P. Singh, and P. Shah, "Machine learning based predictive modeling and control of surface roughness generation while machining micro boron carbide and carbon

nanotube particle reinforced Al-Mg matrix composites," *Particulate Science and Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 355–372, 2022, doi: 10.1080/02726351.2021.1933282.

[12] İ. Pazarkaya, "Prediction of cutting tool insert parameters using machine learning and its application to industry: Performance of DNN and LSTM models," *Expert Syst. Appl.*, vol. 279, no. April, pp. 0–2, 2025, doi: 10.1016/j.eswa.2025.127471.

[13] V. Kumar, V. Dubey, and A. Kumar Sharma, "Comparative analysis of different machine learning algorithms in prediction of cutting force using hybrid nanofluid enriched cutting fluid in turning operation," *Mater. Today Proc.*, May 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.216.

[14] C. C. Wang, P. H. Kuo, and G. Y. Chen, "Machine Learning Prediction of Turning Precision Using Optimized XGBoost Model," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/app12157739.

[15] P. Campos, "Turning of Titanium alloy using TNMG 160408 and TNMG160404 tools," *Mendeley Data, V1*, , 2018.

[16] Douglas. C. Montgomery, Elizatbeth. A. Peck, and Geoffrey. G. Vining, *INTRODUCTION TO LINEAR REGRESSION ANALYSIS*, 5th ed. 2012.

OSMANLI ULEMASININ İCÂZETNÂMELERİ

Doç. Dr. Esra YILDIZ
Yalova Üniversitesi, İlahiyat Fakültesi, İslâm Tarihi ve Sanatları, Yalova, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1236-7446

ÖZET

Bu çalışma, Osmanlı ulemasının ilmî kimliğinin teşekkülünde temel belgelerden biri olan icâzetnâmeleri eğitim tarihi, ilmiye teşkilâtı, bilgi dolaşımı, hoca-talebe ilişkileri ve ilmî meşruiyet bağlamında incelemektedir. İcâzet, modern diplomadan farklı olarak yalnızca belirli bir öğretim programının tamamlandığını değil, bir hocanın talebesinin ilmî ehliyetine şahsen şahitlik ettiğini ve ona bilgiyi öğretme, nakletme veya belirli bir eseri rivayet etme yetkisi verdiğini ifade etmektedir. Osmanlı Devleti'nde icâzetnâmeler, bir taraftan klasik İslâm eğitim geleneğinin şahıs merkezli yapısını devam ettirirken diğer taraftan mülâzemet, ruûs, müderrislik ve kadılık gibi devlet tarafından düzenlenen kariyer mekanizmalarıyla yan yana var olmuştur. Makalede icâzetin kavramsal ve tarihî kökenleri, Osmanlı medrese sistemindeki yeri, icâzetnâmelerin diplomatik ve fizikî özellikleri, ilmî silsilelerin anlamı, metinlerdeki dua ve nasihat dili, farklı icâzet türleri, ilmiye kariyeriyle ilişkisi ele alınmaktadır. Çalışmanın temel tezi, Osmanlı icâzetnâmesinin yalnızca bir mezuniyet belgesi olmadığı; bilgi, ahlâk, şahsî tanıklık, isnad, aidiyet ve yetkilendirmeyi aynı metinde birleştiren çok katmanlı bir "ilmî güven belgesi" olduğudur. Tebliğde icazetnamelerin; rivayet, tedris, tasavvuf, Kur'an-ı Kerim kıraati, hadis ve fıkıh icazetleri gibi türleri tasnif edilmekte; bu belgelerde kullanılan üslup, mühürler, hoca silsilesi, şecere kayıtları ve icazet zincirlerinin coğrafî dolaşımı analiz edilmektedir. Ayrıca, icazetnamelerin ulemanın sosyal konumunu nasıl etkilediği; kadılık, müderrislik veya şeyhlik gibi ilmî-bürokratik görevlere tayinde ne derece belirleyici olduğu incelenmektedir. Tebliğin temel bulguları, icazetnamelerin Osmanlı ilmî hiyerarşisinin kurumsallaşmasında anahtar bir rol oynadığını göstermektedir. Ulemanın ilmî kimliğini tanımlayan bu belgeler, hem metin aktarımında sürekliliği, hem de ilmî otoritenin kuşaktan kuşağa aktarımını mümkün kılmıştır. Ayrıca icazetnameler, Osmanlı entelektüel hayatının coğrafyalar arası (İstanbul, Halep, Şam, Kahire, Balkan şehirleri) bağlantılarını görünür kılmakta; eğitim ağlarının izlenebilmesine imkân veren önemli biyografik ve sosyolojik veriler sunmaktadır. Bu çerçevede tebliğ, Osmanlı'da ilmî geleneğin sürekliliğini sağlayan icazet sisteminin hem arşiv belgeleri hem de biyografik kaynaklar ışığında yeniden değerlendirilmesini amaçlamakta; günümüz tarihçiliğinde icazetnamelerin yalnızca eğitim belgeleri değil, aynı zamanda ilmî, sosyal ve kültürel otorite kayıtları olarak da okunması gerektiğini ileri sürmektedir.

Anahtar Kelimeler: İslam Tarihi, Şeyhülislamlık, Ulema, İcazet, Akademik Diploma.

THE IJĀZAH CERTİFİCATES OF THE OTTOMAN ʿULAMĀʾ

ABSTRACT

This study examines ijāzātnāmas, one of the fundamental documentary sources for understanding the formation of the scholarly identity of the Ottoman ʿulamāʾ, within the contexts of educational history, the organization of the learned establishment (ʿilmiyye), the circulation of knowledge, teacher–student relationships, and scholarly legitimacy. Unlike the modern diploma, an ijāza did not merely certify the completion of a prescribed course of study; rather, it signified a teacher's personal attestation to a student's scholarly competence and conferred upon the recipient the authority to teach and transmit knowledge or to transmit a particular work. In the Ottoman context, ijāzātnāmas, on the one hand, preserved the person-

centred character of the classical Islamic educational tradition, while, on the other, they coexisted with state-regulated mechanisms of scholarly and bureaucratic advancement, including mulāzama, ruʾūs appointments, professorships (mudarrislik), and judgeships (qāḍīlik). The study addresses the conceptual and historical origins of the ijāza, its place within the Ottoman madrasa system, the diplomatic and physical characteristics of ijāzātnāmas, the significance of scholarly chains of transmission, the language of prayers and ethical counsel contained in these documents, different types of ijāza, their relationship to careers within the ʿilmiyye, their value as sources for reconstructing scholarly networks and geographical mobility, and their transformation during the nineteenth and twentieth centuries. Its central argument is that the Ottoman ijāzātnāma should not be regarded merely as a certificate of graduation; rather, it constituted a multilayered "document of scholarly trust" that brought together knowledge, ethical formation, personal testimony, chains of transmission (isnād), scholarly affiliation, and authorization within a single textual framework. The paper classifies ijāzātnāmas into several categories, including ijāzas for transmission (riwāya), teaching (tadrīs), Sufi authorization, Qurʾānic recitation and audition, hadith transmission, and jurisprudential and rhetorical disciplines. It further analyses their textual style, seals, teacher–student chains, genealogical records, and the geographical circulation of ijāza networks. Particular attention is also paid to the extent to which ijāzātnāmas shaped the social and scholarly standing of the ʿulamāʾ and whether, or to what degree, they played a determining role in appointments to scholarly-bureaucratic offices such as judgeships, professorships, and positions of religious or Sufi authority. The principal findings of the study indicate that ijāzātnāmas played a significant role in the institutionalization and reproduction of the Ottoman scholarly hierarchy. As documents that contributed to defining the scholarly identity of the ʿulamāʾ, they facilitated both continuity in textual transmission and the intergenerational transfer of scholarly authority. Moreover, ijāzātnāmas render visible the interregional connections of Ottoman intellectual life across major centres such as Istanbul, Aleppo, Damascus, Cairo, and the cities of the Balkans. In doing so, they provide valuable biographical and sociological evidence that enables historians to trace educational networks, scholarly mobility, and patterns of intellectual exchange. Within this framework, the paper seeks to reassess the institution of ijāza as a mechanism that contributed to the continuity of the Ottoman scholarly tradition, drawing upon both archival documents and biographical sources. It ultimately argues that, in contemporary historiography, ijāzātnāmas should be read not merely as educational certificates, but also as records of scholarly, social, and cultural authority.

Keywords: Islamic History, The Office of the Shaykh al-Islam, the Ulamâ', Ijazah, Academic Diploma.

GİRİŞ

Osmanlı ilim ve eğitim tarihini yalnızca medrese binaları, vakfiyeler, ders programları ve resmî tayin kayıtları üzerinden okumak, ilmî otoritenin nasıl üretildiğini bütünüyle açıklamaya yetmez. Ulemanın meslekî ve entelektüel kimliği, kurumsal yapı kadar şahıslar arasında kurulan bilgi aktarım ilişkileri içinde şekillenmiştir. Bu ilişkinin en görünür ve tarihî bakımdan en yoğun belgelerinden biri icâzetnâmedir. İcâzet, sözlük anlamındaki "izin verme, onaylama ve geçerli kılma" çerçevesinden hareketle İslâmî ilimlerde hocanın talebesine belirli bir kitabı, ilmi veya ilimler bütününü öğretme ve nakletme yetkisi vermesini ifade eder. Osmanlı dünyasında bu iznin yazılı biçimi "icâzetnâme" adıyla yaygınlaşmıştır.

İcâzetnâmeyi modern üniversite diplomasının doğrudan karşılığı olarak görmek açıklayıcı olmakla birlikte eksik bir yaklaşımdır. Diploma, esas itibarıyla kurumsal bir otoritenin belirlenmiş müfredat ve sınav süreçlerinin tamamlandığını tasdik ettiği standartlaştırılmış bir

belgedir. Klasik icâzet ise çoğu durumda kurumdan ziyade hocanın ilmî şahsiyetine dayanmaktadır. Yetkinliği tasdik eden merci medrese tüzel kişiliğinden çok, talebeyi ders halkasında gözlemleyen ve onun ilimde ulaştığı seviyeyi değerlendiren müderristir. Bu nedenle icâzetnâme aynı anda hem pedagojik hem biyografik hem de epistemik bir belgedir. Belgenin içinde talebenin adı, hocanın adı, okutulan ilim veya eserler, yetkilendirme ifadeleri, dua ve nasihatler ile çoğu örnekte hocadan geriye doğru uzanan ilmî silsile yer alır. Böylece icâzetnâme, bir kişinin ne bildiği kadar bu bilgiyi kimden aldığı sorusuna da cevap verir.

Osmanlı ilmiye sınıfı, medrese tahsilinden sonra icâzet alan, ardından mülâzemet ve tayin süreçleri vasıtasıyla eğitim, yargı ve fetva sahalarında görev üstlenen geniş bir meslek topluluğuydu. Bu bakımdan icâzet, ilmiye mensubunun ilmî formasyonunu gösteren eşiklerden biri olmakla beraber devlet hizmetine otomatik giriş belgesi değildi. Özellikle XVI. yüzyıldan itibaren mezun sayısının artması, ilmiye kariyerinin mülâzemet ve ruûs gibi ilave mekanizmalarla düzenlenmesini gerekli kılmıştır. Bu ayrım, icâzetnâmeyi doğru yorumlamak için önemlidir. İcâzet ilmî ehliyeti ve nakil yetkisini; mülâzemet ve ruûs ise büyük ölçüde devletin meslekî kadrolara kabul ve tayin düzenini temsil etmektedir.

1. İcâzet Kavramının Tarihî ve Epistemik Arka Planı

İcâzet uygulamasının tarihî kökleri hadis rivayeti geleneğiyle yakından ilişkilidir. Hadis ilminde bilginin güvenilirliği yalnızca metnin içeriğine değil, onu aktaran kişilerin kimliğine ve rivayet zincirinin sürekliliğine de bağlı kabul edilmiştir. Semâ, kıraat, münâvele ve kitâbet gibi tahammül yolları arasında icâzet, hocanın belirli rivayetleri talebesine aktarma izni vermesi şeklinde kurumsallaşmıştır. Zamanla bu yöntem hadis dışındaki fıkıh, tefsir, ferâiz, kıraat, tasavvuf, hat ve diğer ilim ve sanat alanlarına yayılmıştır (Akpınar, 2000, s. 393).

Bu gelişme, İslâm ilim geleneğinde "bilgi" ile "bilgiyi taşıma yetkisi" arasındaki ayrımın önemini göstermektedir. Bir metni elde etmek veya okuyabilmek, o metni öğretmeye yetkili olmakla aynı şey değildir. İcâzet, bilgiyi kişisel emek, ders, müzakere, mütalaa ve hocanın tasdikiyle ilişkilendirerek ilmî aktarımın etik çerçevesini oluşturur. Bu sebeple icâzetnâmelerde sıkça ilmin faziletine, âlimin sorumluluğuna, niyetin ihlâsına ve bilginin ehline aktarılmasına ilişkin ifadeler görülmektedir. Belge yalnızca akademik yeterliliği değil, ilmî davranış idealini de üretmektedir (Yıldız, 2023, s. 321-323).

İcâzetin hususî ve umumî biçimleri arasında önemli bir ayrım vardır. Hususî icâzet belirli bir eser, rivayet, ilim veya uygulama için verilirken umumî icâzet, talebenin daha geniş bir ilimler kümesindeki yetkinliğini ifade etmektedir. Hadis, kıraat veya hat gibi alanlarda belirli bir silsile ve uygulama biçimi daha belirgin iken, umumî ilmî icâzetlerde talebenin farklı disiplinlerdeki birikimi ve tedris ehliyeti öne çıkmaktadır. Osmanlı ulemasının icâzetnâmeleri bu çeşitliliği korumuş; tek bir "standart diploma" tipinden ziyade ilim alanına, hocaya, döneme ve belgenin amacına göre farklılaşan bir belge kültürü ortaya çıkmıştır (Arslan, 2003, s. 291-292).

2. Osmanlı Medrese Sisteminde İcâzetin Yeri

Osmanlı medreseleri, Selçuklu ve daha geniş İslâm eğitim mirasını devralmakla birlikte zamanla dereceleri, mansıpları ve kariyer yolları bakımından kendine özgü bir yapı geliştirmiştir. İznik Medresesi'nden Sahn-ı Semân'a ve Süleymaniye medreselerine uzanan süreçte medrese ağı genişlemiş; ilmiye sınıfının eğitim ve yargı sahalarındaki rolü belirginleşmiştir. Bu kurumsallaşma icâzeti ortadan kaldırmamış; aksine hocaya dayalı ilmî tasdik ile devletin düzenlediği kariyer sisteminin yan yana işlemesine yol açmıştır (Uzunçarşılı, 2014, s. 112-113).

Medrese tahsilinin tamamlanması, öğrencinin bütün hayatı boyunca tek bir kurumun öğrencisi olarak kalması anlamına gelmiyordu. Talebe farklı hocalardan ders okuyabilir, ilmî seviyesini yükseltmek için başka şehirlere gidebilir ve belli eserleri alanının otoritesi sayılan âlimlerden okumaya çalışabilirdi. Bu hareketlilik icâzetnâmelerdeki silsileleri daha da değerli kılmaktadır.

Çünkü silsile, öğrencinin yalnızca son hocasını değildir, o hocanın mensup olduğu ilmî hattı da görünür kılmaktadır. Böylece bir Osmanlı âliminin zihnî ve pedagojik formasyonunu medrese adı kadar hocalar zinciri üzerinden takip etmek mümkün olmaktadır (Kazıcı, 2004, s. 118-119). Osmanlı medrese sisteminde icâzet ile "mezuniyet" arasındaki ilişkinin her dönemde aynı derecede resmî ve standart olmadığı özellikle vurgulanmalıdır. Klasik dönemde icâzet büyük ölçüde hocanın verdiği şahsî ilmî tasdiktir. Devlet, ilmiye kadrolarına girişi ayrıca düzenlemiştir. XVI. yüzyılda mezun sayısının artmasıyla mülâzemet sisteminin sıkılaştırılması, ilmî ehliyetin meslekî kadroya tayin için tek başına yeterli görülmediğini göstermektedir. Medrese derecelerini tamamlayıp icâzet alan adaylar, müderrislik veya kadılık yoluna girmek için mülâzım olarak kayda alınmak ve uygun mansıbı beklemek durumundaydı (Kılıç, 2019, s. 266-268).

Bu noktada icâzetin iki farklı otorite alanı arasında bulunduğu söylenebilir. Birinci alan ilmî cemaatin otoritesidir. Hoca, öğrencisini ehil görür ve ona öğretme veya rivayet yetkisi verir. İkinci alan devletin idarî otoritesidir. İlmiye teşkilâtı, kimin hangi medreseye müderris veya hangi kazaya kadı olarak tayin edileceğini hiyerarşik usullerle belirler. İcâzet birincisinin anahtarı, mülâzemet ve ruûs ise ikincisinin araçlarıdır. Osmanlı modelinin özgünlüğü, bu iki alanı bütünüyle birbirine eritmeden bir arada işletmesinde aranabilir (Idrız, 2003, s. 170-172; İpşirli, 2000, 141-142).

İcâzetnâmeler ayrıca medrese müfredatının fiilî görünümünü anlamak bakımından önem taşımaktadır. Resmî düzenlemeler veya sonradan yazılmış eğitim tarihi eserleri "okutulması gereken" dersleri gösterebilir; icâzetnâmeler ise belirli bir talebenin belirli bir hocayla kurduğu somut öğretim ilişkisini belgeleyebilir. Özellikle eser adlarının kaydedildiği icâzetler, hangi metinlerin dolaşımda olduğunu, hangi şerh ve hâşiyelerin öğretim zincirlerinde yer aldığını ve bir ilim dalının hangi otoriteler üzerinden temsil edildiğini göstermesi bakımından birinci elden veri sunmaktadır.

3. İcâzetnâmenin Diplomatik Yapısı ve Metin Unsurları

Osmanlı icâzetnâmeleri, biçim ve hacim bakımından birbirinden farklı olmakla birlikte belirli bir metin mantığını paylaşmaktadır. Genellikle besmele, hamdele ve salvele ile başlayan metin, ilmin faziletini anlatan bir giriş, icâzet verilen talebenin tanıtılması, onun tahsil ve ehliyetine ilişkin övgü ifadeleri, icâzetin kapsamı, ilmî silsile, dua ve nasihatler, icâzeti veren hocanın adı-künyesi ve tarih gibi unsurlardan oluşmaktadır. İcâzetnâmelerde ilim öğrenmenin fazileti, silsiledeki âlimlerin hayırla anılması ve talebeye yönelik ahlâkî tavsiyeler belirgin bir yer tutmaktadır (Düzenli, 2004, s. 279-280).

Belgenin girişindeki hamdele ve salvele yalnızca geleneksel bir yazı formülü değildir. Bu kısım, ilmin kaynağı ve gayesi hakkında normatif bir çerçeve kurmaktadır. Bilginin Allah'ın lütfu olduğu, Hz. Peygamber'in ilim aktarımında örnek ve kaynak kabul edildiği, âlimlerin ise bu mirasın taşıyıcıları olduğu vurgulanmaktadır. Böylece icâzetnâmenin hukuku, salt insanî bir sözleşme değil, dinî ve ahlâkî sorumlulukla çevrelenmiş bir emanet ilişkisi şeklinde sunulmaktadır.

İcâzet cümlesi, belgenin en kritik bölümüdür. Burada hocanın neye izin verdiği belirlenmektedir. İzin, belli bir kitabın rivayetiyle sınırlı olabileceği gibi tedris, iftâ veya genel ilmî aktarım yetkisini de içerebilir. Bu sebeple bir icâzetnâmeyi değerlendirirken yalnızca "icâzet verilmiştir" sonucuna ulaşmak yeterli değildir; icâzetin kapsamı dikkatle okunmalıdır. Bir hadis kitabının rivayet icâzeti ile umumî tedris icâzeti aynı meslekî sonucu ortaya koymamaktadır (Ayar, 2000, s. 51-52).

Silsile bölümü, icâzetnâmeyi modern diplomadan en açık biçimde ayıran unsurlardandır. Hoca kendi hocasını, onun hocasını ve mümkün olduğu ölçüde zincirin daha eski halkalarını zikrederek talebeyi yaşayan bir ilmî hafızaya bağlamaktadır. Bazı Osmanlı icâzet silsilelerinin

Fahreddin er-Râzî, Seyyid Şerîf el-Cürcânî ve daha eski otoriteler üzerinden klasik İslâm düşüncesinin merkezî isimlerine bağlandığı görülmektedir. Bu durum silsilenin yalnızca biyografik değil, aynı zamanda entelektüel aidiyet bildiren bir unsur olduğunu düşündürmektedir (Sarı, 2000, s. 400).

Son kısımlardaki dua ve nasihatler ise belgenin pedagojik boyutunu tamamlamaktadır. Talebeye ilmi Allah rızası için kullanması, bildiğiyle amel etmesi, kibirden kaçınması, hocalarını ve seleflerini hayırla anması, ilmi ehil kimselere aktarması ve dua zincirini sürdürmesi tavsiye edilir. Bu ifadeler icâzetin bir "hak" kadar bir "yükümlülük" ürettiğini gösterir. Yetki verilen kişi, aynı zamanda geleneği doğru biçimde temsil etme sorumluluğunu üstlenir (Ayar, 2014, s. 55).

4. İcâzet Türleri ve Ulemanın Çok Katmanlı Yetkinliği

Osmanlı dünyasında "icâzet" tek tip bir belgeyi ifade etmez. Umumî ilmî icâzetler yanında hadis, kıraat, fıkıh, iftâ, belirli kitapların rivayeti, tasavvufî tarik, hat ve çeşitli sanatlara ilişkin icâzetler de bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, Osmanlı ulemasının bilgi dünyasının da tek boyutlu olmadığını göstermektedir. Bir kişi medrese ilimlerinde umumî icâzet sahibi olurken ayrıca hadis rivayeti, kıraat veya hat alanında farklı hocalardan özel icâzetler alabilmekteydi (Akpınar, 2000, s. 393).

Hadis icâzetlerinde rivayet zinciri ve belirli eserlerin aktarım hakkı özel önem taşımaktadır. Sahîh-i Buhârî gibi bir hadis eserinin icâzeti, talebenin o eseri belirli bir isnad hattı üzerinden rivayet etmesine imkân vermektedir. Bu icâzetlerin Osmanlı coğrafyasını Hicaz, Şam ve Mısır'daki hadis çevrelerine bağlayan bir işlev gördüğü düşünülebilir. Hac yolculukları ve ilmî seyahatler, yalnızca ibadet veya ziyaret değil, yeni rivayet zincirlerine dahil olma fırsatı da sunmuştur (Düzenli, 2011; Ekinci, 2017, s. 242).

Kıraat icâzeti, uygulamalı bir yetkinliğin zincir halinde aktarılmasının en belirgin örneklerinden biridir. Kur'an'ın lafızlarının usulüne uygun okunması, hocanın doğrudan dinlemesi ve tashihiyle öğrenildiğinden, icâzet burada yazılı bilgi kadar performansın tasdikidir. Benzer biçimde hat icâzetinde talebenin belirli yazı türlerinde estetik ve teknik olgunluğa ulaştığı usta tarafından onaylanır. Hat icâzetlerinin bir murakka içinde toplanmış olması, ilmî kimlik ile sanatkârlığın aynı şahısta birleşebildiğini göstermektedir (Arslan, 2003, s. 295-298).

Tarikat icâzeti ise medrese icâzetinden farklı bir bağlamda, manevî terbiye ve tarikat silsilesi üzerinden işlemektedir. Bununla birlikte iki gelenek arasında yapısal benzerlikler vardır. Her ikisinde de şahsî eğitim, silsile, yetkilendirme, ahlâkî sorumluluk ve geleneğin temsil hakkı öne çıkmaktadır. Osmanlı ulemasının bir bölümünün aynı zamanda tarikatlarla ilişkili olduğu düşünüldüğünde, bir kişinin birden fazla yetki zincirine dahil olması mümkündür. Bu çoklu aidiyetler, Osmanlı entelektüel hayatını yalnızca medrese bürokrasisiyle sınırlamayan daha geniş bir perspektifi gerekli kılmaktadır (Çınar, 2020, s. 65-100).

5. İcâzetnâme ile Modern Diploma Arasında Karşılaştırmalı Değerlendirme

İcâzetnâme ile modern diploma arasındaki karşılaştırma, Osmanlı eğitim tarihinin dönüşümünü anlamak için verimli olmakla birlikte iki belgeyi birbirinin basit karşılığı saymamak gerekir. Modern diploma, belirli bir kurumun hukukî kişiliği tarafından düzenlenir; programın süresi, kredi veya ders yükü, sınav şartları ve mezuniyet kriterleri önceden belirlenmiştir. İcâzetnâmede ise ölçütlerin önemli bölümü hocanın ilmî takdirine dayanır. Bu fark, klasik sistemin kuralsız olduğu anlamına gelmez; aksine kuralların önemli kısmının yazılı bürokratik standartlardan çok ilmî cemaatin teamülleri ve hocanın meslekî itibarı üzerinden işlediğini gösterir.

Modern diplomada belgenin güvenilirliği kurumun akreditasyonu ve devletin tanımasıyla ilişkilidir. İcâzetnâmede ise güvenilirlik, icâzeti veren kişinin kimliği ve onun silsilesinin itibarıyla yakından bağlantılıdır. Bu nedenle aynı ilim alanında farklı hocalardan alınan

icâzetlerin sembolik ağırlığı eşit olmayabilir. Çok tanınmış bir muhaddisten, kıraat âliminden veya müderristen alınan icâzet, sahibine daha geniş bir ilmî çevrede tanınma sağlayabilir. Bu yapı, akademik itibarın kişisel ağlar üzerinden üretildiği bir sistemdir.

Bununla beraber Osmanlı icâzet sistemi salt kişisel keyfiliğe indirgenemez. Medrese dereceleri, okutulan temel metinler, ilmiye hiyerarşisi ve meslekî teamüller, hocanın değerlendirmesini kuşatan güçlü bir kurumsal çevre oluşturuyordu. Dolayısıyla klasik sistemde "kişi" ve "kurum" karşıt iki kutup değildir. Daha doğru ifade ile kurum, hocanın ilmî otoritesini taşıyan ve sınırlandıran bir çerçeve; hoca ise kurumsal eğitimin somutlaştığı yetkili şahıstır.

İcâzetnâmenin modern diploma karşısındaki bir başka ayırt edici özelliği, belgenin geçmişe doğru genişlemesidir. Diploma çoğunlukla mezun ile kurum arasındaki ilişkiyi kaydeder; icâzetnâme ise mezun-hoca ilişkisini önceki nesillere doğru uzatır. Bu sebeple icâzetnâme yalnızca "bugünkü yeterlilik" değil, "tarihsel aidiyet" belgesidir. Talebe, aldığı icâzetle belirli bir öğretim geleneğinin mirasçısı olarak tanımlanır.

Modern akademik sistemde benzer işlevlerin farklı belgelere dağıldığı söylenebilir. Diploma kurumsal mezuniyeti, transkript dersleri ve başarı düzeyini, referans mektubu hocanın şahsî kanaatini, akademik özgeçmiş meslekî birikimi, yayın listesi ilmî üretimi gösterir. Klasik icâzetnâme ise bunların bazı işlevlerini tek bir metinde yoğunlaştırır. Eğitim ilişkisini, yetkilendirmeyi, referansı, silsileyi ve etik nasihati bir arada sunar. Bu nedenle icâzetnâme tarihçisi, belgeyi yalnızca eğitim bürokrasisinin değil ilmî kültürün bütünü içinde değerlendirmelidir.

Karşılaştırma ayrıca "mezuniyet" kavramının tarihsel niteliğini açığa çıkarır. Günümüzde mezuniyet belirli bir programın tamamlandığı keskin bir tarihsel eşik gibi düşünülür. Klasik ilmî hayatta ise öğrenme daha açık uçludur. Bir âlim umumî icâzet aldıktan sonra başka bir hocadan belirli bir eser veya ilim için yeni icâzet alabilir, seyahat ederek rivayet zincirini genişletebilir ve ileri yaşlarında dahi yeni hocalarla ilişki kurabilir. Böylece icâzet, öğrenimin sonu değil, ilmî ağın genişlemesinde bir düğüm noktasıdır.

Bu özellik, Osmanlı ulemasının kariyerinde yatay ve dikey hareketliliği birlikte düşünmeyi gerektirir. Dikey hareketlilik müderrislik ve kadılık derecelerinde yükselme şeklinde gerçekleşirken yatay hareketlilik farklı hocalar, şehirler ve disiplinler arasında yeni ilmî bağlantılar kurma biçiminde ortaya çıkar. İcâzetnâmeler ikinci hareketlilik türünü resmî tayin kayıtlarından çok daha iyi görünür kılar. Bu nedenle ilmiye tarihi araştırmalarında iki kaynak grubunun birlikte kullanılması, kariyer ile bilgi ağının birbirinden ayrıldığı veya kesiştiği noktaları gösterebilir.

SONUÇ

Osmanlı ulemasının icâzetnâmeleri, İslâm eğitim geleneğinin Osmanlı dönemindeki sürekliliğini ve dönüşümünü aynı anda gösteren temel kaynaklardandır. Bu belgeler, ilk bakışta bir öğrencinin tahsilini tamamladığını ve belirli bilgileri aktarmaya yetkili olduğunu gösteren izin metinleri olarak görünür. Fakat yakından incelendiğinde icâzetnâmenin bundan çok daha geniş bir işlev alanına sahip olduğu anlaşılır. İcâzetnâme ilmî ehliyeti tasdik eder, hoca-talebe ilişkisini kayıt altına alır, talebeyi bir silsileye bağlar, ilmî ahlâkı tarif eder, geçmiş otoriteleri hatırlatır ve gelecekteki öğretim faaliyetini meşrulaştırır.

Osmanlı örneğinin ayırt edici yönlerinden biri, şahıs merkezli icâzet geleneğiyle devlet merkezli ilmiye kariyer sisteminin birlikte işlemesidir. Medrese tahsilini tamamlayarak icâzet alan bir kişi ilmî bakımdan yetkilendirilmiş olsa da müderrislik ve kadılık gibi resmî görevlere geçiş mülâzemet, ruûs ve tayin süreçlerine bağlıydı. Bu nedenle icâzetnâme ile resmî görev belgesini özdeşleştirmek doğru değildir. İcâzet ilmî cemaatin tanımasını, ruûs ise devletin görevlendirmesini temsil eden iki ayrı fakat ilişkili meşruiyet alanıdır.

İcâzetnâmelerdeki silsileler, Osmanlı ulemasını bir "ilmî soy" içinde konumlandırır. Bu zincirler sayesinde bir âlimin yalnızca son hocası değil, mensup olduğu öğretim hattı, entelektüel referansları ve daha geniş İslâm dünyasıyla bağlantıları görülebilir. Silsilelerin ağ analizi yöntemleriyle topluca incelenmesi, Osmanlı ilim tarihini bireysel biyografilerin ötesine taşıyarak bilgi dolaşımının yapısal haritasını çıkarma potansiyeline sahiptir.

Belgenin dua, övgü ve nasihat bölümleri de en az isim ve tarihler kadar önemlidir. Bu kısımlar, Osmanlı ulemasının ideal âlim tasavvurunu; ilim, amel, ihlâs, tevazu, tahkik ve tedkik arasındaki ilişkiyi; hocaya ve geçmiş âlimlere duyulan ahlâkî borcu ortaya koyar. İcâzet böylece yalnızca bilgiye sahip olmayı değil, bilgiyi belirli bir etik çerçevede taşımayı ve aktarmayı şart koşar.

XIX. ve XX. yüzyıl başındaki eğitim reformlarıyla birlikte kurum, program, sınav ve standart diploma fikri güçlenmiş; icâzetin bazı işlevleri şehâdetnâme, ehliyetnâme ve diploma gibi belgelere geçmiştir. Bununla birlikte 1914 Dârü'l-hilâfeti'l-aliyye düzenlemesinde görüldüğü üzere icâzet terimi modern kurumsal yapı içinde yeniden tanımlanmış, gelenek ile modern bürokrasi arasında bir süreklilik kurulmuştur. Günümüzde kıraat, hadis, hat ve bazı medrese çevrelerinde icâzetin yaşamaya devam etmesi de belgenin gücünün yalnızca devlet tanımasından kaynaklanmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak Osmanlı icâzetnâmesi, "diploma" kelimesinin dar anlamına indirgenemeyecek kadar zengin bir tarihî kaynaktır. O, aynı anda diploma, referans mektubu, ilmî şecere, yetki belgesi, ahlâkî vasiyet ve hafıza metnidir. Osmanlı ulemasının kimlerden beslendiğini, kendisini hangi ilmî geçmişe bağladığını, hangi bilgi alanlarında yetkinlik iddia ettiğini ve bu yetkinliği hangi değerlerle meşrulaştırdığını anlamak için icâzetnâmelerin sistematik biçimde toplanması, tenkitli neşirlerinin yapılması ve diğer ilmiye kaynaklarıyla karşılaştırılması gerekmektedir. Böyle bir araştırma programı, Osmanlı eğitim tarihini kurumların tarihinden ilişkilerin, ağların ve ilmî güvenin tarihine doğru genişletecektir.

KAYNAKÇA

Akpınar, C. (2000). "İcâzet". *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi*. 21/393-400. İstanbul: TDV Yayınları.

Arslan, D. (2003). Kiraat İlminde İcazetname Gelenegi Ve Bir İcazetname Örnegi. *Cumhuriyet Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi 7*(2), 291-318.

Ayar, T. (2014). "Bir Osmanlı Müderrisinin İcâzetnâmesi ve Tarihî Kaynak Değeri Üzerine Bazı Mülahazalar". Turkish Studies=Türkoloji Araştırmaları 9/1, 43-62.

Çınar, N. (2020). "Tasavvufta İcâzet Geleneği: "Nakşî Hâlidî Şeyhi Ervâdî Örneği". *Ağrı İslâmi İlimler Dergisi (AGİİD)*. Haziran 6/63-104.

Düzenli, M. (2004). İslam Rivâyet Geleneğinde İcâzet. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi 17*(17), 265-300.

Ekinci, M. İ. (2017). "Tillo Mücahidiyye Medresesi'nde İcâzet ve İcâzetnâme". *Siirt Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi* 4/2, 241-260.

Idrız, M. (2003). İslâm Eğitim Yaşamında İcazet Geleneği. *Değerler Eğitimi Dergisi 1*(3), 169-188.

İpşirli, M. (2000). "İlmiye". *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi*. 22/141-145. İstanbul: TDV Yayınları.

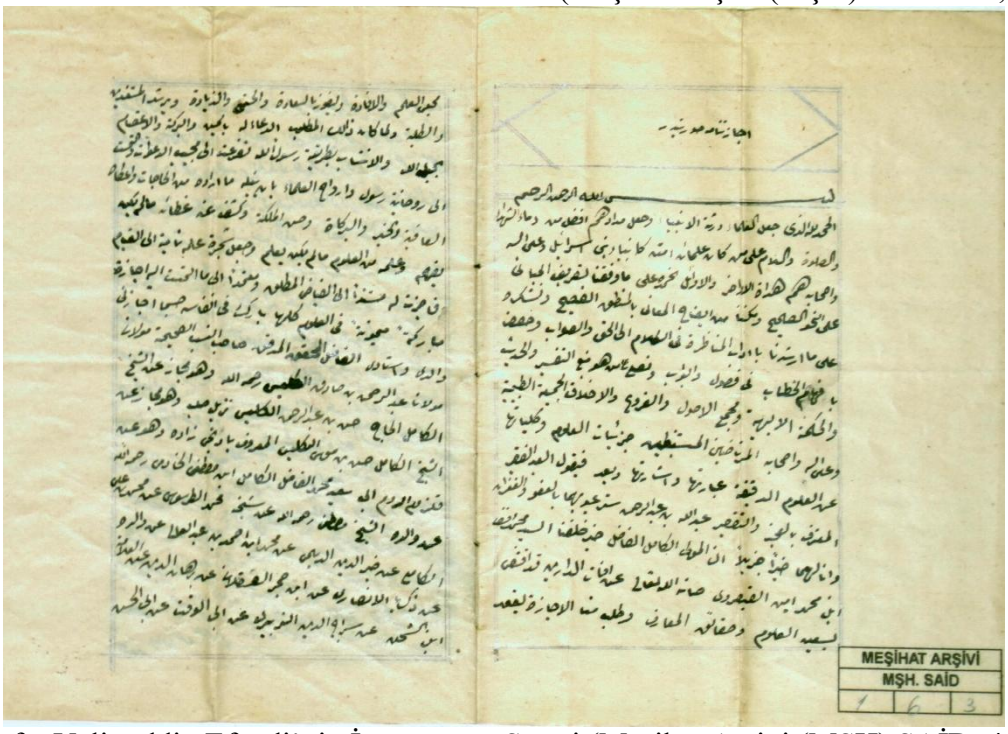
Sarı, M. Ali. (2000). "İcazet". *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi*. 21/400-401. Ankara: TDV Yayınları.

Uzunçarşılı, İ. H. (1988). *Osmanlı Devletinin İlmiye Teşkilâtı*. Ankara: Türk Tarih Kurumu Yayınları, 3. Basım.

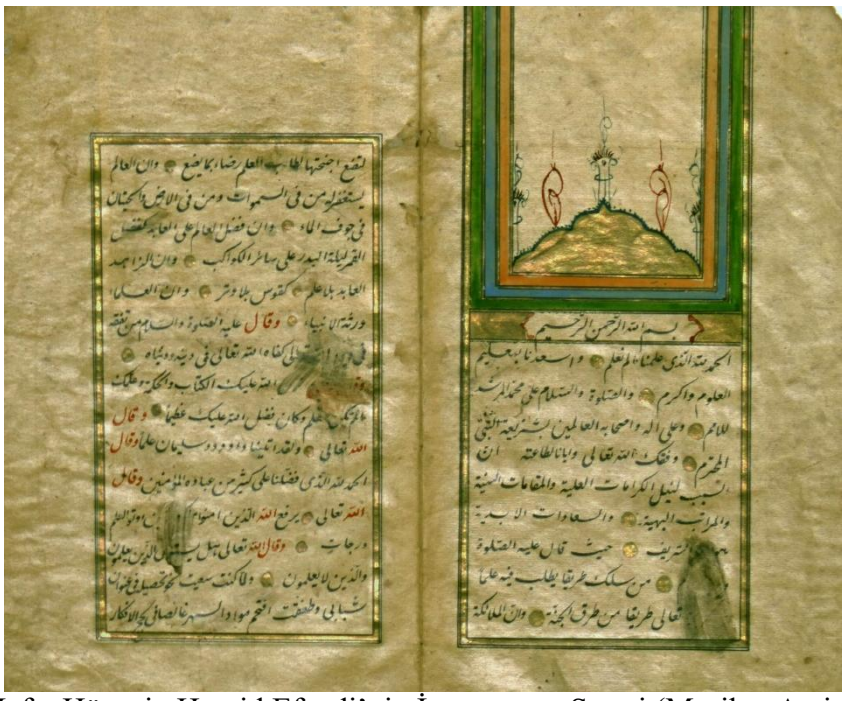
Yıldız, E. (2023). Hz. Halid B. Velid Neslinden Musa Şefik Efendi'nin Şeceresi Ve İcâzetnâmesinin Tahlili. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi 10*(4), 320-343.

EKLER

Ek 1. Mehmed Bahri Efendi'nin İcazetname Sureti (Meşihat Arşivi (MŞH) SAİD. 1/6, 3A)



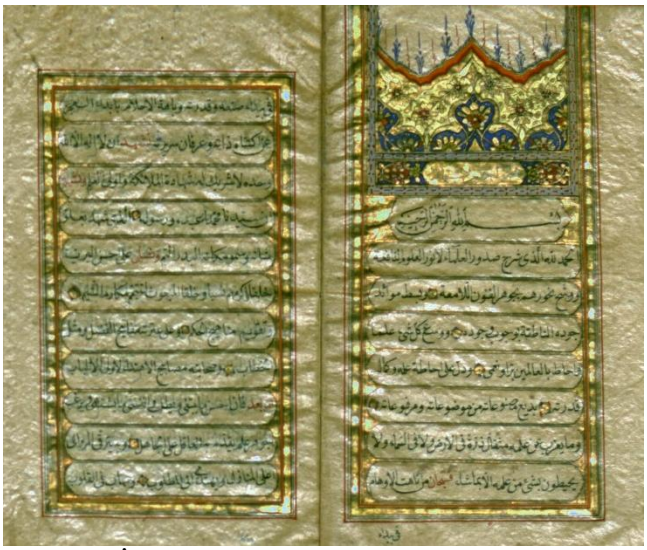
Ek 2. Hafız Veliyüddin Efendi'nin İcazetname Sureti (Meşihat Arşivi (MŞH) SAİD. 4/12, 21B)



Ek 3. Kadiri Hafız Hüseyin Hamid Efendi'nin İcazetname Sureti (Meşihat Arşivi (MŞH) SAİD. 9/5, 62B)



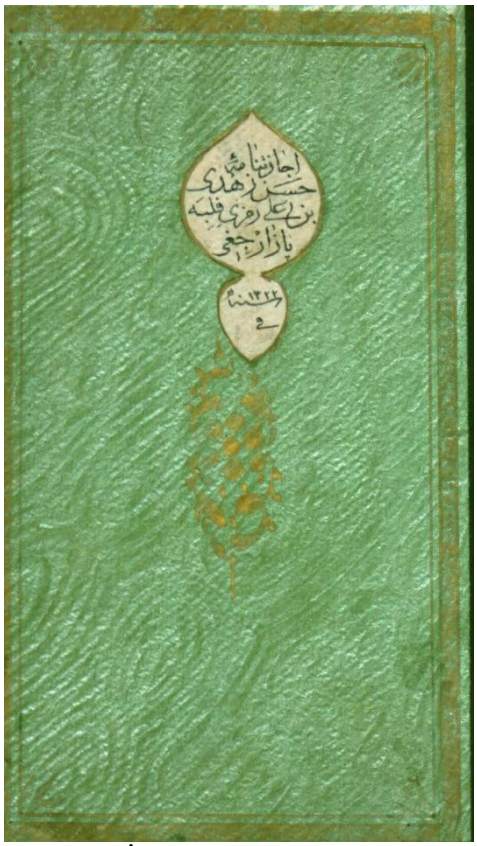
Ek 4. Aziz Hilmi Efendi'nin İcazetname Sureti (Meşihat Arşivi (MŞH) SAİD. 27/5, 178A)



Ek 5. Hasan Zühdü Efendi'nin İcazetname Sureti (Meşihat Arşivi (MŞH) SAİD. 58/2, 445B)



Ek 6. Hasan Zühdü Efendi'nin İcazetname Suretinin Kapak Sayfası (Meşihat Arşivi (MŞH) SAİD. 58/2, 445B)



Ek 7. Hasan Zühdü Efendi'nin Matbu İcazetnamesi (Meşihat Arşivi (MŞH) SAİD. 58/2, 445B)



(٣)

الجليل جيلا بعد جيل • وقال بعض الفضلاء الاسانيد انساب الكتب
ومن لا سند له فهو لقيط • هذا وان هذا العبد الفقير والعاجز الحقير
قد اكرمه الحق سبحانه • واغدق عليه نعمه واحسانه • واوصل
خيره العميم اليه • وضاعف بره عليه • حيث وفقه للاشتغال بأشرف
الطاعات • واستعمله في اعظم العبادات • وهو طلب العلم الشريف •
اذ به يتميز الانسان بين اهل التكليف • وينال الفضل والتشريف •
اذا كان خالصا لوجه الملك اللطيف • سليما من السمعة والرياء القبيح
والا كان وبالا لصاحبه على القول الصحيح • جعلنا الله ممن عمل
بمرضاته • وسعى في صلاح نفسه ليسلم في حياته ومماته • وجعل
سعينا مشكورا وعملنا مبرورا وذنبنا مغفورا انه على كل شئ
قدير • ينفر الذنوب ويعفو عن التقصير • وكان من اعظم نعم القدير •
وتيسيره للخير الكثير • ان ارشدني لاخذ العلم عن العلماء العاملين •
فمن اجلهم من قد اخذت عنه العلم والطريقة والدين • فهو قطب
العارفين مربي المريدين • مرشد الاصاغر والاكابر • الذي لا تسع
مزاياه وفضائله بطون الدفاتر • من احيا ما اندرس من علوم الشريعة

MEŞİHAT ARŞİVİ
MŞH. SAİD

بسم الله الرحمن الرحيم

حمداً لواصل المنقطعين اليه برحمته • والرافع على السوى خدمة
احاديث نبيه وشريعته • وخصهم بغاية امداده • وافاض عليهم بركات
بره واسعاده • وارسل عليهم رحمته مسلسلة وحظهم بخطابه • واسند
اليهم خشيته في عزيز كتابه • وصلاة وسلاما على نبينا محمد المصطفى
سيد المرسلين • وعلى اله وصحبه اجمعين • اما بعد فمن شرف هذه
الامة الاسناد • وسلوك الطريقة والارشاد • وذلك من عهد المصطفى

KADI SİCİLLERİNDEKİ ANAHTAR KELİMELER

Doç. Dr. Esra YILDIZ
Yalova Üniversitesi, İlahiyat Fakültesi, İslam Tarihi ve Sanatları, Yalova, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1236-7446

ÖZET

Kadı sicilleri, Osmanlı toplumunun hukukî, sosyal, iktisadî, idarî ve kültürel hayatını aynı belge evreninde bir araya getiren başlıca arşiv serilerindendir. Bununla birlikte sicillerin hacmi, kayıt türlerinin çeşitliliği, kalıp ifadelerin dönem ve mahkemeye göre değişmesi ve aynı kavramın farklı hukukî bağlamlarda farklı işlevler üstlenmesi, araştırmacının metne erişimini güçleştirmektedir. Bu makale, kadı sicillerinde araştırmayı yönlendiren "anahtar kelime" kavramını yalnızca modern indeksleme tekniği olarak değil, Osmanlı mahkeme dilinin kavramsal ve kurumsal yapısını çözümlemeye yarayan metodolojik bir araç olarak ele almaktadır. Kadı sicillerindeki bazı kayıtların derkenârında yani yan kısmında kaydın özetini ifade eden kelimeler yazılmıştır. Bu kelimeler, hem döneminde hem de günümüzde kayda erişme kolaylığı sağlamaktadır. Çalışmada belge türlerini belirleyen i'lâm, hüccet, ma'rûz, mürâsele, ferman ve berat gibi terimler; yargılama sürecini gösteren da'vâ, müddeî, müddeâ aleyh, ikrâr, inkâr, beyyine, şehâdet, yemin, sulh ve ibrâ gibi kavramlar; aile, miras, mülkiyet, borç, ticaret, vakıf, esnaf, kamu düzeni ve ceza alanlarında yoğunlaşan kelime kümeleri sistematik biçimde tasnif edilmektedir. Ayrıca kelimelerin tek başına değil, formül, eşdizim ve kayıt bağlamı içinde okunması gerektiği savunulmaktadır. Sonuç olarak kadı sicillerinde anahtar kelime temelli okuma, klasik fihristçiliğin ötesinde, mahkemenin işlem mantığını, toplumsal ilişkilerin hukuk diline dönüşümünü ve zaman içindeki kavramsal değişimi görünür kılan çok katmanlı bir araştırma yöntemi sunmaktadır.

Anahtar Kelimler: İslam Tarihi, Kadı Sicilleri, Osmanlı Devleti, Mahkeme, İslam Hukuku.

KEY TERMS IN OTTOMAN KADI COURT REGISTERS

ABSTRACT

Qāḍī registers (sharīʿa court registers) constitute one of the principal archival series that bring together the legal, social, economic, administrative, and cultural dimensions of Ottoman society within a single documentary corpus. Nevertheless, the sheer volume of these registers, the diversity of record types, variations in formulaic expressions according to period and court, and the different functions assumed by the same concept in different legal contexts make it difficult for researchers to access, identify, and interpret relevant material effectively. This article approaches the concept of the "keyword" in qāḍī registers not merely as a modern indexing technique, but as a methodological tool for analysing the conceptual and institutional structure of Ottoman judicial language. It systematically classifies terms that identify different types of documents, such as iʿlām, ḥujja, maʿrūḍ, murāsala, fermān, and berāt; concepts associated with judicial procedure, including daʿwā, muddaʿī, muddaʿā ʿalayh, iqrār, inkār, bayyina, shahāda, yamīn, ṣulḥ, and ibrāʾ; and clusters of terminology relating to family, inheritance, property, debt, commerce, charitable endowments (waqf), guilds and artisans, public order, and criminal matters. The study further argues that such terms should not be read in isolation, but rather within their formulaic, collocational, and documentary contexts. From the perspective of digital humanities, it proposes the development of controlled vocabularies, the matching of orthographic and lexical variants, the identification and disambiguation of personal names, place names, and institutions, and the application of contextual tagging. In conclusion, keyword-based reading of qāḍī registers offers a multilayered research methodology that goes

beyond conventional indexing and cataloguing practices. It makes visible the operational logic of the Ottoman court, the processes through which social relations were translated into legal language, and the conceptual transformations that occurred over time. Accordingly, keywords in qāḍī registers should be understood not simply as instruments for locating individual records, but as analytical entry points into the legal, social, and institutional structures of Ottoman society.
Keywords: Islamic History, Qadi Registers, The Ottoman Empire, Court, Islamic Law.

GİRİŞ

Osmanlı tarih yazımında kadı sicilleri, gündelik hayatın devlet ve hukukla temas ettiği en yoğun belge gruplarından birini teşkil etmektedir. "Kadı sicilleri", "mahkeme sicilleri", "sicillât-ı şer'iyye" ve yaygın biçimiyle "şer'iyye sicilleri" diye anılan bu defterler, kadı veya nâibi tarafından tutulan ve mahkeme işlemleriyle birlikte merkezî idareden gelen belgelerin suretlerini de barındıran kayıt serileridir (). Bu özellik, sicili yalnızca hüküm veren bir mahkemenin karar defteri olmaktan çıkarmakta; onu şehir toplumunun kişiler, aileler, mahalleler, esnaf grupları, vakıflar, askerî zümreler ve devlet görevlileri arasındaki ilişkileri kaydeden kurumsal bir hafıza haline getirmektedir. Sicilde alım satımdan mirasa, evlenmeden boşanmaya, borçtan kefalete, vakıf idaresinden narha, asayişten vergi tahsiline kadar çok farklı işlemlerin yan yana bulunması, araştırmacıya geniş imkân sağladığı kadar ciddi bir tasnif problemi de doğurmaktadır (Işık, 2019, s. 234; Işık, 2019, 43; Özdemir, 1986).

Bu problemin merkezinde "aradığımız kaydı nasıl bulacağız?" sorusu vardır. Klasik araştırma pratiğinde defter baştan sona okunur, kayıtlar özetlenir ve fihrist hazırlanır. Bu yöntem vazgeçilmez olmakla birlikte binlerce defter ve yüz binlerce kayıt karşısında tek başına yeterli değildir. Modern araştırmacı, belirli bir temayı takip edebilmek için metin içinde tekrarlanan terimlere, hukukî kalıplara, kişi ve kurum unvanlarına, mal ve para adlarına, mekân göstergelerine ve işlem fiillerine başvurur. Bu noktada "anahtar kelime" kavramı ortaya çıkar. Ancak siciller bakımından anahtar kelime, günümüz veri tabanlarında kullanılan basit bir arama sözcüğü değildir. Kelimenin Osmanlı hukuk dilindeki semantik alanı, yazım varyantları, Arapça-Türkçe-Farsça bileşimi, kayıt formülündeki yeri ve diğer kelimelerle kurduğu ilişki bilinmeden yapılan arama eksik, hatta yanıltıcı sonuçlar üretebilir.

Bu makalenin temel iddiası şudur: Kadı sicillerindeki bazı kayıtların yan kısmında yer alan kelimeler bir nevi anahtar kelimelerdir. Bu anahtar kelimeler, içerikle ilgili çok kısa bilgi vermekle birlikte araştırmacının işini kolaylaştırmaktadır. Çalışmamız, kadı sicillerindeki anahtar kelimelerin önemi ve işlevi üzerinde durmaktadır.

1. Kadı Sicilinin Belge Evreni ve "Anahtar Kelime" Kavramı

Kadı sicilinde bir kelimenin "anahtar" niteliği, yalnızca sık geçmesinden kaynaklanmaz. Özellikle kaydın derkenarında yazılı olan kelimenin anahtar niteliği taşıyıp taşımadığının tespit edilmesi gerekir. Nitekim derkenarda yazan her kelime anaktar kelime olma özelliğini taşımamaktadır. Bazı kelimeler çok sık geçtiği halde ayırt edici değildir; bazıları ise seyrek görünmesine rağmen belirli bir hukukî işlemi doğrudan teşhis eder. Anahtar kelimeler sıklık, ayırt edicilik ve bağlamsal değer ölçütleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Sicillerdeki kayıtlar aynı türden değildir. Mahkeme huzurunda tarafların ikrarına dayanan ve kadının tasdikini taşıyan hüccetler, hüküm unsurunu içeren i'lâmlar, üst makama arz edilen ma'rûzlar, kadının başka bir görevliye yazdığı mürâseleler ve merkezden gönderilen ferman, berat, buyuruldu veya emir suretleri aynı defterde bulunabilir. Osmanlı hukuk literatüründe sicil kavramı zamanla genişlemiş; farklı belge türlerinin mahkeme defterinde bir araya gelmesi yaygınlaşmıştır. Dolayısıyla anahtar kelime sistemi öncelikle "bu kayıt nedir?" sorusuna cevap vermelidir. Belge türü belirlenmeden içeriğin istatistiksel tasnifi yapılırsa, örneğin bir ferman

suretindeki yasaklama ile mahkeme huzurunda gerçekleşmiş bir dava aynı düzlemde sayılabilir (Aydın, 2003).

2. Belge Türlerini Belirleyen Anahtar Kelimeler

"Hüccet", sicil araştırmasının en temel anahtar kelimelerinden biridir. Osmanlı mahkeme pratiğinde kadının hükmünü içermeyen, fakat huzurunda gerçekleşen hukukî işlem veya ikrarı belgeleyen kayıtlar için kullanılır. Taraflara verilen tasdikli belgenin bir sureti sicile geçirilir. Hüccetler satış, hibe, sulh, ibrâ, vekâlet, kefalet, nikâh, boşanma, nafaka, vakıf ve daha birçok alanda düzenlenebilir. Bu sebeple "hüccet" kelimesi tek başına konu belirtmez; belge formunu gösterir. Tanzimat sonrasında sicillerin tanzimi ve hüccet-i'lâm gibi belgelerin kaydı daha ayrıntılı düzenlemelere bağlanmıştır (Oğuz-Akgündüz, 1998, s. 446).

"İ'lâm" ise genel olarak kadının bir dava hakkında verdiği hükmü ve bu hükmün taraflara bildirilmesini ifade eden belge türüdür. Sicilde i'lâmı teşhis ederken yalnız başlıktaki terime güvenmek yerine hüküm bildiren sonuç formüllerine bakmak gerekir. "İlzâm", "men'", "tenbih", "hükm olundu" gibi ifadeler yargısal sonucun izini verir. Bir i'lâmda davacı ve davalının iddia-savunma ilişkisi, deliller ve hüküm daha belirgin olduğundan, anahtar kelime sistemi dava sürecinin aşamalarını ayrı ayrı kodlamaya elverişlidir. Bu özellik, mahkemenin yalnızca sonuçlarını değil, ispat rejimini ve taraf stratejilerini incelemeyi mümkün kılmaktadır (Akgündüz, 2000, 72).

"Ma'rûz", kadının veya mahkemenin bir meseleyi üst makama arz ettiği yahut bir olayın kayıt altına alındığı belge gruplarını belirlemede önemlidir. İstanbul kadılığında bazı meselelerin Dîvân-ı Hümâyun'a ma'rûz olarak iletildiği ve bu tür kayıtların müstakil defterlerde veya sicilin belirli bölümlerinde yer aldığı bilinmektedir. Ma'rûz kelimesinin geçtiği kayıtlar, mahkeme ile merkez arasındaki idarî-hukukî iletişimi araştırmak için özel bir korpus oluşturabilir. "Mürâsele" ise kadının görev alanındaki kişilere veya diğer görevlilere yazdığı resmî yazışmaları gösterir; tebliğ, keşif, tahsil veya bir işlemin yerine getirilmesi gibi amaçlarla düzenlenebilir (Akgündüz, 1990).

Ferman, berat, hüküm, emr-i şerîf, buyuruldu ve tezkire gibi kelimeler merkezî veya üst idarî otoritelerden gelen belgelerin suretlerini ayırt etmeye yarar. Bunların sicilde bulunması, mahkemenin yalnızca uyuşmazlık çözen bir kurum olmadığını, aynı zamanda devlet emirlerinin yerelde ilan, tescil ve uygulanma kanallarından biri olduğunu gösterir (Aydın, 2005, s. 187-213).

3. Yargılama Sürecinin Anahtar Kelimeleri

"İkrâr", Osmanlı mahkeme kayıtlarında en güçlü ispat ve tescil göstergelerinden biridir. Pek çok çekişmesiz işlem, tarafın mahkeme huzurunda ikrarının kayda geçirilmesiyle belgelenir. Satış bedelinin alındığı, borcun bulunduğu, borcun ödendiği, hibenin gerçekleştiği, vekil tayin edildiği veya bir haktan vazgeçildiği ikrar formülüyle tespit edilebilir. Bu sebeple ikrar kelimesi görüldüğünde kaydın mutlaka dava olduğu düşünülmemelidir. "İnkâr" ise iddianın reddini ve ispat yükünün davacıya yönelmesini sağlayan kritik bir dönemeçtir. İnkârı takip eden "beyyine taleb olundukda", "udûl-i müslimînden", "şehâdet eylediler" gibi kalıplar, delil zincirini görünür kılmaktadır (Aydın, 2005).

"Beyyine" genel delil kavramını; "şehâdet" ve "şâhid" ise tanıklığı gösterir. "Udûl", "tezkiye", "ta'dîl", "cerh" gibi kelimeler şahitlerin güvenilirliğinin değerlendirilmesiyle ilgilidir. "Yemin", "half", "nükûl" ve "istihlâf" gibi terimler ise yemin delilinin işletildiği kayıtları bulmaya yarar. Bu kelime grubu, hukuk tarihçisine yalnız normatif fıkıh hükümlerinin uygulamasını değil, mahkeme aktörlerinin hangi delillere başvurduğunu ve hangi aşamada uzlaşmaya yöneldiğini inceleme imkânı verir. Belirli bir dönemde ikrarla sonuçlanan davaların, şahit dinlenen davaların ve yeminle sonuçlananların oranı, mahkeme pratiğine ilişkin nicel bir profil üretebilir; ancak kayıtların seçilme ve korunma biçimi dikkate alınmadan bu oranlar

toplumun tamamına genellenmemelidir (Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 94).

"Sulh", uyuşmazlığın mahkeme önünde tarafların anlaşmasıyla sona erdiğini gösteren anahtar terimdir. Sulh kayıtları özellikle borç, miras, aile ve mülkiyet ihtilaflarında sık karşılaşılabilen bir çözüm biçimidir. "Musâlaha", "bedel-i sulh", "sulh ve ibrâ", "kat'-ı nizâ'" gibi kalıplar birlikte tarandığında mahkemenin uzlaştırıcı işlevi daha iyi görülebilir. "İbrâ" ise bir kimsenin diğerini borç veya talepten aklaması, hakkından vazgeçmesi bağlamında önemlidir. "Ferâgat" ve "iskāt" kelimeleri de hak veya tasarruftan vazgeçme işlemlerini gösterebilir. Bu terimler, dava sayısını yalnız "kazanan-kaybeden" ikiliğiyle değerlendiren yaklaşımların yetersizliğini ortaya koyar (Şeriyye Sicilleri Arşivi, Havâss-ı Refîa Kadılığı Mahkemesi, No. 258, 280, 293, 285, 323).

"İlzâm", "men'", "tenbih", "teslim", "edâ" ve "hükm" gibi sonuç kelimeleri, kadının kararının yönünü belirler. Bir kaydın sonuç kısmındaki fiil, araştırmacının veri tabanında ayrı bir alan olarak tutulmalıdır. Örneğin borç davalarında "borcun varlığı", "ödemenin ispatı", "sulh", "davanın reddi" ve "yemin" farklı sonuç kategorileridir. Bu ayrım, hukukî uyuşmazlıkların gerçek çeşitliliğini korur ve nicel analizde hatalı bir homojenleştirmeyi önler (Şeriyye Sicilleri Arşivi, Rumeli Sadareti Mahkemesi, No. 438).

Aile tarihi araştırmalarında "nikâh", "zevc", "zevce", "mehr", "mehr-i muaccel", "mehr-i müeccel", "nafaka", "kisve", "talâk", "muhâlaa/hul'", "iddet", "hıdâne", "sagīr/sagīre", "vasî", "kayyım" ve "kefâlet" gibi terimler temel arama kümesini oluşturur. Ancak bu kelimeler farklı belge türlerinde farklı amaçlarla bulunabilir. Mehr, nikâhın kurulması sırasında kaydedilebildiği gibi boşanma, ölüm veya miras uyuşmazlığında alacak kalemi olarak da ortaya çıkabilir. Nafaka yalnız eş için değil çocuk, boşanmış kadın veya bakıma muhtaç kişi için takdir edilebilir (Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 334).

"Talâk" ile "muhâlaa" arasındaki ayrım özellikle önemlidir. Muhâlaa kayıtlarında eşlerin belirli malî haklar karşılığında evlilik bağını sona erdirmesi ve tarafların karşılıklı ibrâsı gibi unsurlar görülebilir. Bu kayıtlar kadınların mahkemeyi kullanma biçimleri, malî hakları ve aile içi pazarlık mekanizmaları açısından zengin veriler sunar. Osmanlı mahkemeleri üzerine yapılan mikro-tarihsel çalışmalar, kadınların mülkiyet, miras, evlilik ve borç ilişkilerinde mahkemeye aktif biçimde başvurabildiklerini göstermiştir. Bu nedenle "hatun", "bint", "zevce" gibi cinsiyet göstergeleri, kadınların yalnız aile kayıtlarında değil ticaret ve mülkiyet işlemlerinde de izlenmesini sağlayacak şekilde çapraz aranmalıdır (Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 78).

Vesayet alanında "sagīr", "yetîm", "vasî nasbı", "vasî-i muhtar", "vasî-i mansûb", "kayyım", "mal-ı yetîm", "nafaka takdiri" ve "rüşd" gibi terimler önemlidir. Tereke ile vesayet kayıtları birlikte okunduğunda, ebeveynin ölümünden sonra küçüklerin mal varlığının nasıl korunduğu, kimin vasi tayin edildiği ve günlük ihtiyaçlar için ne kadar nafaka ayrıldığı görülebilir. Burada anahtar kelime analizi, aile tarihini kurum tarihiyle birleştirir: mahkeme, aile içindeki kırılma anlarında koruyucu ve denetleyici bir merci olarak görünür (Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 97).

Miras araştırmalarında "tereke", "muhallefât", "metrûkât", "müteveffâ/müteveffiye", "verese", "vâris", "zevc/zevce", "ibn", "bint", "vâlide", "ced", "karındaş", "ashâb-ı ferâiz", "hisse", "sehm", "kısmet", "taksim", "beytülmâl", "emîn", "vasiyet", "düyûn", "techîz ve tekfîn" kelimeleri merkezi önemdedir. Tereke kaydı yalnız mirasçı listesinden ibaret değildir; ölen kişinin taşınır-taşınmaz malları, alacakları, borçları, cenaze masrafları, mehr borcu, vergi veya harçlar ve nihayet mirasçılara düşen paylar aynı kayıt içinde bulunabilir. Bu yüzden tereke, anahtar kelime yoğunluğu en yüksek sicil türlerinden biridir (Şeriyye Sicilleri Arşivi, Kısmet-i Askeriye Mahkemesi, No. 2134).

Gayrimenkul kayıtlarında “mülk”, “menzil”, “hâne”, “oda”, “dükkân”, “han”, “hamam”, “bağ”, “bahçe”, “tarla”, “zemin”, “arsa”, “çiftlik”, “değirmen”, “mâ-i cârî”, “kuyu”, “hudûd” ve “sınır” gibi nesne ve mekân terimleri öne çıkar. Fakat Osmanlı arazi hukukunda “mülk” ile “mîrî”, “vakıf”, “mukataa”, “tasarruf”, “tapu”, “tefvîz”, “ferâğ” gibi kelimeler arasında hukukî statü farkları vardır. Özellikle arazi üzerinde mülkiyet ve tasarruf haklarını tanımlayan terimlerin bağlamdan koparılması, modern mülkiyet kavramlarının geçmişe yansıtılmasına yol açabilir (Kısmet-i Askeriye Mahkemesi, No. 2028).

Satış kayıtlarında “bey‘”, “bâyi‘”, “müşterî”, “semen”, “iştirâ”, “kabz”, “teslim”, “bey‘-i bât”, “bey‘-i bi’l-vefâ” gibi kelimeler işlemin niteliğini belirler. “Hudûd-ı erbaa” veya dört sınırın sayılması, gayrimenkulün mekânsal konumunu yeniden kurmak için son derece değerlidir. Komşu mülklerin sahipleri, yol, dere, mescid, çarşı veya kamu yapıları sınır göstergesi olabilir. Böylece bir satış hücceti, yalnız hukukî devir belgesi değil, kentsel topografyanın mikro ölçekte haritalanabileceği bir veri kaynağına dönüşür (Şeriyye Sicilleri Arşivi, Havâss-ı Refîa Kadılığı Mahkemesi, No. 258).

“Şüf‘a” komşuluk veya ortaklık ilişkileri üzerinden önalım hakkını; “gasb”, “fuzûlî müdahale”, “men‘-i müdahale”, “zabt”, “tasarruf” ve “nizâ‘” ise mülkiyet ihtilaflarını belirlemede kullanılabilir. Bu kelimelerin dağılımı, belirli mahallelerde veya dönemlerde gayrimenkul üzerindeki uyuşmazlıkların niteliğini karşılaştırmaya imkân verir. Bununla birlikte bir kelimenin artması gerçek uyuşmazlık artışını değil, kayıt pratiğinin veya mahkeme yetkisinin değişmesini de yansıtabilir. Zaman serisi analizinde kurumsal değişkenler mutlaka kontrol edilmelidir (Şeriyye Sicilleri Arşivi, Havâss-ı Refîa Kadılığı Mahkemesi, No. 280).

Borç ilişkilerinin temel sözlüğü “deyn”, “karz”, “alacak”, “zimmet”, “edâ”, “kabz”, “teslim”, “havâle”, “kefil”, “kefâlet”, “rehin”, “râhin”, “mürtehin”, “vade”, “müeccel” ve “ibrâ” gibi kelimelerden oluşur. Borcun kaynağı her zaman nakit ödünç değildir; satış bedeli, kira, ortaklık, hizmet, miras veya tazminat da borç doğurabilir. Bu sebeple “deyn” kelimesi işlem kaynağıyla birlikte kodlanmalıdır. Kefalet kayıtları ise kredi ilişkilerinin sosyal ağını gösterir: kimin kime kefil olduğu, meslektaşlık, akrabalık veya mahalle bağlarının ekonomik güven üretimindeki rolünü incelemeye elverişlidir (Şeriyye Sicilleri Arşivi, Havâss-ı Refîa Kadılığı Mahkemesi, No. 285).

Keşif ve tamir kayıtları da iktisadî tarih açısından özel bir anahtar kelime kümesi sunar: “keşf”, “tamir”, “meremmet”, “binâ”, “mimar”, “ehl-i hibre”, “masraf”, “ücret”, “malzeme”, “taş”, “kereste”, “kireç” gibi terimler yapı ekonomisini görünür kılar. Bu belgeler vakıf, şehir, mimarlık ve iktisat tarihinin kesişimindedir. Anahtar kelime sisteminin disiplinler arası niteliği burada belirgindir: aynı “tamir” kaydı bir tarihçi için fiyat, bir mimarlık tarihçisi için yapı unsuru, bir vakıf araştırmacısı için mütevelli sorumluluğu verisi olabilir (Şeriyye Sicilleri Arşivi, Havâss-ı Refîa Kadılığı Mahkemesi, No. 323).

Vakıf kayıtlarında “vakf”, “vâkıf”, “mevkūf”, “vakfiye”, “mütevelli”, “nâzır”, “cihet”, “galle”, “akar”, “müstegallât”, “şart-ı vâkıf”, “evlâdiyet”, “tevliyet”, “istibdâl”, “icar”, “icâreteyn”, “mukataa”, “tamir” ve “muhasebe” terimleri başlıca anahtar kelimelerdir. Vakıf kurma işlemi kadar vakfın sonraki hayatı da sicile yansır. Mütevelli tayini, gelir tahsili, kiralama, tamir, görevli ücretleri, vakıf şartlarının yorumu ve istibdâl gibi meseleler mahkemenin denetim alanına girebilir. Bu nedenle vakıf tarihi için yalnız “vakfiye” kelimesini aramak büyük bir veri kaybına yol açar (Şeriyye Sicilleri Arşivi, Evkaf-ı Hümayun Müfettişliği Mahkemesi, No. 58).

Kadı sicilleri tıp kurumları tarafından üretilmiş kayıtlar olmamakla birlikte, hastalık ve sağlık tarihine ilişkin çok çeşitli kelimeleri gündelik hukukî ilişkiler içinde muhafaza eder. “maraz”, “hasta”, “mecrûh”, “cerh”, “tabib”, “cerrah”, “kehhal”, “ilaç”, “deva”, “tedavi”, “ücret”, “ecir”, “ölüm”, “vefat”, “maktûl”, “mecnun”, “ma‘tûh” ve benzeri kelimeler farklı kayıt türlerinde karşımıza çıkabilir. Buradaki temel yöntemsel mesele, modern teşhis kategorilerini tarihsel

terimlerin üzerine doğrudan yerleştirmemektir. Sicil kâtibi çoğu zaman hastalığın klinik tanımını yapmak için değil, hukukî ehliyet, sorumluluk, ölüm, yaralanma, borç, ücret veya miras gibi bir sonucu kaydetmek için hastalık bilgisini metne dâhil eder. Bu nedenle sağlık anahtar kelimeleri, kaydın hukukî sebebiyle birlikte okunmalıdır. Örneğin "maraz-ı mevt" miras ve tasarruf ehliyeti bakımından, "cerh" ceza ve tazminat bakımından, "tabib ücreti" ise borç ve hizmet ilişkisi bakımından farklı analitik kategorilere aittir (Yıldız, 2023).

Sonuç

Kadı sicilleri, Osmanlı toplumunun hukukî, idarî, sosyal ve iktisadî yapısını çok yönlü biçimde yansıtan zengin bir belge külliyatı olmakla birlikte, kayıtların hacmi ve çeşitliliği bu kaynaklardan sistematik biçimde yararlanmayı güçleştirmektedir. Bu çalışma, söz konusu güçlüğün aşılmasında "anahtar kelime" kavramının işlevsel bir yöntem olarak kullanılabileceğini ortaya koymaya çalışmıştır. Ancak burada anahtar kelime, yalnızca modern araştırmacının metin içerisinde belirli kayıtları bulmak amacıyla kullandığı bir arama terimi olarak değerlendirilmemiş; sicilin kendi kayıt ve tasnif mantığı içerisinde ele alınmıştır. Nitekim bazı sicil kayıtlarının derkenârlarında yer alan ve kaydın konusunu birkaç kelimeyle ifade eden ibareler, Osmanlı mahkeme kayıtlarında bilgiye erişimi kolaylaştıran tarihsel bir tasnif pratiğinin varlığına işaret etmektedir. Makalenin temel iddiası da bu kısa tanımlamaların, işlevleri bakımından günümüz akademik literatüründeki "anahtar kelime" uygulamasıyla belirli ölçülerde karşılaştırılabileceğidir.

Bununla birlikte derkenârda bulunan her ibarenin doğrudan anahtar kelime olarak kabul edilmesi mümkün değildir. Bir terimin bu nitelikte değerlendirilebilmesi için kaydın muhtevasını temsil etmesi, diğer kayıtlardan ayırt edilmesini sağlaması ve araştırmacıyı ilgili hukukî işlem veya konuya yönlendirebilmesi gerekir. Dolayısıyla sicillerdeki anahtar kelimelerin tespiti yalnızca kelime sıklığına değil; ayırt edicilik, bağlamsal değer ve temsil kabiliyetine dayandırılmalıdır. Bu yaklaşım, sicillerin modern kavramlarla geriye dönük ve mekanik biçimde sınıflandırılmasının önüne geçerken, Osmanlı mahkemesinin kendi belge üretim ve bilgi düzenleme pratiğinin de dikkate alınmasını sağlamaktadır.

Çalışmada incelenen kavramlar, anahtar kelimelerin çok katmanlı bir yapı arz ettiğini göstermektedir. Hüccet, i'lâm, ma'rûz ve mürâsele gibi terimler belgenin türünü; ikrâr, inkâr, beyyine, şehâdet, yemin, sulh ve ibrâ gibi kavramlar yargılama ve ispat sürecini; tereke, mehr, nafaka, vakıf, mülk, deyn, kefâlet, tabib veya maraz gibi kelimeler ise kaydın konu ve ilişki alanını belirlemektedir. Bu nedenle tek bir kelime üzerinden yapılan tarama çoğu zaman kaydın hukukî niteliğini açıklamak için yeterli değildir. Örneğin "mehr" nikâh, boşanma veya tereke içerisinde farklı işlevlerle; "ibrâ" ise borç, sulh veya aile hukukuna ilişkin farklı kayıt türlerinde karşımıza çıkabilmektedir. Benzer şekilde sağlıkla ilgili terimler de klinik bir teşhisten ziyade hukukî ehliyet, miras, yaralanma, borç veya hizmet ilişkisi bağlamında kaydedilmiş olabilir. Bu durum, sicillerde anahtar kelimelerin tek başlarına değil, içinde bulundukları kayıt türü, formül ve kavram kümeleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelime temelli okumanın bir başka önemli sonucu, kadı sicillerinin farklı araştırma alanları arasında kurulabilecek ilişkileri görünür hâle getirmesidir. Aynı kayıt hukuk tarihi bakımından bir işlem veya uyuşmazlığı, iktisat tarihi bakımından fiyat ve borç ilişkilerini, şehir tarihi bakımından mekânları, aile tarihi bakımından akrabalık bağlarını, vakıf tarihi bakımından kurumsal işleyişi ortaya çıkarabilmektedir. Nitekim gayrimenkul kayıtlarında hudut ve komşuluk ifadeleri kentsel topografyanın yeniden kurulmasına imkân verirken; kefalet kayıtları ekonomik ilişkilerin dayandığı sosyal ağların izlenmesini mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla anahtar kelimeler yalnızca bir kayda ulaşmayı sağlayan teknik işaretler değil, aynı belgenin farklı disiplinler tarafından yeniden okunmasını mümkün kılan analitik bağlantı noktalarıdır.

Bununla beraber anahtar kelime temelli araştırmanın birtakım metodolojik sınırlılıkları da bulunmaktadır. Bir kelimenin sicillerde daha sık görülmesi, ilgili toplumsal olgunun aynı ölçüde yaygınlaştığı anlamına gelmeyebilir. Kayıt usulündeki değişiklikler, mahkemenin yetki alanı, defterlerin korunma durumu ve belirli işlemlerin mahkemeye intikal etme oranı nicel sonuçları doğrudan etkileyebilir. Nitekim çalışmada da işaret edildiği üzere belirli kavramların zaman içerisindeki artış veya azalışları, toplumsal değişmenin yanı sıra kayıt pratiğindeki ve kurumsal yapıdaki dönüşümlerin sonucu olabilir. Bu nedenle kelime sıklıkları tarihsel bağlamdan bağımsız biçimde yorumlanmamalıdır.

Çalışmanın ortaya koyduğu en önemli sonuçlardan biri, kadı sicillerindeki derkenârların yalnızca paleografik veya diplomatik ayrıntılar olarak değerlendirilmemesi gerektiğidir. Derkenârda yer alan "icâre" gibi kısa ifadelerin, uzun bir hukukî kaydın konusunu süratle teşhis etmeye imkân vermesi bunun somut örneklerinden biridir. Makalede verilen Eyüp Mahkemesi kaydında da uzun bir satış, istiğlâl ve kiralama işleminin derkenârda "İcâre" kelimesiyle işaretlenmiş olması bu işlevi açık biçimde göstermektedir. Bu örnek, Osmanlı mahkeme defterlerinde bilgiye erişimi kolaylaştıran kısa konu işaretlerinin bulunduğunu ve bunların sicil araştırmalarında ayrıca incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak kadı sicillerinde "anahtar kelime" yaklaşımı, geçmişe modern bir indeksleme sistemini doğrudan uygulamak şeklinde değil, sicilin kendi iç düzeninden hareketle tarihsel bilgiye erişim biçimlerini tespit eden bir yöntem olarak değerlendirilmelidir. Derkenârlardaki kısa konu tanımları ile kayıt metnindeki kavramsal kümelerin birlikte incelenmesi, bir taraftan Osmanlı mahkemelerinin belgeyi nasıl tanımladığı ve tasnif ettiği konusunda yeni veriler sunarken diğer taraftan günümüz araştırmacısına geniş sicil külliyatını daha sistematik biçimde tarama imkânı vermektedir. Bu bakımdan kadı sicillerindeki anahtar kelimeler, yalnızca "hangi kayıt nerede?" sorusuna cevap veren pratik işaretler değil; "Osmanlı mahkemesi bir hukukî ve toplumsal olayı hangi kavramlarla tanımlıyor, sınıflandırıyor ve kayıt altına alıyordu?" sorusunun da cevap anahtarlarından biridir. Bu yönüyle anahtar kelime merkezli okuma, klasik fihrist ve katalog çalışmalarını tamamlayan; hukuk tarihi, sosyal tarih, iktisat tarihi ve dijital beşerî bilimler arasında yeni araştırma imkânları oluşturabilecek metodolojik bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

Kaynakça

Aydın, M. A. (2003). "Mahkeme". Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi. 27/341-344. İstanbul: TDV Yayınları.

Işık, A. (2019). "Şeyhülislâmlık Binalarının Yapımı Şeyhülislâmlığın Dinî ve Hukukî Bir Kompleks Haline Dönüşmesi". Ed. Ayhan Işık-Kamil Büyüker. Ankara: Türkiye Diyanet Vakfı Yayınları, 43-53.

Işık, A. (2019). "Şer'iyye Sicilleri Arşivi", Ağa Kapısından Şeyhülislamlığa İstanbul Müftülüğü, Ed. Ayhan Işık-Kamil Büyüker. Ankara: Türkiye Diyanet Vakfı Yayınları, 233-243.

Özdemir, R. (1986). "Şer'iyye Sicillerinin Sosyo-Ekonomik Tarih ve Halk Kültürü Açısından Önemi", I. Battalgazi ve Malatya Çevresi Halk Kültürü Sempozyumu Tebliğler, (Malatya, 1986), 179-187.

Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 94.

Şeriyye Sicilleri Arşivi, Havâss-ı Refîa Kadılığı Mahkemesi, No. 258, 280, 293, 285, 323.

Şeriyye Sicilleri Arşivi, Rumeli Sadareti Mahkemesi, No. 438.

Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 334, 28.

Şeriyye Sicilleri Arşivi, Evkâf-ı Hümayun Mahkemesi ve Evkâf Muhasebeciliği Sicilleri.

Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 97, 41, 42, 80.

Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 201.

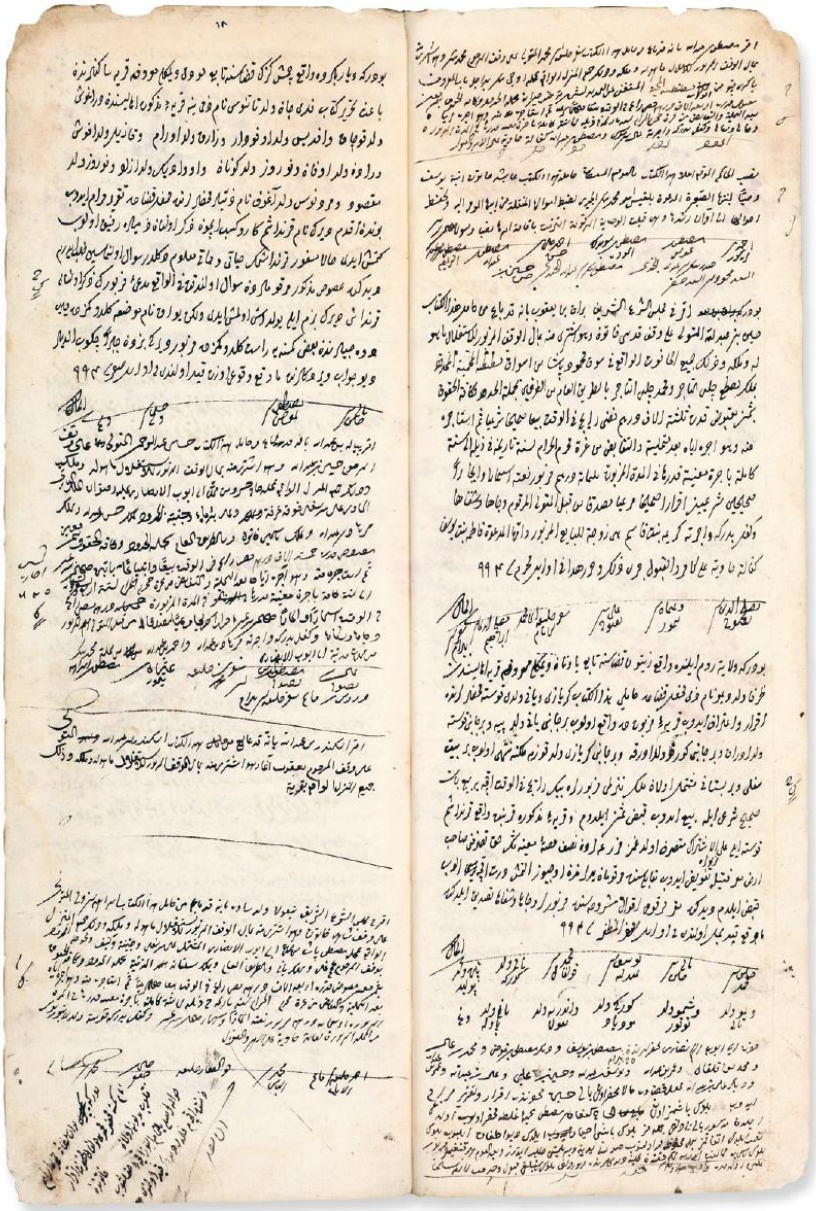
Şeriyye Sicilleri Arşivi, Kısmet-i Askeriye Mahkemesi, No. 2134, 246-248; Kısmet-i Askeriye Mahkemesi, No. 2028, 154; Kısmet-i Askeriye Mahkemesi, No. 2006, 29; Kısmet-i Askeriye Mahkemesi No. 2023, 52-53; Kısmet-i Askeriye Mahkemesi No. 2028, 176-178; Kısmet-i Askeriye Mahkemesi, No. 2023, 27, 31; Kısmet-i Askeriye Mahkemesi, No. 2028, 4, 46, 68, 80, 114, 120, 142, 146, 174.
Şeriyye Sicilleri Arşivi, Evkâf-ı Hümayun Mahkemesi ve Evkâf Muhasebeciliği Sicilleri.
Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 78, 2a.
Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 97, 150.
Şeriyye Sicilleri Arşivi, İstanbul Kadılığı Mahkemesi, No. 78, 5a, 20a, 25a, 59a.
Yıldız, E. (2023). Şeriyye Sicillerinin Tıp Tarihi Açısından Önemi: Osmanlı Devleti'nde Sağlık Çalışanlarının Terekeleri. Ankara: İlahiyat Yayınları.

EKLER

EK 1. Piyâle b. Abdullah'ın evini Hüseyin b. Abdullah Vakfı'na istiğlâl yoluyla sattığı (Eyüb Mahkemesi (Havass-ı Refia) 3 Numaralı Sicil (H. 993 - 995 / M. 1585 – 1587, 18A-2)

[Derkenâr]: İcâre 625 Piyâle b. Abdullah ikrâr etti ki kendisine âid mülkü olan Ebâ Eyyûb el-Ensârî -aleyhi rıdvânü'l-meliki'l-Bârî- mahallâtından Hacı Hüsrev mahallesinde vâki' bir beyt-i süflîyi ve üzerinde bir odayı ve bir su kuyusunu ve cüneyneyi muhtevî olup hudûdu Hasan b. Abdullah mülkü ve Ferhad b. Abdullah mülkü ve Yasemin Hâtun mülkü ve tarîk-i âm ile mahdûd olan cemî' menzilini bi-cümleti'l-hudûd ve kâffeti'l-hukūk mikdârı fıddî râyic fi'l-vakt beş bin akçe semen-i mu'ayyen-i makbûza hâmil-i hâze'l-kitâb merhûm Hüseyin b. Abdullah vakfı'na mütevellî olan Hüseyin b. Abdurrahman'a bey' ve ibtiyâ'-ı sahîhayn-i şer'iyyeyn ile bey' etmeğin ol dahi andan vakf-ı mezbûrun malı ile istiğlâlen iştirâ ettikden sonra ba'de't-tahliyye ve't-tekābuz dokuz yüz doksan dört senesinin Muharremü'l-harâmı gurresinden sene-i kâmile tamâmına değin müddet-i mezbûrede mikdârı beş yüz? mezbûrü'n-na't akçe ücret-i mu'ayyeneye istîcâr eyledikde mütevellî dahi ana îcâr etmeğin istîcâr ve îcâr-ı sahîhayn-i şer'iyyeyn ve ikrâr-ı sarîh-i mer'î mütevelli'l-mezbûr kıbelinden vicâhen ve şifâhen tasdîk olunup derk-i menzile ve ücretine Ebâ Eyyûb el-Ensârî mahallâtından Mehmed Bey mahallesinden Ferhad b. Abdullah ve Ahmed b. Abdullah kefîl olmağın [kayd olundu].

Şuhûdü'l-hâl: Ali b. Nasuh, Mustafa b. Nasuh, Sefer b. Halîfe Mehmed, Osman b. Timur, Mustafa b. İbrahim?, Derviş b. Kasım, Sefer Halîfe b. Bayram



ANTİK ÇAĞDAN ÇAĞDAŞ SANATA SİYAH SERAMİKLER: VOLKANİK KAYAÇ KATKISI VE İNDİRGEN PİŞİRİM SÜREÇLERİNİN SENTEZİ

Doç. Dr. Serap ÜNAL
Süleyman Demirel University, Faculty of Fine Arts Department of Ceramics and Glass
32100 Merkez, Isparta
ORCID ID: 0000-0003-2407-1789

ÖZET

Siyah seramiklerin üretimi, insanlığın kili ateşle buluşturduğu ilk dönemlerden bu yana dinsel, estetik ve işlevsel anlamda zengin bir kültürel sembolizm taşımaktadır. Tarih öncesi Çin'de ritüel amaçlı üretilen karbon karartmalı kaplardan, Klasik Antikite'de tapınak ritüellerinde ve kutsal ziyafetlerde kullanılan siyah firnisli Attika seramiklerine kadar siyahlık, seramik zanaatının en önemli uygulamalarından biri olmuştur.

Seramik bünyelere siyah rengin kazandırılmasında farklı bir role sahip olan indirgen (redüksiyon) pişirim atmosferi ve karbon dumanlama (*carbon smudging*) teknikleri; seramik tarihi, teknolojisi ve sanatsal üretim uygulamaları ekseninde, çalışmanın ana odağını oluşturmaktadır. Bu bağlamda, Anadolu'daki geleneksel sahra tipi fırın kullanımı (Sorkun ve Gökeyüp gelenekleri) ile çukur/dumanlama pişirimleri ve antik dönem fırın rekonstrüksiyonları üzerinden fırın içi atmosfer oluşumları değerlendirilmiştir. Ayrıca, demir ve alkali mineral yönünden zengin bazalt, andezit ve obsidyen gibi doğal volkanik malzemelerin çamur bünyesinde değişimi önleme, doğal renk verme ve pişirim sırasındaki camsı faz gelişimleri değerlendirilmiştir. Obsidyen esaslı deneysel çamurlarda fırınlama esnasında açığa çıkan gazların bünyede hapsolmasıyla oluşan kabarma ve biçim bozulmaları gibi zanaatsal problemlerin fırın yapılarıyla nasıl çözülebileceği ortaya konulmuştur.

Tüm tarihsel, teknolojik ve sanatsal birikimden hareketle bu çalışmanın temel amacı; siyah seramik üretim teknolojisini zanaat, deneysel arkeoloji ve kültürel bağlam ekseninde incelemek, doğal volkanik kayaçların alternatif hammadde olarak kullanım potansiyelini geleneksel zanaat uygulamaları üzerinden ele almaktır. Sonuç olarak bu araştırma, seramik akademisyenleri ve sanatçıları için yalnızca mühendislik odaklı kalıplara bağlı kalmayan, malzeme-pişirim-kültür bütünlüğünü savunan disiplinlerarası bir çalışmadır.

Anahtar Kelimeler: Siyah Seramik, Volkanik Kayaçlar, İndirgen Pişirim, Sahra Fırıncılığı.

BLACK CERAMICS FROM ANTIQUITY TO CONTEMPORARY ART: SYNTHESIS OF VOLCANIC ROCK ADDITION AND REDUCTION FIRING PROCESSES

ABSTRACT

The production of black ceramics has carried a rich cultural symbolism in religious, aesthetic, and functional terms since the earliest periods when humanity brought clay together with fire. From carbon-smudged vessels produced for ritual purposes in prehistoric China to black-glazed Attic ceramics used in temple rituals and sacred feasts in Classical Antiquity, blackness has been one of the most prominent practices of ceramic craft.

The reduction firing atmosphere and carbon smudging techniques, which play a distinct role in imparting black coloration to ceramic bodies, constitute the primary focus of this study within the framework of ceramic history, technology, and artistic production practices. In this context, kiln atmosphere formations were evaluated through traditional open-air firing traditions in

Anatolia (the Sorkun and Gökeyüp traditions), pit/smoke firings, and ancient kiln reconstructions. Furthermore, the role of natural volcanic materials rich in iron and alkali minerals—such as basalt, andesite, and obsidian—in controlling structural changes, providing natural coloration, and facilitating glassy phase development during firing was examined. It has been demonstrated how craft-related problems, such as bloating and structural deformations caused by trapped gases released during the firing of obsidian-based experimental clays, can be resolved through kiln structures and firing regimes.
Drawing upon this entire historical, technological, and artistic heritage, the primary objective of this study is to analyze black ceramic production technology within the nexus of craft, experimental archaeology, and cultural context, and to address the potential of natural volcanic rocks as alternative raw materials through traditional craft practices. In conclusion, this research provides an interdisciplinary study for ceramic scholars and artists that advocates the material–firing–culture synthesis rather than strictly adhering to engineering-oriented models.
Keywords: Black Ceramics, Volcanic Rocks, Reduction Firing, Open-Air Firing.

1. GİRİŞ

Seramik sanatında siyah yüzeylerin elde edilmesi, insanlığın kili ateşle buluşturduğu ilk evrelerden itibaren estetik arayışların ve dinsel sembolizmin merkezinde yer almıştır. Klasik Antikite döneminde, özellikle MÖ 5. ve 4. yüzyıllarda Akdeniz havzasında geniş bir ticari dolaşıma giren parlak siyah firnisli Attika seramikleri, bu üretim teknolojisinin ulaştığı en üst seviyelerden birini temsil etmektedir (Günata, 2017: 29). Klaros kutsal alanındaki Artemis kazılarında ele geçen bu seçkin kaplar, tapınak ve sunaklarda tanrılara sunulan adak objeleri olmalarının yanı sıra, dinsel ziyafetlerde prestijli yeme-içme takımları olarak işlev görmüşlerdir. Kutsal mekânlarda bulunan bu kapların neredeyse tamamının küçük parçalar halinde bulunması, adak sunan kişilerin veya rahiplerin bu nesnelerin tekrar kullanımını veya kutsal alan dışına çıkarılmasını engellemek amacıyla uyguladıkları dinsel bir kırma ritüeline dayanmaktadır (Günata, 2017: 34).
Tarih öncesi dönemlerde de siyah seramik üretimi, zanaatın teknik ve dekoratif gelişiminde belirleyici olmuştur. Anadolu'nun Erken Tunç Çağı III dönemlerinde (örneğin İnönü Mağarası buluntularında) karakteristik olarak görülen "siyah ağız kenarlı (*black-topped*)" çanaklar, kabın iç kısmının tamamen siyah olması ve bu siyahlığın ağız kenarını bir miktar aşarak dış gövdedeki kırmızımsı tonlarla kontrast oluşturduğu özgün bir pişirim tekniğini yansıtmaktadır (Ekmen, 2021: 86). Benzer şekilde, MÖ 3000-2500 yıllarında Neolitik Çin kültürlerinde üretilen seçkin siyah kaplarda zanaatkârlar, kil gövde üzerine uyguladıkları astar (*slip*) tabakasının kalınlığını ve gözenekliliğini ayarlayarak fırınlama sonrası karbon dumanının (*carbon smudging*) nüfuz etme derinliğini başarıyla kontrol etmişlerdir. Bu ileri yüzey teknolojisi sayesinde, dumanlama öncesinde astar kazınarak alttaki açık renkli gövde ortaya çıkarılmış ve fırın sonrasında siyah astar ile açık renkli oyma bezemeler arasında keskin renk zıtlıkları elde edilmiştir (Wu vd., 2026: 2).
Seramik bünyelerde bu derin ve doygun siyahlığın oluşturulması, fırın atmosferindeki oksijen dengesinin zanaatkârca yönetilmesini gerektirir. Seramikte indirgenme (redüksiyon); fırın içinde oksijenin kasıtlı olarak kısıtlandığı dumanlı bir ortam yaratılarak kilde doğal olarak bulunan kırmızı demir oksitlerin (Fe_2O_3), siyah renk veren siyah demir okside (Fe_3O_4) veya demir protokside (FeO) dönüştürülmesi sürecidir (Kılıç, 2023: 362). Tarihsel süreçte bu atmosfer kontrolü; dumanın dışarı kaçmasını önleyen yanma odası, ızgara ve baca sistemine sahip kalıcı kubbeli fırın mimarilerinin gelişimiyle nitelik kazanmıştır (Çetintaş, 2018: 1749). Anadolu'nun geleneksel sahra fırıncılığında (Sorkun ve Gökeyüp geleneklerinde) görüldüğü

üzere, kapların ters dizilerek dumanın rüzgâr yardımıyla bünyeye nüfuz ettirilmesi, antik atmosfer yönetiminin günümüzdeki zanaat izleridir.

Bu geleneksel üretim süreçlerinde, demir ve alkali mineraller açısından zengin volkanik kayaçların alternatif hammadde olarak kullanımı, siyah seramiklerin mekanik dayanıklılığını ve yüzey dokusunu zenginleştiren önemli bir yaklaşımdır. Killi bünyeye dâhil edilen bazaltik tüfler, şekillendirme ve kuruma aşamalarında plastikliği yüksek killerin gösterdiği aşırı küçülme ve çatlama eğilimlerini dengelerken; bünyenin alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum dioksit (SiO_2) ve demir oksit (FeO) niteliğini yükselterek pişirim sonrasında dokusal etkiler yaratmaktadır (Özben ve Sakarya, 2021: 183). Buna karşın, amorf camsı yapıya sahip obsidyen esaslı çamurlarla çalışıldığında, fırınlama esnasında açığa çıkan gazların erken oluşan camsı tabaka sebebiyle dışarı atılamaması bünyede kabarma, biçim bozulması ve gaz sıkışması gibi zanaatsal problemlere yol açmakta; bu durum soğutma ve pişirim usullerinin özel olarak kurgulanmasını zorunlu kılmaktadır.

Tüm bu tarihsel, teknolojik ve sanatsal birikimden hareketle bu çalışmanın temel amacı; siyah seramik üretim teknolojisini zanaat, deneysel arkeoloji ve kültürel bağlam ekseninde incelemek, doğal volkanik kayaçların alternatif hammadde olarak kullanım potansiyelini teknik karmaşanın ötesinde pratik zanaat uygulamaları üzerinden ele almaktır.

2. TARİHSEL SÜREÇTE SİYAH SERAMİKLER

2.1. Tarih Öncesi Çin Siyah Çömlekçiliğinde Karbon Karartma ve Astar (Slip) Teknolojisi

Tarih öncesi dönemlerde siyah yüzey elde edilmesi, killi bünyenin dumanlanmasından ibaret basit bir işlem olmayıp, hammaddenin hazırlanışından pişirim sonrası işlemlere kadar uzanan karmaşık bir zanaat zincirine dayanmaktadır (Rice, 1987: 8; Ökse, 2012: 46). Özellikle MÖ 3000-2500 yılları arasında Çin'in Liangzhu, Qujialing ve Nanzuo gibi Neolitik yerleşimlerinde üretilen seçkin siyah kaplar (Şekil 1), karbon karartma (*carbon smudging*) ile astar (*slip*) teknolojisinin bilinçli bir bileşimini temsil etmesi bakımından seramik tarihinde özgün bir yere sahiptir (Wu vd., 2026: 1).

Arkeometrik incelemeler ve deneysel replikasyon çalışmaları; dumanlama derinliğinin kontrol edilmesinde, pişmiş kil gövde ile üzerine uygulanan astar tabakası arasındaki mikro-yapısal



Şekil 1. *Karbon karartmalı Çin Çömlekçiliği*

sinterleşme (camlaşma) ve gözeneklilik (*porosity*) zıtlığının belirleyici olduğunu göstermiştir (Rice, 1999: 12). Biçimlendirilen kil gövde ön pişirime tabi tutulduğunda yüksek sıcaklığın etkisiyle kildeki tanecikler birbirine kenetlenerek yoğun bir camlaşma aşamasına geçmekte ve gözenek hacmi daralmaktadır. Pişmiş gövde üzerine çekilen ince kil astarı ise henüz ham ve son derece yüksek gözenekliliğe sahip bir katman oluşturur. Kaplar dumanlı ve indirgen bir ortama maruz bırakıldığında, açığa çıkan karbon ve is partikülleri yüksek gözenekli astar tabakasına kolayca işleyip hapsolurken, camlaşarak sıkılaşmış iç gövdeye sızamamaktadır (Li ve Wei, 2020: 15; Wu vd., 2026: 4). Böylece siyahlık, iç bünyeye yayılmaksızın tamamen yüzeydeki astar katmanında hapsedilerek kalıcı kılınmaktadır (Shen vd., 2008: 43).

Bu özel yüzey uygulaması, dumanlama öncesinde uygulanan oyma bezemelerin (*carved decorations*) pişirim sonrasında yüksek görsel kontrastlarla ön plana çıkarılmasına imkân tanımıştır. Zanaatkârlar henüz nemli olan astarı belirli hatlar boyunca kazıyarak alt kısımdaki açık renkli pişmiş gövdeyi açığa çıkarmışlardır. Fırınlama sonrasında hapsolan siyah astar ile kazınan kanallardaki açık renkli gövde arasında oluşan keskin renk zıtlığı, dekoratif kompozisyonlara boyut kazandırmıştır. Astarın fırınlama esnasında gövdeden ayrılmasını önlemek, mikro çatlakları kapatmak ve dumanlanan yüzeye metalik bir parlaklık kazandırmak amacıyla, yüzey deri sertliğindeyken taş veya kemik aletlerle yoğun bir perdahlama (*burnishing*) işleminden geçirilmiştir (Özdoğan, 2019: 251; Wu vd., 2026: 4).

2.2. Klasik Dönem Siyah Firnisli Attika Seramikleri

Klasik Antikite döneminde, özellikle MÖ 5. ve 4. yüzyıllarda Akdeniz havzasındaki ticari ve kültürel dolaşımın en prestijli unsurlarından biri parlak siyah firnisli Attika (Şekil 2) seramikleridir (Cook, 1960: 42; Günata, 2017: 28-29). Atina atölyelerinde üstün bir zanaat disipliniyle üretilen bu kapların form ve bezeme dilinde, MÖ 6. yüzyıl sonlarından itibaren Ege dünyasını etkileyen Pers (Akhamenid) metal kap uygulamalarının belirgin izleri takip edilebilmektedir (Boardman, 1970: 112; Günata, 2017: 28). Apadana kabartmalarındaki metal kap örneklerinde görüldüğü gibi; vazo yüzeyine işlenen dikey yivler, döküm izlerini taklit eden kabartmalar ve dışa dönük profilli ağız kenarları, siyah firnisin metalik yansımasıyla birleşerek seramiğe madeni kap görünümü kazandırmıştır (Sparkes ve Talcott, 1970: 88).



Şekil 2. *Firnisli Attika Seramiği (arkeolojihaber.com)*

Klaros Kutsal Alanı Artemis bölümünde gerçekleştirilen kazı çalışmaları, siyah firnisli Attika kaplarının dinsel ritüellerdeki ve sosyo-kültürel yaşamdaki işlevsel karşılıklarını açıkça belgelemektedir (Dewailly, 2009: 14). Bu kaplar (Şekil 3), tapınaklarda tanrıçaya sunulan kıymetli adak objeleri (*votive offerings*) olmalarının yanı sıra, kurban törenlerinin ardından icra edilen dinsel ziyafetlerde libasyon dökme ve yemek tüketme takımları olarak kullanılmışlardır

(Pena, 2009: 29). Kutsal alanda ele geçen seramiklerin büyük bir çoğunluğu son derece küçük parçalar halinde kırılarak korunmuştur. Burada amaç, adak sunulan nesnenin tanrıya ait sayılması sebebiyle kutsal mekân dışına çıkarılmasını veya başka amaçlarla yeniden kullanımını engellemektir. (Coldstream, 2003: 332).

Klaros Artemis bölümündeki buluntular incelendiğinde; *skyphos, cup-skyphos, kylix, stemless*, kantharos ve kâse gibi açık içki ve sofra kaplarının yoğunlukta olduğu görülmektedir (Sezgin, 2008: 197; Günata, 2017: 30-33).

Buna karşın *olpe* veya *oinochoe* gibi sıvı aktarımında kullanılan kapalı kapların oldukça sınırlı



Şekil 3. *Artemis Tapınağı, skyphos MÖ 430-425 (Wikimedia.com)*

sayıda kalması, dinsel törenlerde ziyafet kaplarının özel bir seçilime tabi tutulduğunu kanıtlamaktadır (Dewailly, 2009: 18). Siyah firnisin Akdeniz pazarındaki yüksek ekonomik değeri ve saygınlığı, Atina dışındaki birçok bölgesel üretim merkezini yerel kil yataklarını kullanarak bu teknolojiyi taklit etmeye yöneltmiştir (Sparkes ve Talcott, 1970: 124). Ephesos, Smyrna, Samos, Klazomenai, Sardis ve Gordion gibi Doğu Ege ve Anadolu merkezlerinde, yerel killi bünyeler üzerine uygulanan astar ve firnislerle Atina formlarında taklit siyah firnisli kaplar üretilerek bölgesel pazarlara verilmiştir.(Cook, 1965: 143; Hasdağlı, 2017: 45).

3. FIRIN VE PİŞİRİM TEKNOLOJİLERİ

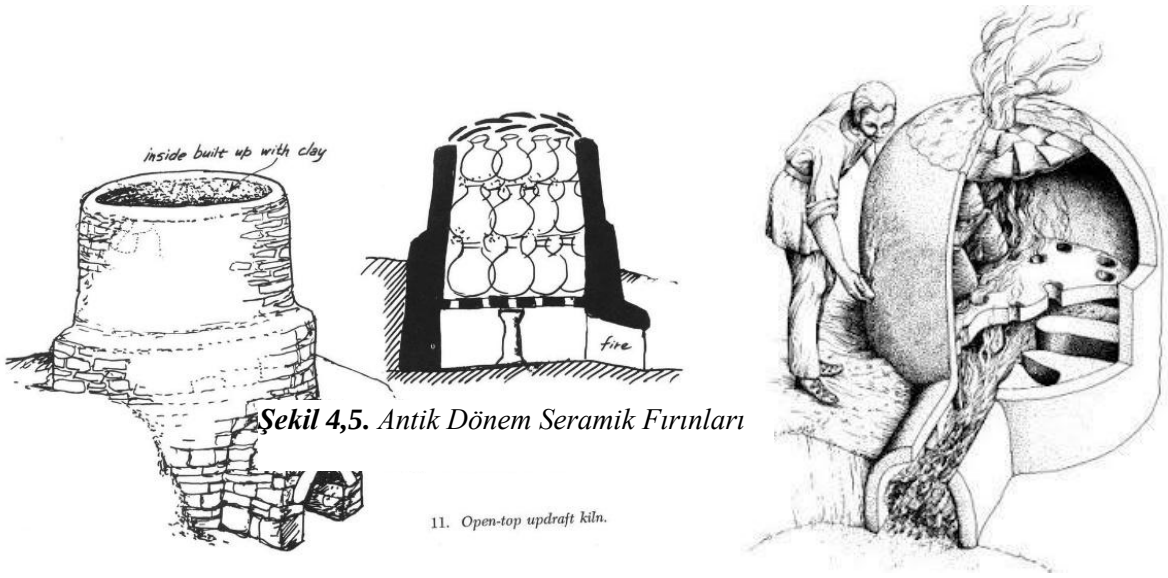
3.1. Antik Dönem Fırın Mimarisi

Antik çağ zanaatkârlarının hedefledikleri yüksek pişirim derecelerine ve kararlı indirgenme atmosferine ulaşabilmeleri, fırın mimarisindeki teknolojik gelişmelerle mümkün olmuştur. Arkeolojik kazı verileri ve deneysel arkeoloji uygulamaları; antik fırınların basit yığma yapılardan, yanma odası, delikli ızgara ve pişirme haznesi barındıran gelişmiş kalıcı kubbeli fırın mimarilerine doğru evrildiğini göstermektedir (Çetintaş, 2018: 1749-1750).

Deneysel fırın rekonstrüksiyonları üzerinde gerçekleştirilen ısıl ölçümler, fırın mimarisindeki yapısal bileşenlerin atmosfer yönetimindeki önemli rolünü doğrulamaktadır (Şekil 4). Fırın bacasının (*draft*) genişletilmesi ve hava çekişinin optimize edilmesi sayesinde fırın içi sıcaklığın 844°C'den antik dönem standartları olan 1036°C seviyelerine kadar yükseltilebildiği tespit edilmiştir. Yapıda yer alan ateşleme koridoru, dışarıdan gelen soğuk havanın pişmekte olan seramiklere doğrudan temasını keserek ani ısıl şokları önlemekte; zemin seviyesinin altına inşa edilen yanma odası (cehennemlik) ise hem yüksek ısı yalıtımı sağlamakta hem de kemer sistemine fiziksel destek olmaktadır (Şekil 5). Yanma odası ile pişirme haznesini ayıran delikli ızgara gazların eşit dağılımını sağlarken, duvarlardaki gözetleme delikleri zanaatçının bir kanca yardımıyla deneme parçalarını çekerek fırın içi redüksiyon safhasını anlık takip etmesine olanak tanımaktadır (Çetintaş, 2018: 1754-1755).

3.2. İndirgen (Redüksiyon) Pişirim ve Kimyasal Atmosfer Dengesi

Seramik teknolojisinde siyah bünye elde edilmesi, fırınlama esnasındaki termal yükseliş kadar fırın haznesindeki gaz dengesinin ve oksijen oranının zanaatkârca yönetilmesine dayanmaktadır. Yükseltgen (oksidasyon) pişirimlerde organik maddeler serbest oksijenle



Şekil 4,5. *Antik Dönem Seramik Fırınları*

birleşerek ortamı terk ederken; dumanlı ve gazlı bir ortamın kurgulandığı indirgen (redüksiyon) atmosferde fırına giren oksijen miktarı kasıtlı olarak kısıtlanmaktadır (Kılıç, 2023: 360-362). Bu atmosferik müdahale, kil matrisi içindeki metalik oksitlerde köklü bir faz dönüşümünü tetikler. Kilde doğal olarak bulunan ve bünyeye kırmızı rengini veren kırmızı demir oksit (Fe_2O_3), fırındaki serbest karbon ve karbonmonoksit gazlarının oksijene açlığı sebebiyle indirgenerek siyah demir oksit (Fe_3O_4) veya demir protoksite (FeO) dönüşür (Kılıç, 2023: 362; Koç ve Taşçı, 2023: 145).

İndirgenme sürecinde elde edilen siyahlığın derinliği ve renk kalıcılığı; fırın atmosferindeki karbon yoğunluğuna, ısıl bekleme sürelerine ve killi bünyenin mikro gözenek yapısına bağlıdır (Wu vd., 2026: 4). Odun, çam çırası veya talaş gibi reçine oranı yüksek organik malzemelerin yakılmasıyla açığa çıkan is partikülleri, henüz camlaşmamış açık killi gözeneklere nüfuz ederek bünyede kalıcı bir karbon katmanı oluşturur (Şekil 6). Ancak renk dönüşümünün kararlı kılınması için termal uygulama ile kimyasal atmosfer dengesinin eşzamanlı yürütülmesi gerekir; aksi halde eksik indirgenme kararsız kestane-kahve tonlarına, kontrolsüz dumanlama ise bünyede direnç kayıplarına yol açmaktadır (Eren Gültekin, 2020: 92; Kılıç, 2023: 362).

3.3. Sahra Tipi Pişirimden Dumanlama Pişirimlerine Zanaat Sürekliliği

Geleneksel Anadolu çömlekçiliğinde, sabit bir fırın yapısına ihtiyaç duyulmaksızın açık alanda yürütülen sahra pişirimleri, antik atmosfer yönetimi ve indirgenme prensiplerinin günümüzdeki etnografik kanıtlarıdır (Kılıç, 2023: 363). Manisa Gökeyüp çömlekçiliğinde açık alana



Şekil 6. *Kil bünyesinde kalıcı bir karbon katmanı oluşumu.*

istiflenen kapların üzeri kırık seramik parçalarıyla örtülerek geçici bir ısı haznesi oluşturulurken (Şekil 7); Eskişehir Sorkun çömlekçiliğinde **(görsel)** kaplar ağızları yere gelecek şekilde düzenlenmekte, rüzgarın yönlendirdiği duman çömlek yüzeylerinde doğal is lekeleri ve indirgenme izleri bırakmaktadır (Özben ve Sakarya, 2021: 183; Kılıç, 2023: 365).

Benzer bir atmosferik mantıkla yürütülen çukur ve dumanlama pişirimlerinde ise kapalı bir fırın yapısı olmaksızın zengin siyah-gri yüzey efektleri elde edilmektedir (Şekil 8). Toprağa açılan bir çukurun tabanına yerleştirilen dumanlama malzemeleri yakıldıktan sonra çukurun üzeri sac veya toprak tabakasıyla kapatılarak duman içeriye hapsedilir. Dış hava girişinin kesildiği bu mikro atmosferde yanmaya devam eden organik maddeler, ortamdaki oksijeni tamamen tüketerek seramik yüzeylerinde kalıcı karbon birikimi ve hedeflenen derin siyahlığı meydana getirir (Kılıç, 2023: 378; Wu vd., 2026: 4).



Şekil 7. *Gökeyüp Çömlekçiliğinde Açık Pişirim*



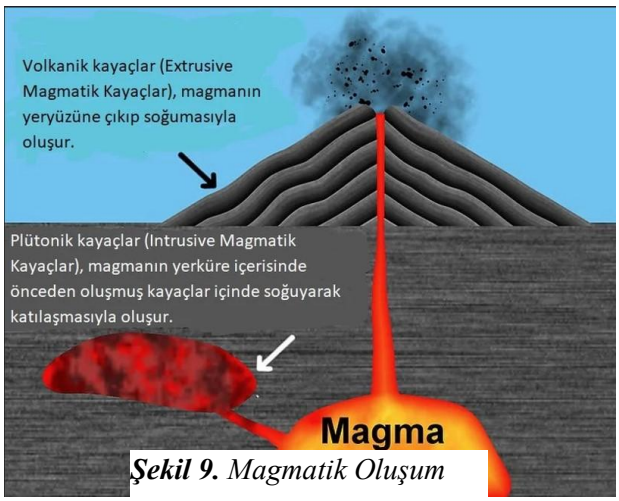
Şekil 8. *Siyah Yüzey Elde edilen Sorkun Çömleği*

4. VOLKANİK KAYAÇLARIN ZANAATSAL DEĞERİ VE DENEYSEL KULLANIMI

4.1. Volkanik Kayaçların Jeolojik Oluşumu, Alternatif Ergitici Potansiyeli ve Seramik Sektöründeki Yeri

Geleneksel seramik bünyelerde camsı faz gelişimini sağlayan kaliteli sodyum ve potasyum feldspat yataklarının küresel ölçekte hızla tüketilmesi, seramik endüstrisini ve zanaat atölyelerini alternatif ergitici (akışkanlaştırıcı) arayışlarına yöneltmiştir (Dondi, 2018: 193; Candamano vd., 2023: 2). Volkanik faaliyetler sonucu oluşan ve doğada masif kütleler halinde bulunan igneous kayaçlar; içerdikleri yüksek alkali metal oksitleri (Na_2O, K_2O), toprak alkaliler (CaO, MgO) ve demir oksitler (Fe_2O_3, FeO) sayesinde yüksek sıcaklık reaksiyonlarında ergime kolaylığı sunarak nitelikli ergitici hammaddeler oluştururlar (Seyhan, 1969: 125; Dondi, 2018: 195).

Jeolojik açıdan volkanik kayaçların oluşumu, magmanın soğuma derinliğine ve kimyasal bileşimine bağlı olarak farklılık gösterir (Seyhan, 1969: 126). Asidik ve nötr lavların hidrotermal alterasyonu esnasında feldspatik bileşenlerin çözünerek alüminyum-hidro-silikatlara dönüşmesi, seramik sektörü için hayati önem taşıyan kaolin provenslerinin doğmasını sağlamıştır (Şekil 9). Anadolu jeolojisinde, özellikle Batı Anadolu fay hatları



Şekil 9. *Magmatik Oluşum*

boyunca uzanan andezit, bazalt ve tüf formasyonları, yüksek mineralli yapılarıyla seramik çamuru ve sır reçetelerinde doğal akışkanlaştırıcı ve renklendirici olarak kullanılabilmektedir (Seyhan, 1969: 133; Özben ve Sakarya, 2021: 183). Volkanik kayaçların bünyeye dahil edilmesi, sır ve çamurun pişirim sıcaklığını düşürerek enerji tasarrufu sağlarken, ithal hammadde bağımlılığını azaltıp yerel atıkların ekonomiye kazandırılmasına da imkan tanımaktadır (Eren Gültekin, 2020: 91; Kurama vd., 2023: 817).

4.2. Bazalt, Andezit ve Tüf Katkılarının Seramik Bünye ve Sır Yapısındaki Teknolojik Etkileri

Demir ve magnezyum yönünden zengin bazik bir volkanik kayaç olan bazalt ile tüf türevleri, seramik çamurlarının mekanik dayanımını ve yüzey dokusunu geliştirmede son derece etkindir. Kütahya Ilıca yöresi bazaltik andezitleri üzerinde yapılan petrografik ve kimyasal analizler; kayacın ana mineralojisini plajiyoklaz (labradorit), piroksen (ojit), olivin ve opak demir minerallerinin oluşturduğunu; kimyasal bileşiminde ise %52,80 SiO_2, %15,60 Al_2O_3, %8,03



Şekil 10. *Kayaç Türleri ve Oluşumu. (M.C. Kankılıç/instagram.com)*

Fe_2O_3 ve %9,00 CaO barındırdığını göstermektedir (Çelik ve Şahbaz, 2017: 889-890). Plastisitesi yüksek olan ve kuruma esnasında aşırı büzülerek çatlama riski taşıyan killerde, bünyeye mikronize bazaltik tüf katılması kuruma ve pişme büzülmesini kontrol altına almaktadır (Şekil 10). Homojen yapıdaki bazaltik tüfler, killi bünyenin alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum dioksit (SiO_2) ve demir oksit (FeO) niteliğini yükseltirken, pişirim sonrasında yüzeyde noktasal ve dokusal lekeli efektler meydana getirmektedir (Özben ve Sakarya, 2021: 183-188).

Volkanik kayaçların sır teknolojisindeki zanaatsal kullanımı ise doğal renklendirme ve kristal faz gelişimi açısından özgün sonuçlar doğurmaktadır. Nevşehir-Tatlarin yöresi bazaltının öğütülerek opak çömlek sırlarına katıldığı deneysel çalışmalarda, ilave edilen bazalt oranı arttıkça yüzey renginin doygun kestaneden siyaha doğru koyulaştığı tespit X-ışını kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDX) analizleri, bazalt ilavesiyle sır bünyesinde yüksek mekanik mukavemet sağlayan anortit ($CaAl_2Si_2O_8$), diopsit ve magnetit/Fe_2O_3 kristallerinin geliştiğini doğrulamaktadır (Eren Gültekin, 2020: 93-94; Kurama vd., 2023: 821-822). Ayrıca doğal bir pigment işlevi gören bazalt kullanımı, sır formüllerinde opasite sağlayan pahalı ithal zirkon **($ZrSiO_4$)** hammaddesinin kullanım oranını düşürerek ekonomik avantaj yaratmaktadır. Benzer şekilde endüstriyel bazalt kesim atıklarının kalsine edilerek mat sırlara eklenmesiyle, 1000°C - 1100°C pişirim aralığında yüzeyde estetik benekli dokular ve anortit bazlı kristal fazlar elde edilmektedir (Kurama vd., 2023: 818-821).

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Siyah seramiklerin üretimi, kille ateşin buluştuğu ilk tarihsel evrelerden bu yana yalnızca işlevsel bir kap üretme süreci olmamış; dinsel ritüellerden prestij göstergelerine, üstün zanaat disiplininden gelişkin malzeme bilgisine uzanan zengin bir kültürel sembolizm taşımıştır. Bu çalışmada; siyah seramik teknolojisi tarihsel kökenleri, fırın ve pişirim dinamikleri ile doğal volkanik kayaçların kullanımı ekseninde bütüncül bir yaklaşımla ele alınmış, zanaat ve bilim arasındaki vazgeçilmez bağ yeniden değerlendirilmiştir.

Seramik bünyelerde kalıcı ve doygun bir siyahlığın elde edilmesi, geleneksel yükseltgen pişirim kalıplarının dışına çıkılarak fırın ortamında oksijenin kasıtlı olarak kısıtlandığı indirgen (redüksiyon) atmosferin kurgulanmasına bağlıdır. Fırın içerisindeki karbon monoksit gazının etkisiyle kildeki kırmızı demir oksitlerin siyah demir oksit formlarına dönüşmesi ve dumanlama esnasında is partiküllerinin gözenekli kil matrisine işlemesi, siyah seramik kimyasının özünü oluşturur. Antik dönemin kalıcı kubbeli fırın mimarilerinden Anadolu'da günümüzde varlığını sürdüren sahra fırıncılığı geleneklerine kadar fırın içi gaz dengesinin ve ısıl rejimlerin yönetilmesi, zanaat başarısının en kritik parametresidir.

Demir, alkali ve magnezyum mineralleri açısından zengin olan bazalt, andezit ve tüf gibi volkanik malzemelerin seramik bünyelerine dâhil edilmesi; plastikliği yüksek killerde kuruma ve pişme küçülmelerini dengelemekte ve bünyenin mekanik dayanımını artırmaktadır. Bu kayaçların öğütülerek sır ve bünye formüllerine katılması, ithal renklendirici pigmentlere ve opasifiye edici hammaddelere olan ihtiyacı azaltarak ekonomik ve ekolojik avantajlar sunmakta; pişirim sonrasında anortit bazlı kristal gelişimleriyle yüzeyde koyu kahveden siyaha uzanan doğal renk paletleri meydana getirmektedir.

Antik Çağ'dan günümüze ulaşan siyah seramik teknolojisi, yerel killi hammaddeler ve volkanik bazalt tüfü katkıları ekseninde deneysel bir metodolojiyle yeniden değerlendirilmiştir Elde edilen bulgular, geleneksel zanaat birikimi ile modern malzeme bilimini sentezleyerek hem disiplinlerarası arkeoseramik literatürüne hem de çağdaş seramik uygulamalarına sürdürülebilir özgün katkılar sağlamayı hedeflemektedir.

KAYNAKÇA

Boardman, J. (1970). *Athenian Red Figure Vases: The Classical Period*. Thames and Hudson.

Candamano, S., De Luca, P., Garofalo, P., & Crea, F. (2023). Ceramic materials containing volcanic ash and characterized by photoluminescent activity. *Environments,* 10(10), 172. https://doi.org/10.3390/environments10100172

Coldstream, J. N. (2003). *Geometric Greece 900–700 BC*. Routledge.

Cook, J. M. (1965). Old Smyrna: Fourth-Century Black Glaze. *The Annual of the British School at Athens*, 60, 143-153.

Cook, R. M. (1960). *Greek Painted Pottery*. Methuen.

Çelik, M. Y., & Şahbaz, A. (2017). Ilıca (Kütahya) bazaltının beton agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 20(4), 887-898. https://doi.org/10.2339/politeknik.369061

Çetintaş, E. (2018). Roma Dönemi seramik fırın yapısının yeniden hayata geçirilmesi üzerine somut bir yaklaşım. *Ulakbilge Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(31), 1748-1763. https://doi.org/10.7816/ulakbilge-06-31-09

Dewailly, M. (2009). Les céramiques à vernis noir de Claros. *Le Sanctuaire de Claros et son Oracle*, MOM Éditions, 13-30.

Dondi, M. (2018). Feldspathic fluxes for ceramics: Sources, production trends and technological value. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 191-205. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.027

Ekmen, H. (2021). İnönü Mağarası Erken Tunç Çağı çanak çömleği. *TÜBA-AR Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*, (28), 81-102.

Eren Gültekin, E. (2020). Opak çömlek sırına bazalt ilavesinin araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(1), 90-97. https://doi.org/10.29137/umagd.481501

Günata, G. (2017). Klaros Artemis Sektöründen Siyah Firnisli Attika Seramikleri. *Türk Arkeoloji ve Kültürel Miras Enstitüsü Dergisi*, (01), 24-47. https://doi.org/10.54930/TARE.2021.1

Hasdağlı, İ. (2017). Bir deneme parçası ışığında Doğu Thrakia'da Attika taklidi siyah firnisli seramik üretimi. *Trakya Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi*, 7(13), 45-56.

Kılıç, A. C. (2023). İndirgen (redüksiyon) ortamda sırsız seramik pişirim teknikleri ve uygulama yöntemleri. *Ankara Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Dergisi*, 5(1), 360-378.

Koç, M., & Taşçı, E. (2023). Siyah seramik bünye üretiminde (Fe,Cr)2O3 içerikli atıkların renklendirici etkisinin araştırılması. *ICSUSAT 2023 Proceedings Book*, 145-155.

Kurama, S., Gürkan, E. A., Bayer Öztürk, Z., Karaca, Y., & Ubay, E. (2023). Bazalt kesim atıklarının yer karosu mat sırlarda kullanım potansiyelinin araştırılması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(3), 816-825. https://doi.org/10.31796/ogummf.1336323

Li, W., & Wei, Q. (2020). Research on the carbon smudging technology of Neolithic black pottery. *Journal of Archaeological Science*, 115, 105-118.

Ökse, T. (2012). *Ön Asya Arkeolojisinde Çanak Çömlek: Teknik Özellikler, Biçimler*. Arkeoloji ve Sanat Yayınları.

Özben, M., & Sakarya, N. (2021). Çukurova bölgesi toprakları ile seramik yüzeylerde resimsel değerler. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 30(2), 182-194. https://dergipark.org.tr/tr/pub/cusosbil

Özdoğan, M. (2019). *Hammaddeden Ustalara Tarihöncesi Arkeolojisinde Malzeme*. Arkeoloji ve Sanat Yayınları.

Pena, J. T. (2009). *Roman Pottery in the Archaeological Record*. Cambridge University Press.

Rice, P. M. (1987). *Pottery Analysis: A Sourcebook*. University of Chicago Press.

Rice, P. M. (1999). On the origins of pottery. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 6(1), 1-54.

Seyhan, İ. (1969). Volkanik kaolinin oluşumu ve andezit problemi. *MTA Dergisi*, (72), 119-130.

Sezgin, Y. (2008). Apollon Klarios Kutsal Alanı Artemis Sektörü 2003–2004 Yılı Çalışmaları. *Ege Üniversitesi Arkeoloji Dergisi*, 12, 191-203.

Shen, J. X., Zhai, J. W., Li, C. S., & Zhang, L. (2008). Longshan black pottery microstructure analysis and cementation craft research. *China Ceramics*, 3, 43-45.

Sparkes, B. A., & Talcott, L. (1970). *Black and Plain Pottery of the 6th, 5th and 4th Centuries B.C. (The Athenian Agora, Vol. 12)*. American School of Classical Studies at Athens.

Wu, H., Ma, R., Cui, J., Chen, M., Tao, Y., Zhou, Z., Qin, L., Zhang, H., Zhang, X., & Han, J. (2026). Technology of slip affecting carbon smudging depth in prehistoric Chinese black pottery: Scientific analyses and simulation experiments. *Archaeometry*, 68(1), 1-15. https://doi.org/10.1111/arcm.70191

2000'DEN 2025'E PROTON DEĞİŞİM MEMBRANLI YAKIT HÜCRESİ ARAŞTIRMALARI: BİR BİBLİOMETRİK ANALİZ

Turan Alp ARSLAN
Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye
ORCID ID: 0000-0003-3259-4854

ÖZET
Bu çalışmada, proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC) literatürünün gelişimi ve araştırma eğilimleri bibliyometrik olarak incelenmiştir. Veri seti, Web of Science Core Collection'dan elde edilmiş olup 2000-2025 dönemini kapsayan İngilizce araştırma ve derleme makalelerden oluşan 27782 yayın analiz edilmiştir. Analizler, R programlama dili kullanılarak Bibliometrix paketi ve Biblioshiny arayüzü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmelerde yıllık yayın üretimi, yıllık ortalama atıf performansı, ülkelerin bilimsel üretimi, en ilgili kaynaklar ve kurumlar, en fazla atıf alan yayınlar ve anahtar kelime dağılımları incelenmiştir. Ayrıca, anahtar kelimelerin birlikte kullanım analizi gerçekleştirilerek belirlenen ilişkiler ağ haritası üzerinden görselleştirilmiştir. Bulgular, PEMFC alanındaki yayın üretiminin incelenen dönem boyunca sürekli arttığını göstermiştir. Çin, bilimsel üretimde öne çıkan ülke olurken *International Journal of Hydrogen Energy* ve *Journal of Power Sources* en fazla yayın üreten kaynaklar arasında yer almıştır. En ilgili kurumlar ve en çok atıf alan yayınlar, belirli araştırma merkezleri ve yayınların alandaki bilimsel gelişimde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Anahtar kelime analizi, PEMFC araştırmalarının başta yakıt hücresi performansı, oksijen indirgenme reaksiyonu, elektrokatalizörler, membranlar, dayanıklılık ve su yönetimi olmak üzere çeşitli konularda yoğunlaştığını göstermiştir. Sonuçlar, PEMFC araştırmalarının hızla genişleyen ve farklı araştırma konularını bir araya getiren çok disiplinli bir yapıya ulaştığını ortaya koymuştur.
Anahtar kelimeler: Bibliyometrik analiz, Elektrokatalizör, Hidrojen enerjisi, Proton değişim membranı, Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC).

PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL RESEARCH FROM 2000 TO 2025: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

ABSTRACT
In this study, the development and research trends of the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) literature were bibliometrically examined. The dataset was obtained from the Web of Science Core Collection and consisted of 27,782 English-language research and review articles covering the period from 2000 to 2025. The analyses were conducted using the Bibliometrix package and the Biblioshiny interface through the R programming language. The evaluations examined annual scientific production, annual average citation performance, scientific production by country, the most relevant sources and affiliations, the most highly cited publications, and keyword distributions. In addition, a co-occurrence analysis of keywords was performed, and the identified relationships were visualized through a network map. The findings showed that scientific production in the PEMFC field continuously increased throughout the examined period. China was the leading country in scientific production, while *International Journal of Hydrogen Energy* and *Journal of Power Sources* were among the sources with the highest number of publications. The most relevant affiliations and the most highly cited publications revealed that specific research centers and publications played an

important role in the scientific development of the field. The keyword analysis showed that PEMFC research was concentrated on various topics, particularly fuel cell performance, oxygen reduction reaction, electrocatalysts, membranes, durability, and water management. The results revealed that PEMFC research has reached a rapidly expanding and multidisciplinary structure bringing together different research topics.
Keywords: Bibliometric analysis, Electrocatalyst, Hydrogen energy, Proton exchange membrane, Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC).

1. INTRODUCTION

The widespread use of fossil fuels in transportation, industry, and electricity generation causes environmental problems such as high greenhouse gas emissions and air pollution. In addition, limited fossil fuel reserves, fluctuations in energy prices, and uncertainties regarding energy supply security increase the need for sustainable energy systems (Yue et al. 2021). These problems accelerate research into the development of lower-emission, efficient, and sustainable technologies for energy production and use. In this context, hydrogen is considered an important energy carrier because it can be used in different energy conversion systems (Liu et al. 2022). The use of hydrogen in fuel cells enables the generation of electrical energy without the need for a combustion process, and water is formed along with electricity and heat as a result of the reaction between hydrogen and oxygen (Wang et al. 2022). These characteristics make fuel cells an important technology for low-emission energy conversion, particularly in transportation and stationary power applications.

The origins of fuel cell technology date back to the hydrogen-oxygen cell experiments conducted by William Grove in 1839 (Arslan and Bayrakçeken 2025). Studies on the use of fuel cells for electricity generation gained momentum in the 20th century, and the technology began to be used as a power source in space programs in the 1960s (Qasem 2024). Today, fuel cells are classified into different types depending on the type of electrolyte used, including the alkaline fuel cell (AFC), phosphoric acid fuel cell (PAFC), molten carbonate fuel cell (MCFC), solid oxide fuel cell (SOFC), and proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) (Kahraman and Akın 2024). PEMFCs primarily consist of a proton exchange membrane, catalyst layers, gas diffusion layers (GDLs), bipolar plates, and sealing elements (Arslan et al. 2025). During operation of the system, hydrogen and oxygen are fed into the cell through the bipolar plates and transported to the respective catalyst layers through the GDLs. Hydrogen is separated into protons and electrons at the anode catalyst layer. While protons move toward the cathode through the proton exchange membrane, electrons are transported through the external circuit, generating an electric current. At the cathode catalyst layer, protons, electrons, and oxygen react, producing water and heat (Huang et al. 2022).

PEMFCs have become one of the most widely used fuel cell types, particularly in transportation applications, due to their low operating temperature, high power density, and ability to respond rapidly to load changes (Kocakulak and Arslan 2023). However, high cost, durability issues, and limited hydrogen infrastructure are among the main factors affecting the widespread adoption of the technology (Arslan et al. 2026). One of the important performance limitations in PEMFCs is the slow kinetics of the oxygen reduction reaction (ORR) occurring at the cathode. Therefore, catalysts containing platinum group metals (PGMs) are widely used to achieve high electrocatalytic activity, which increases cell cost (Fan et al. 2021). High proton conductivity in membranes must be achieved together with chemical and mechanical durability. Chemical degradation or loss of mechanical integrity of the membrane adversely affects cell performance and operating lifetime (Asghar et al. 2025). On the other hand, reactant and water transport in GDLs must be effectively managed, and transport limitations reduce cell

performance (Athanasaki et al. 2023). In bipolar plates, issues related to corrosion, gas distribution, and thermal management are important in terms of cell performance and durability (Zhang et al. 2024). Therefore, research aimed at improving PEMFC performance and durability covers different topics, such as the development of new materials and components (Tanış et al. 2024), water and thermal management (Chen et al. 2023), component design (Sarjuni et al. 2024), degradation mechanisms (Colombo et al. 2023), and numerical modeling (Corda et al. 2022). This multifaceted structure makes PEMFC research a multidisciplinary research field in which electrochemistry, materials science, heat and mass transfer, and energy technologies are considered together.

The increase in studies in the PEMFC field over time, the expansion of contributions from research groups and institutions in different countries, and the diversification of research topics necessitate the systematic investigation of general trends in the literature. Bibliometric analyses enable the quantitative evaluation of the temporal development of scientific production, the contributions of countries and institutions to research, publication sources, citation performance, and relationships among research topics. In this study, the PEMFC literature obtained from the Web of Science Core Collection database and covering the period from 2000 to 2025 was examined using bibliometric methods. The aim of the study is to reveal the scientific development and research trends in the PEMFC field and to determine the general structure of the literature, prominent research topics, and relationships among these topics.

2. MATERIAL AND METHODS

The dataset used in the bibliometric analysis was obtained from the Web of Science Core Collection database on 20 August 2026. The search scope was limited to the years 2000–2025, and English-language original research and review articles related to PEMFC technology were included in the dataset. Within this scope, a total of 27,782 documents published in 1,531 different journals were examined. Author, institution, country, source, citation, and keyword information of the studies was used in the bibliometric evaluations. The main information of the bibliometric dataset is presented in Table 1. The bibliometric analysis was performed using the Bibliometrix package operating in the R programming environment and Biblioshiny, the graphical user interface of this package. Annual scientific production, annual citation performance, publication production and citation performance of countries, most relevant sources and institutions, most cited publications, and keyword distributions were examined in the evaluations. In addition, a co-occurrence analysis of keywords was performed to identify prominent topics and relationships among concepts in PEMFC research, and the identified relationships were visualized through a network map.

Table 1. Main information of the bibliometric dataset.

Parameters	**Descriptions**
Database	Web of Science Core Collection
Data retrieval date	20 August 2026
Timespan	2000-2025
Keywords identified	*Proton exchange membrane fuel cell; Proton-exchange membrane fuel cell;* *PEM fuel cell;* *PEMFC*
Language	English
Document types	Research and review articles

Number of sources	1,531
Number of documents	27,782
Annual growth rate %	7.63%
Average citations/Document	45.14
Bibliometric software	Bibliometrix
Analysis interface	Biblioshiny

3. RESULTS AND DISCUSSION

The annual scientific production related to PEMFC technology between 2000 and 2025 is presented in Figure 1. The annual number of publications, which was 67 in 2000, reached 2,583 in 2025, representing a 38.55-fold increase over the 26-year period. This trend in publication output can be divided into three distinct periods. Between 2000 and 2009, the number of publications showed a steady increase and reached 823. During this period, the tightening of emission standards, the increase in research on alternative energy technologies, and studies on the development of perfluorosulfonic acid (PFSA)-based membranes and platinum-based electrocatalysts constituted the main focuses of research activities. In the 2010–2019 period, the annual number of publications ranged between 1,007 and 1,227 and showed a limited increase compared with the previous period. During this period, a significant portion of the research addressed the technical and economic challenges to the widespread adoption of PEMFC technology; particularly, high platinum cost, catalyst loading reduction, membrane and electrode degradation, durability, and optimization of operating conditions were prominent topics. In 2020 and thereafter, a marked increase in publication production occurred. The annual number of publications reached 1,504, 1,634, 1,869, 1,913, 2,458, and 2,583 in the 2020–2025 period, respectively. This increase can be associated with the strengthening of global interest in hydrogen technologies and fuel cell-powered transportation systems. Decarbonization targets, net-zero emission policies, and investments in the hydrogen economy have expanded the scope of research activities related to PEMFC technology. In particular, the increase in studies on low-emission power systems for heavy-duty transportation and commercial vehicles is one of the main factors supporting this recent acceleration.

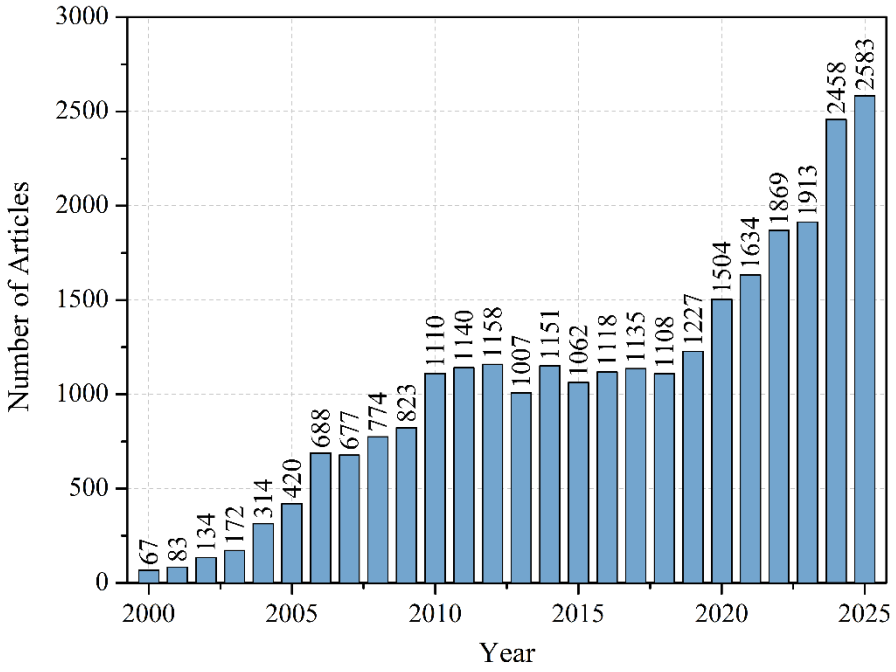


Figure 1. Annual scientific production.

The mean total citations per year in the PEMFC literature are presented in Figure 2. The variation in the citation window depending on the publication year is an important factor that should be considered when evaluating the citation performance of studies, particularly those published in recent years. During the 2000–2004 period, the mean total citations per year ranged from 4.73 to 6.20, whereas they remained lower during the 2005–2014 period, ranging from 2.95 to 4.48. From 2015 onward, the mean total citations per year increased again and reached a peak value of 7.25 in 2021. During this period, research on membrane electrode assembly (MEA) design, low-platinum-loading electrocatalysts, alternative membranes, and the improvement of PEMFC performance under real operating conditions, together with the marked increase in annual publication output, contributed to increased citation activity in the literature. In particular, the mean total citations per year reached 7.01, 6.97, and 7.25 in 2019, 2020, and 2021, respectively, indicating that studies published during this period achieved high citation performance. The fact that these values became more pronounced several years after publication suggests that a citation window of approximately five years may be effective for PEMFC studies to achieve high citation visibility. After 2022, the mean total citations per year gradually decreased, with values of 6.44, 6.29, 5.78, and 4.16 recorded in 2022, 2023, 2024, and 2025, respectively. This decline is primarily attributed to the shorter citation window available for studies published in recent years.

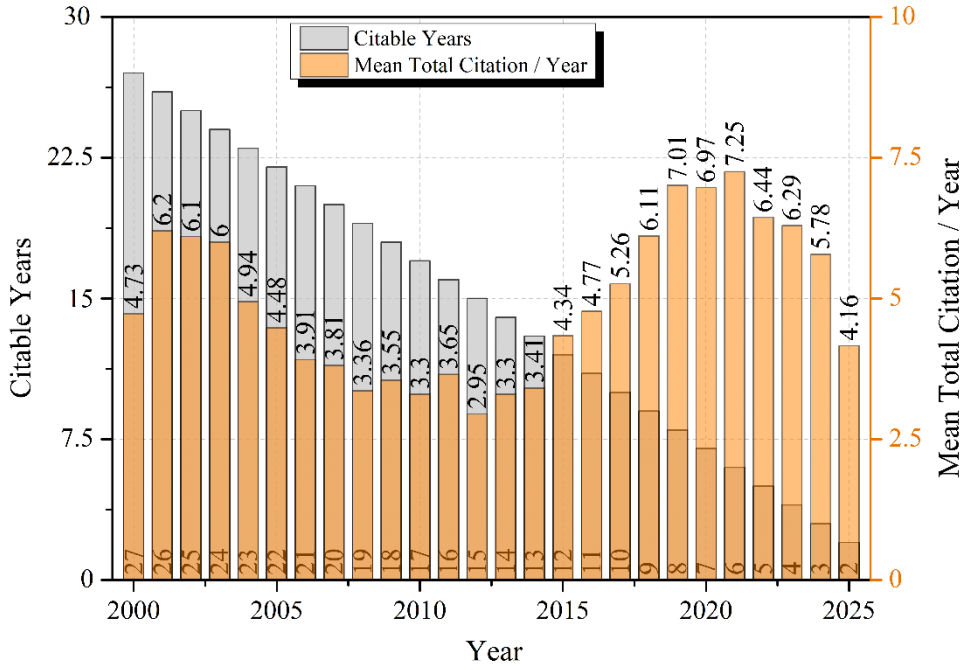


Figure 2. Mean total citations per year.

The distribution of scientific production in the PEMFC field by country between 2000 and 2025 is shown in Figure 3. China stands out as by far the most productive country, with 8,586 publications. China is followed by the United States, South Korea, Germany, Canada, France, and India. This distribution demonstrates that PEMFC research is primarily concentrated in Asia, North America, and Europe. China's clear dominance can be associated with the expansion of public funding, national research programs, and industrial investments in hydrogen and fuel cell technologies. In particular, membrane electrode assembly (MEA) development, reducing platinum loading in catalysts, and fuel cell vehicle technologies represent prominent research areas in China. The high publication output of the United States and South Korea is supported by strong university–industry collaborations and long-term R&D programs focused on fuel cell technologies. Countries such as Germany, Canada, and France also hold prominent positions in the literature due to their established research infrastructure in automotive engineering, electrochemistry, and membrane technologies. Türkiye ranks 13th with 517 publications, achieving a notable level of scientific production in the PEMFC field. This indicates that research activities concerning hydrogen and fuel cell technologies in Türkiye have increased in recent years.

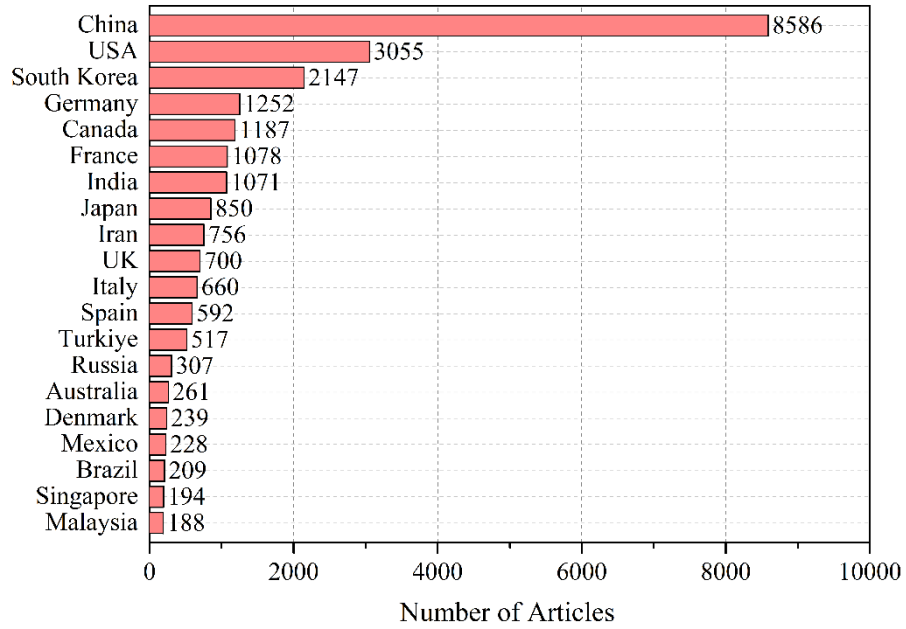


Figure 3. Scientific production by country.

The countries with the highest citation counts in the PEMFC field and their average citations per article are presented in Table 2. In terms of total citation count, China ranks first with 365,128 citations, followed by the United States, Canada, and South Korea with 248,378, 97,486, and 78,061 citations, respectively. However, when evaluating the average citations per article, the distinction between total output volume and individual academic impact across countries becomes more evident. Specifically, regarding average citations per article, the United States leads with 86.2 citations, followed by Australia, Singapore, Canada, the Netherlands, and Switzerland. This demonstrates that certain countries with lower total publication outputs can achieve higher academic impact per publication. Although China dominates total citations by volume, it exhibits a lower average of 37.1 citations per article. This is primarily attributed to the country's rapid surge in publication output in recent years, as newly published studies have not yet had sufficient time to accumulate citations. The high average citation rates of the United States and Canada reflect long-standing research initiatives focused on core PEMFC components and applications. In particular, foundational studies on polymer electrolyte membranes, electrocatalysts, MEA design, and heavy-duty fuel cell vehicle integration support the high academic visibility of these nations. Regarding total citations, Türkiye ranks 14th globally with 17,034 citations and an average of 32.4 citations per article, indicating that PEMFC research conducted in Türkiye has established measurable international visibility and academic impact.

Table 2. Most cited countries.

Countries	Citations	Average Article Citations
China	365,128	37.1
USA	248,378	86.2
Canada	97,486	79.5
Korea	78,061	34.7
Germany	51,842	41.7
France	51,324	50.5

UK	32,896	55.7
India	30,829	27.7
Iran	30,249	38.3
Japan	29,969	37.5
Italy	29,297	42.5
Spain	22,112	36.9
Australia	19,039	82.4
Türkiye	17,034	32.4
Denmark	16,685	63.9
Malaysia	12,394	59.6
Brazil	8,735	37.7
Singapore	8,604	81.9
Netherlands	7,415	73.4
Switzerland	6,614	61.2

The distribution of academic studies published on PEMFC technology between 2000 and 2025 by source journals is shown in Figure 4. *International Journal of Hydrogen Energy* leads the field by a wide margin with 4,318 publications, while *Journal of Power Sources* ranks second with 3,229 publications. These two journals stand out as the primary publication platforms for PEMFC research. They are followed by *Journal of the Electrochemical Society*, *Electrochimica Acta*, and *Energy*. The subject areas covered by these prominent sources provide clear insights into the primary research domains within the field. The high concentration of papers in journals focusing on hydrogen energy, power systems, and electrochemistry indicates that studies have largely focused on improving cell performance, electrocatalytic activity, membrane properties, and power density. Furthermore, the prominence of materials science-oriented journals such as *Journal of Membrane Science*, *ACS Applied Materials & Interfaces*, and *Journal of Materials Chemistry A* demonstrates that the development of novel membrane and electrode materials represents an important research area in the field. Additionally, *International Journal of Heat and Mass Transfer* ranking 18th with 222 publications indicates that heat and mass transfer, water management, and flow dynamics are also important research areas. Overall, the distribution of source journals confirms that PEMFC research has a broad interdisciplinary scope encompassing hydrogen energy, electrochemistry, membrane science, materials development, heat and mass transfer, and energy systems engineering.

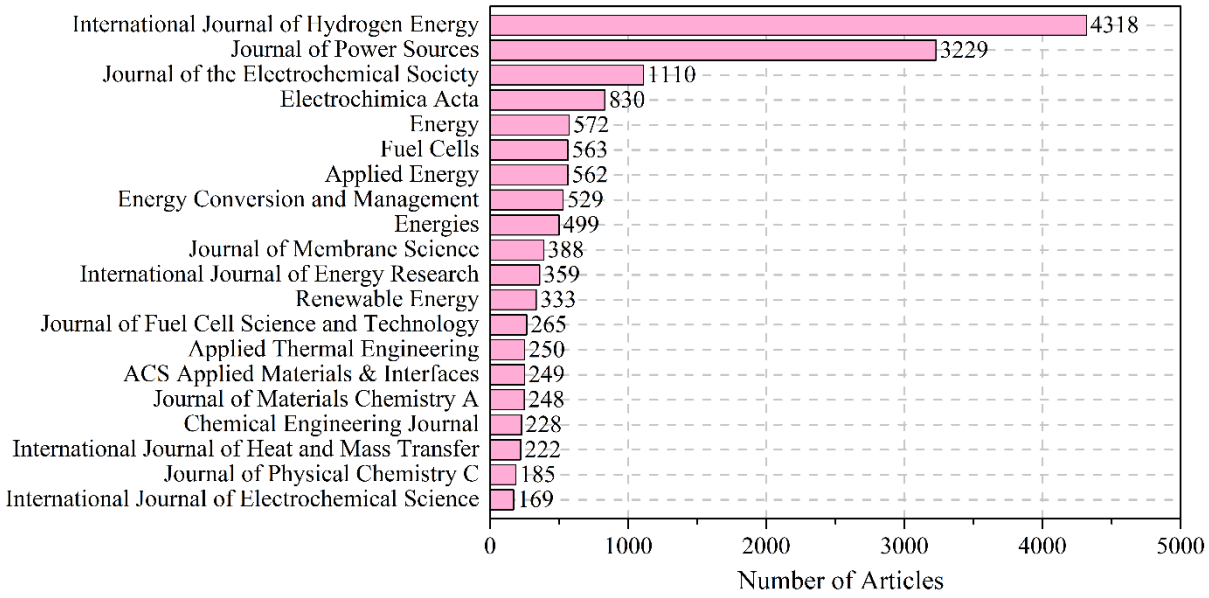


Figure 4. Most relevant sources.

The distribution of the institutions that contributed most to PEMFC research during the 2000–2025 period is presented in Figure 5. The fact that 10 of the top 20 institutions are based in China and 4 are based in France demonstrates that research activities are concentrated within strong institutional structures in certain countries. The *Chinese Academy of Sciences* ranks first with 2,105 publications, followed by the *Centre National de la Recherche Scientifique* with 1,511 publications and *Tongji University* with 1,123 publications. The institutional distribution indicates that PEMFC research is concentrated in institutions with high research capacity and specialized infrastructure. In particular, the high publication output of institutions in China and France can be associated with long-term research programs and institutional structures focused on hydrogen energy and fuel cell technologies in these countries. The prominent presence of Chinese universities among the top 20 reflects the country's extensive research capacity in PEMFC technologies and hydrogen-powered transportation systems. Furthermore, the presence of research organizations such as the *United States Department of Energy* and the *Helmholtz Association* in the ranking demonstrates the importance of publicly funded research programs in scientific production. This institutional concentration indicates that PEMFC research has evolved around institutions with strong research infrastructure and national and international collaboration networks rather than through individual research activities.

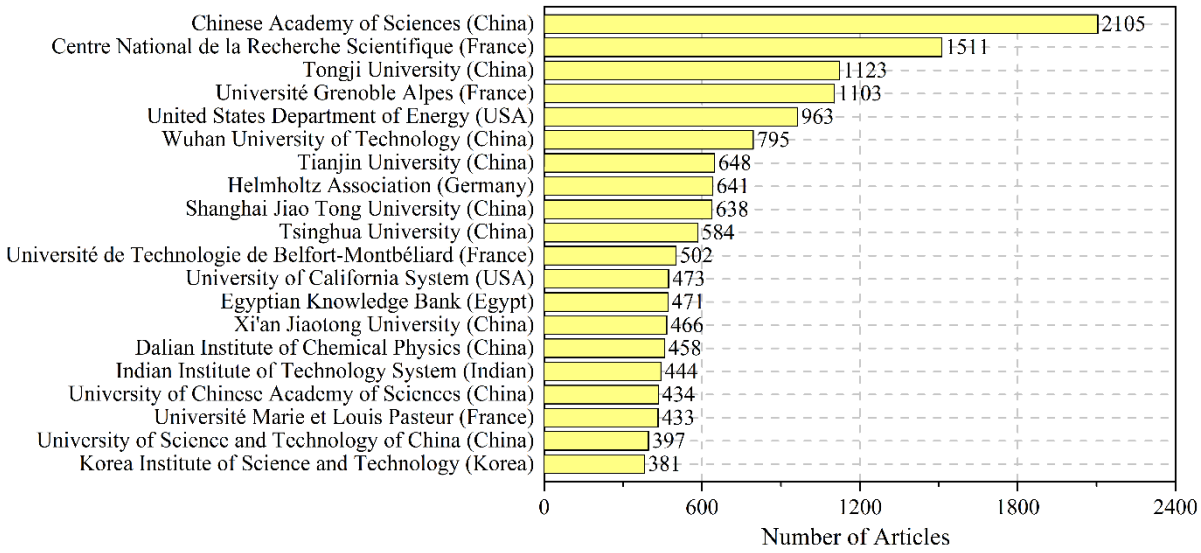


Figure 5. Most relevant affiliations.

The globally most cited publications in the PEMFC literature and their average annual citation rates are presented in Table 3. In terms of total citation count, the study published by Jiao, Y. ranks first with 5,021 citations. It is followed by Gasteiger, H. A. with 4,512 citations, Stamenkovic, V. R. with 4,104 citations, and Shao, M. H. with 3,589 citations. When average annual citation rates are considered, the study published by Jiao, K. reaches the highest value with 434.2 average annual citations. The studies published by Jiao, Y. and Shao, M. H. also stand out with average annual citation values of 418.4 and 326.3, respectively. These metrics indicate that some prominent studies have attained not only high cumulative citation counts but also high academic visibility within a relatively short period. Examining the thematic scope of these prominent publications reveals that electrocatalysis, ORR kinetics, and low-PGM-content catalysts represent the main focus areas in PEMFC research. Enhancing electrocatalytic activity while minimizing noble metal loading remains a primary objective to simultaneously optimize cost and cell performance. Furthermore, comprehensive review articles addressing the development, fundamental components, performance, and application areas of PEMFC technology consistently receive high citation counts.

Table 3. Most globally cited documents.

Papers	DOI	Citations	Citations/Year
Jiao, Y. (2015)	10.1039/c4cs00470a	5,021	418.4
Gasteiger, H. A. (2005)	10.1016/j.apcatb.2004.06.021	4,512	205.1
Stamenkovic, V. R. (2007)	10.1126/science.1135941	4,104	205.2
Shao, M. H. (2016)	10.1021/acs.chemrev.5b00462	3,589	326.3
Wang, Y. (2011)	10.1016/j.apenergy.2010.09.030	2,897	181.1
Lim, B. (2009)	10.1126/science.1170377	2,822	156.8
Jiao, K. (2021)	10.1038/s41586-021-03482-7	2,605	434.2
Wachsman, E. D. (2011)	10.1126/science.1204090	2,373	148.3
Lai, L. F. (2012)	10.1039/c2ee21802j	2,162	144.1
Zitolo, A. (2015)	10.1038/NMAT4367	1,941	161.8
Peighambardoust, S. J. (2010)	10.1016/j.ijhydene.2010.05.017	1,820	107.1
Chen, Z. W. (2011)	10.1039/c0ee00558d	1,687	105.4
Sheng, W. C. (2010)	10.1149/1.3483106	1,663	97.8

Li, Q. F. (2003)	10.1021/cm0310519	1,575	65.6
Chung, H. T. (2017)	10.1126/science.aan2255	1,546	154.6
Merle, G. (2011)	10.1016/j.memsci.2011.04.043	1,514	94.6
Sharaf, O. Z. (2014)	10.1016/j.rser.2014.01.012	1,511	116.2
Durst, J. (2014)	10.1039/c4ee00440j	1,497	115.2
Mehta, V. (2003)	10.1016/S0378-7753(02)00542-6	1,463	61
Lin, L. L. (2017)	10.1038/nature21672	1,437	143.7

The distribution of the most frequently used keywords in studies published in the PEMFC field between 2000 and 2025 is presented as a word cloud in Figure 6. The prominence of terms such as *performance*, *PEMFC*, *oxygen reduction reaction*, *electrocatalysts*, *durability*, *degradation*, *water management*, and *nanoparticles* indicates that research has primarily focused on performance, electrochemical reactions, durability, and cell management. The high frequency of keywords including *oxygen reduction reaction*, *electrocatalysts*, *cathode*, *platinum*, and *catalyst layer* can be associated with the slow ORR kinetics at the cathode, which is one of the main factors limiting PEMFC performance (Giotakos and Neophytides 2023). Consequently, increasing the activity of platinum-based electrocatalysts and reducing PGM usage remain among the important research topics in the literature. Furthermore, the frequent appearance of *durability*, *degradation*, and *stability* highlights the importance of degradation mechanisms occurring in the membrane, catalyst layer, and other cell components during long-term operation. Keywords such as *water management*, *membrane*, *bipolar plate*, *nanoparticles*, and *optimization* reflect the scope of research on water and mass transport, material development, and optimization of operating conditions. In particular, effective control of water transport is directly related to cell performance and durability in terms of preventing water accumulation at the cathode and membrane drying (Wei et al. 2023). Finally, the prominence of terms such as *model* and *simulation* indicates that numerical modeling methods are widely used alongside experimental studies to evaluate PEMFC performance and operating behavior.

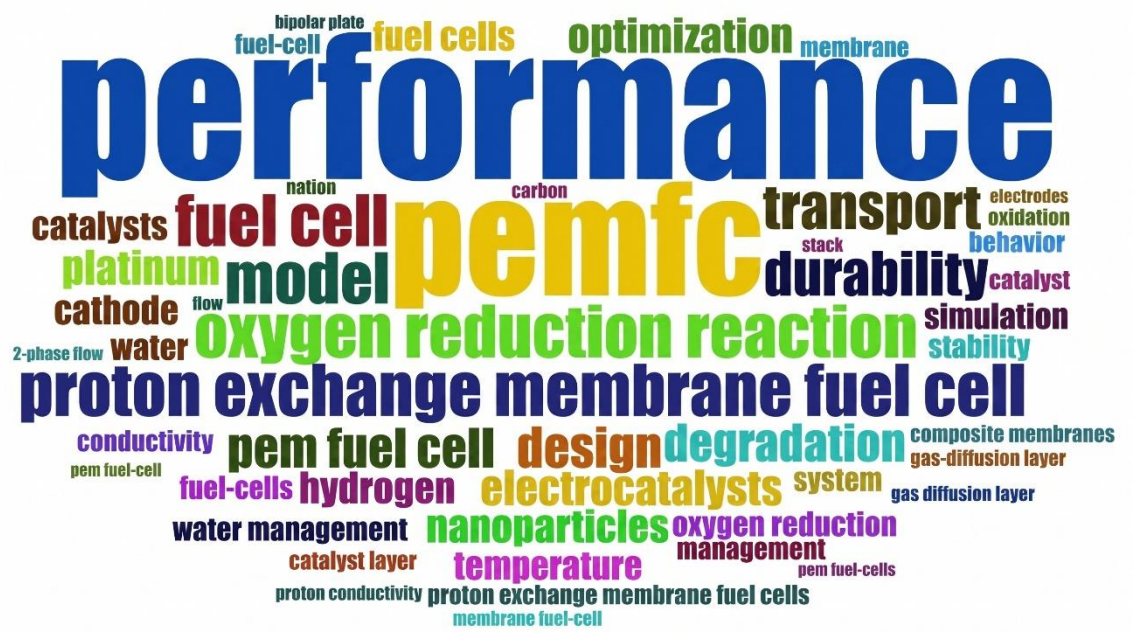


Figure 6. Most frequent keywords.

The co-occurrence network of prominent keywords related to PEMFC technology between 2000 and 2025 is shown in Figure 7. The concepts are concentrated around three main clusters

within the network structure. These clusters indicate that PEMFC research has evolved around three main research axes: performance–durability, membrane–electrocatalyst materials, and bipolar plate technologies. The red cluster is characterized by terms such as *PEMFC*, *oxygen reduction reaction*, *membrane electrode assembly*, *durability*, *degradation*, *water management*, *gas diffusion layer*, and *electrocatalyst*. This cluster represents studies addressing the interactions among cell performance, electrochemical reactions, gas and water transport, and component durability. The presence of ORR kinetics, water management, and degradation mechanisms within the same cluster indicates that performance and long-term operational stability are closely related. The green cluster is characterized by terms such as *proton exchange membrane*, *proton conductivity*, *platinum*, *electrocatalysis*, *polybenzimidazole*, *Nafion*, and *hydrogen production*. This cluster encompasses material-oriented studies focused on the development of proton-conducting membranes and electrocatalysts. Considering proton conductivity, membrane structure, and catalyst properties together demonstrates the determining role of material properties in improving cell performance. The blue cluster consists of terms such as *bipolar plate*, *corrosion*, and *corrosion resistance*. This cluster represents studies focusing on the corrosion behavior, surface properties, and durability of bipolar plates. Ensuring sufficient mechanical strength and corrosion resistance of bipolar plates is important for the long-term and reliable operation of PEMFC systems (Chen et al. 2023). The strong connections among the clusters demonstrate that material properties, electrochemical processes, water and gas transport, and component durability are addressed in an interconnected manner in PEMFC research.

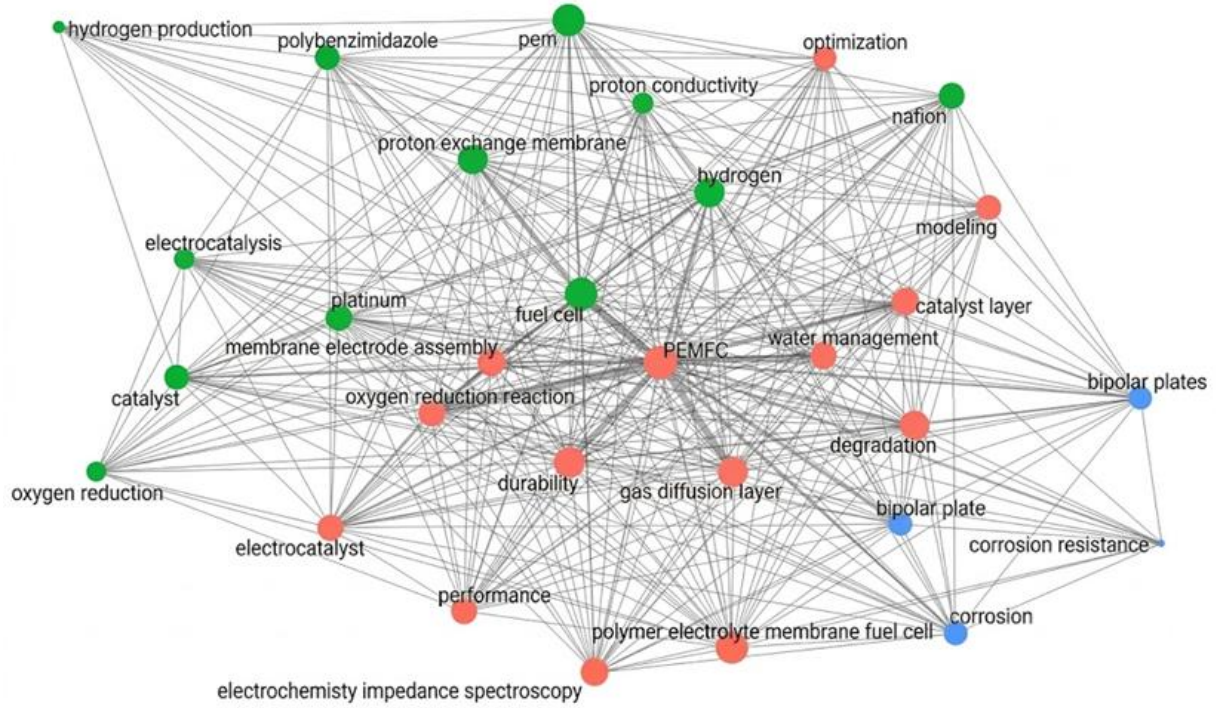


Figure 7. Keyword co-occurrence network.

4. CONCLUSION

In this study, scientific production and research trends in the PEMFC field during the 2000–2025 period were systematically evaluated using bibliometric methods. The findings reveal that PEMFC research showed continuous growth throughout the analyzed period, with the annual number of publications increasing from 67 in 2000 to 2,583 in 2025, based on a total dataset of

27,782 publications. China leads scientific production by a wide margin, while the United States, South Korea, Germany, Canada, and France are among the leading countries in the field. Source evaluations confirm that *International Journal of Hydrogen Energy* and *Journal of Power Sources* are the main publication platforms for PEMFC literature. Keyword analyses show that research is particularly focused on cell performance, ORR, electrocatalysts, membranes, durability, degradation, and water management. Co-occurrence network analysis demonstrates that these topics are strongly interconnected around electrochemical processes, material development, transport, and durability. The main limitation of this study is the exclusive use of English-language original research and review articles indexed in the Web of Science Core Collection. Future studies combining multiple databases and including publications in different languages may provide a more comprehensive evaluation of the PEMFC literature.

REFERENCES

Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146, 111180.

Liu, X., Liu, G., Xue, J., Wang, X., & Li, Q. (2022). Hydrogen as a carrier of renewable energies toward carbon neutrality: State-of-the-art and challenging issues. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 29, 1073-1089.

Wang, Y., Pang, Y., Xu, H., Martinez, A., & Chen, K. S. (2022). PEM Fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development – a review. Energy & Environmental Science, 15, 2288-2328.

Arslan, T. A., & Bayrakçeken, H. (2025). A comprehensive review on fuel cells: From fundamental principles to PEM fuel cell membranes. Engineering Perspective, 5, 194-222.

Qasem, N. A. A. (2024). A recent overview of proton exchange membrane fuel cells: Fundamentals, applications, and advances. Applied Thermal Engineering, 252, 123746.

Kahraman, H., & Akın, Y. (2024). Recent studies on proton exchange membrane fuel cell components, review of the literature. Energy Conversion and Management, 304, 118244.

Arslan, T. A., Bayrakçeken, H., Solmaz, H., Taşkın, G., Tabanlıgil Calam, T., Calam, A., & Kocakulak, T. (2025). Development and characterization of sulfonated poly(sulfone)/poly(styrene-co-acrylonitrile) composite blend membranes for enhanced proton conductivity. Process Safety and Environmental Protection, 201, 107607.

Huang, Y., Xiao, X., Kang, H., Lv, J., Zeng, R., & Shen, J. (2022). Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: A critical review of heat transfer mechanisms, cooling approaches, and advanced cooling techniques analysis. Energy Conversion and Management, 254, 115221.

Kocakulak, T., & Arslan, T. A. (2023). Investigation of the use of fuel cell hybrid systems for different purposes. Engineering Perspective, 3, 1-8.

Arslan, T. A., Kocakulak, T., Ezzat, M., & Solmaz, H. (2026). RSM-based optimization of operating pressure, relative humidity, and MEA compression ratio in PEM fuel cells. Engineering Spectrum, 1, 9-14.

Fan, J., Chen, M., Zhao, Z., Zhang, Z., Ye, S., Xu, S., Wang, H., & Li, H. (2021). Bridging the gap between highly active oxygen reduction reaction catalysts and effective catalyst layers for proton exchange membrane fuel cells. Nature Energy, 6, 475-486.

Asghar, M. R., Zhang, W., Su, H., Zhang, J., Liu, H., Xing, L., Yan, X., & Xu, Q. (2025). A review of proton exchange membranes modified with inorganic nanomaterials for fuel cells. Energy Advances, 4, 185-223.

Athanasaki, G., Jayakumar, A., & Kannan, A. M. (2023). Gas diffusion layers for PEM fuel cells: Materials, properties and manufacturing – a review. International Journal of Hydrogen Energy, 48, 2294-2313.

Zhang, J., Luo, X., Ding, Y., Chang, L., & Dong, C. (2024). Effect of bipolar-plates design on corrosion, mass and heat transfer in proton-exchange membrane fuel cells and water electrolyzers: A review. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 31, 1599-1616.

Tanış, İ., Arslan, T. A., Kocakulak, T., Taşkın, G., Tabanlıgil Calam, T., & Solmaz, H. (2024). Fabrication and characterization of sulfonated polysulfone membrane with different thicknesses for proton exchange membrane fuel cell. Engineering Perspective, 4, 100-107.

Chen, Y. C., Dörenkamp, T., Csoklich, C., Berger, A., Marone, F., Eller, J., Schmidt, T. J., & Büchi, F. N. (2023). On the water transport mechanism through the microporous layers of operando polymer electrolyte fuel cells probed directly by X-ray tomographic microscopy. Energy Advances, 2, 1447-1463.

Sarjuni, C. T. A., Shahril, A. A. D., Low, H. C., & Lim, B. H. (2024). Bipolar plate design assessment: Proton exchange membrane fuel cell and water electrolyzer. Fuel Cells, 24, e202300196.

Colombo, E., Baricci, A., Bisello, A., Guetaz, L., & Casalegno, A. (2023). PEMFC performance decay during real-world automotive operation: Evincing degradation mechanisms and heterogeneity of ageing. Journal of Power Sources, 553, 232246.

Corda, G., Fontanesi, S., & d'Adamo, A. (2022). Methodology for PEMFC CFD simulation including the effect of porous parts compression. International Journal of Hydrogen Energy, 47, 14658-14673.

Giotakos, P. I., & Neophytides, S. G. (2023). Unraveling the elusive oxygen reduction reaction electrokinetics and energetics in PEM fuel cells. Electrochimica Acta, 439, 141591.

Wei, F., Kosakian, A., & Secanell, M. (2023). Effect of operating conditions and micro-porous layer on the water transport and accumulation in proton exchange membrane fuel cells. Chemical Engineering Journal, 471, 144423.

Chen, J., Fan, R., Peng, Y., Qin, N., Jin, L., Zheng, J., Ming, P., Zhang, C., & Zheng, J. P. (2023). Tuning the performance of composite bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell by modulating resin network structure. Journal of Power Sources, 582, 233566.

YOLOV8N-SEG-BASED DYNAMIC OBJECT MASKING APPROACH FOR MONOCULAR VISUAL SLAM ON EMBEDDED PLATFORMS USING GAZEBO SIMULATION

Selin COŞKUN
Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, 06570 Maltepe, Ankara, Turkey
ORCID ID: 0009-0003-4606-0068
Prof. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ
Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 06570 Maltepe, Ankara, Turkey
ORCID ID: 0000-0001-8632-9920

ABSTRACT
Visual Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM) systems typically rely on a static-world assumption, which fails in dynamic indoor environments with moving pedestrians. This study evaluates dynamic object masking using YOLOv8n-seg, a lightweight instance segmentation model integrated with monocular ORB-SLAM3 in Gazebo simulation environment. To target low-cost robotic applications, the pipeline relies solely on a single monocular camera, without LiDAR, RGB-D, or motion-capture sensing, running on an embedded platform (NVIDIA Jetson Nano, 4 GB). Three scenarios of increasing dynamic complexity were tested: a static baseline, a single-actor scenario, and a three-actor scenario, each evaluated with and without the proposed masking pipeline across fifteen independent simulation runs. The results show that dynamic actors increased Absolute Trajectory Error (ATE) by up to 5.8-fold compared to the static baseline. Conversely, moving actors improved short-term backend metrics, such as reprojection error and track length, by introducing high-contrast visual features into otherwise texture-poor areas. The proposed masking approach reduced ATE by 35.2% in the single-actor scenario and by 45.6% in the three-actor scenario, while bringing local map-quality metrics closer to static-scenario levels, highlighting a trade-off between local map consistency and trajectory accuracy. Furthermore, a confidence-threshold ablation study showed that the relationship between masking strength and localization accuracy was not linear, with a threshold of 0.6 providing the best overall performance. These findings demonstrate that YOLOv8n-seg-based instance segmentation masking provides a robust, cost-effective SLAM solution for resource-constrained embedded platforms.
Keywords: Visual SLAM, ORB-SLAM3, Dynamic environments, Instance segmentation, Gazebo, Embedded Systems

1. INTRODUCTION
Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) is essential for autonomous mobile robots, enabling simultaneous trajectory estimation and map construction in unknown environments. Among visual SLAM systems, ORB-SLAM3 (Campos et al., 2021) is widely used due to its versatility across monocular, stereo, and visual-inertial configurations. However, like most classical visual SLAM pipelines, ORB-SLAM3 fundamentally relies on a static-world assumption. In indoor environments with moving pedestrians, dynamic features violate this assumption, introducing false data associations that corrupt pose estimation and map consistency.

Several studies have addressed this limitation by incorporating semantic information to identify and remove dynamic image regions prior to, or during, SLAM processing. Early and influential approaches such as DynaSLAM (Bescós et al., 2018) and DS-SLAM (Yu et al., 2018) demonstrated that combining deep segmentation networks (Mask R-CNN and SegNet, respectively) with geometric consistency checks can reduce trajectory error in highly dynamic scenes. However, these networks are computationally heavy, which limits their use on embedded and resource-constrained platforms.More recent studies have therefore investigated lightweight YOLO-based approaches : YOLO-SLAM (Wu et al., 2022) combines a lightweight Darknet19-YOLOv3 detector with a depth-based geometric constraint; YG-SLAM (Chu et al., 2023) integrates YOLOv8 detection with epipolar geometry and optical-flow constraints using ORB-SLAM2; SEG-SLAM (Cong et al., 2024) fuses YOLOv5-based semantic segmentation with ORB-SLAM3 for RGB-D indoor mapping; and YDM-SLAM (Singh et al., 2024) integrates YOLOv8-Seg with ORB-SLAM3 to remove features from dynamic objects using instance masks. Although these methods report improvements in localization accuracy, several rely on RGB-D sensing to obtain depth information.

These observations reveal two main gaps in the literature. First, relatively few studies have explored YOLO-based dynamic-object masking with a monocular camera without depth, RGB-D, or LiDAR sensors, and this particular configuration has not yet been evaluated in a dynamic indoor Gazebo environment. Second, existing studies mainly focus on trajectory accuracy and give less attention to local map quality.

To address these gaps, the present study integrates the lightweight YOLOv8n-seg segmentation network (Jocher et al., 2023) with monocular ORB-SLAM3 to mask dynamic human actors before feature extraction. The system is evaluated entirely in the Gazebo robotic simulator (Koenig and Howard, 2004) using three indoor scenarios with different levels of dynamic activity. The aim is to evaluate the effect of YOLOv8-based dynamic-object masking on both the localization performance and map quality of ORB-SLAM3 in dynamic indoor environments. The system uses a minimal and cost-effective sensor setup and runs on a resource-constrained NVIDIA Jetson Nano platform.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 describes the simulated study area, the sensor configuration, SLAM framework, masking pipeline, and evaluation metrics, respectively. Section 3 presents and discusses the experimental results, covering baseline performance, the effect of masking, a confidence-threshold ablation study, and map-quality analysis. Section 4 concludes the paper, and the main contributions of this paper are as follows:

(1) A computationally lightweight dynamic-SLAM framework evaluated entirely within the Gazebo robotic simulator: A monocular camera and YOLOv8n-seg were combined with ORB-SLAM3 and deployed on a Jetson Nano without requiring depth or LiDAR sensors. The proposed approach reduced ATE RMSE by up to 45.6% in densely dynamic indoor scenes.

(2) Trajectory and Map Evaluation: A benchmark analysis combines standard trajectory drift (ATE, RPE) with internal backend map metrics (reprojection error, inlier ratio, track length) to assess dynamic SLAM behavior.

(3) Analysis of masking effects: The study shows that dynamic-object masking can improve long-term trajectory accuracy while slightly changing local map-quality metrics. This highlights the difference between short-term feature tracking and long-term localization performance in dynamic environments.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study Area and Scenario Design

The proposed dynamic-object masking method was constructed and evaluated entirely in the Gazebo simulator (Koenig and Howard, 2004). A custom indoor environment representing the upper floor of the Electronics Laboratory in the Faculty of Engineering at Gazi University was created. The laboratory area measured 4.7 m × 4.9 m, and a TurtleBot3 Burger with ROS-based robot was used as the mobile platform. In all experiments, the robot followed the same approximately rectangular trajectory (1.95 m x 1.55 m) that traversed the room to ensure consistent benchmark trajectories across runs.

Three experimental scenarios were designed to represent increasing levels of dynamic scene content: (i) a static scenario with no moving actors, serving as the reference baseline; (ii) a low-dynamics scenario (Dynamic 1) containing a single animated pedestrian actor walking along a waypoint loop at 0.125 m/s; and (iii) a high-dynamics scenario (Dynamic 3) containing three actors, each following independent, shorter loop waypoint trajectories at 0.5 m/s.

Dynamic scenarios were tested in two modes: raw camera input (baseline) and masked input processed by the proposed YOLO-based pipeline (described in Section 2.4). Thus, five configurations were evaluated: Static, Dynamic 1, Dynamic 1-YOLO, Dynamic 3, and Dynamic 3-YOLO. Each configuration was independently repeated three times, resulting in 15 simulation runs. The results are reported as the mean ± population standard deviation (ddof = 0). Figure 1 shows the simulated environment together with the three experimental scenarios.

Figure 1. Gazebo simulation environment and the three experimental scenarios: (a) Static , (b) Dynamic 1, (c) Dynamic 3.

2.2. Simulated Sensor Configuration and Ground-Truth Generation

To reflect a low-cost robotic platform, a simple sensor setup was employed, consisting of a single simulated monocular camera, without relying on LiDAR, depth sensors, or motion-capture systems. The camera resolution was set to 640 × 480 pixels with an effective frame rate of 10 Hz. The camera was configured with the intrinsic parameters fx = 693.566, fy = 675.914, cx = 265.176, and cy = 196.598.Ground-truth robot trajectories were obtained directly from the Gazebo simulation engine, which provides access to the exact and noise-free pose of the robot model. In other words, no sensor fusion or state estimation was required to construct the ground truth, as the true robot state is inherently available within the simulated environment.

2.3. Visual SLAM Framework

ORB-SLAM3 (Campos et al., 2021) was employed in monocular mode and configured with 1000 ORB features per frame, 6 scale levels, and FAST corner detection thresholds of 7 (initial) and 2 (minimum), running at 10 FPS. To evaluate the method on an embedded platform, the complete pipeline, including Gazebo, ORB-SLAM3, and the segmentation network, was executed on an NVIDIA Jetson Nano with 4 GB of RAM.

2.4. YOLO-Based Dynamic Object Masking Pipeline

Dynamic actors were detected and masked processing using a YOLOv8n-seg instance segmentation model (Jocher et al., 2023). The model was fine-tuned on a custom dataset generated from the Gazebo simulation environment, containing 198 manually annotated polygon labels for the simulated pedestrians. The fine-tuned model was optimized and deployed with TensorRT using FP16 precision and a 640 × 640 input size. Model predictions were filtered using a confidence threshold of 0.6, based on an ablation study, where it provided a good balance between trajectory accuracy and result variability. Afterwards, non-maximum suppression was applied with an IoU threshold of 0.45 for the selected class. To avoid masking adjacent static structures, masks were constrained within their bounding boxes, slightly dilated,

and smoothed using Gaussian feathering before being combined into a single binary mask. The masked images were published on a separate ROS topic and used as the input to ORB-SLAM3 instead of the original camera stream. Figure 2 illustrates this pipeline, which is further detailed in Algorithm 1.

Algorithm 1. Dynamic object masking for monocular visual SLAM

Input: Image sequence {I_t}, confidence threshold τ = 0.6, NMS threshold η = 0.45, minimum component area A_min = 300 px, dilation radius r = 10 px, camera intrinsic matrix K

Output: Camera poses {T_t}, sparse map M

```
M ← Ø;  Initialize ORB-SLAM3 with K
for each incoming frame I_t do
  D_t ← YOLOv8n-seg(I_t)          // TensorRT FP16
  D_t ← {d ∈ D_t | conf(d) ≥ τ, class(d) = person}
  D_t ← NMS(D_t, η)
  S_t ← ∪ mask(d),  d ∈ D_t
  for each connected component  C ⊆ S_t do
    if area(C) < A_min then
      S_t ← S_t \ C               // noise removal
    end if
  end for
  S_t ← Dilate(S_t, r)            // safety margin
  F_t ← ExtractORB (I_t, ¬S_t)    // exluding masked
  T_t ← TrackFrame (F_t, M)
  if IsKeyframe (F_t, T_t) then
    M ← LocalMapping (M, F_t, T_t)
    M ← LoopClosing(M)
  end if
end for
return {T_t}, M
```

Figure 2. Overview of the proposed dynamic-object masking pipeline.

2.5. Evaluation Metrics

System performance was evaluated in terms of trajectory accuracy and map quality. Trajectory accuracy was assessed via Absolute Trajectory Error (ATE) and Relative Pose Error (RPE), calculated using the evo trajectory evaluation library with Sim(3) Umeyama scale alignment. Given an estimated pose P_i and the corresponding ground-truth pose Q_i at frame i, and an alignment transform S obtained via Umeyama alignment, ATE is defined as:

$$ATE_i = Q_i^{-1} S P_i, \qquad ATE_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \|\mathrm{trans}(ATE_i)\|^2} \quad (1)$$

RPE was computed over a fixed frame interval Δ to capture local drift:

$$RPE_i = (Q_i^{-1} Q_{i+\Delta})^{-1} (P_i^{-1} P_{i+\Delta}), \quad RPE_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \|\mathrm{trans}(RPE_i)\|^2} \quad (2)$$

where $\mathrm{trans}(\cdot)$ extracts the translational component; rotational RPE is computed similarly from the corresponding rotation angle. Map quality was additionally assessed using three complementary metrics. Reprojection error is defined as the pixel distance between an observed keypoint u_i and the reprojection of its corresponding triangulated map point X_i:

$$e_{reproj} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\|u_i - \pi(K,T,X_i)\|_2^2} \quad (3)$$

where $\pi(\cdot)$ is the perspective projection function and K and T represent the camera intrinsic matrix and estimated pose, respectively. Inlier ratio is defined as the percentage of feature correspondences retained after outlier rejection during pose optimization:

$$\text{Inlier Ratio} = \frac{N_{inlier}}{N_{total}} \times 100\% \quad (4)$$

and average track length is defined as the mean number of consecutive frames in which a map point is successfully tracked:

$$\bar{L} = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} L_j \quad (5)$$

where M is the total number of tracked map points in a given run. These three metrics were extracted directly from the ORB-SLAM3 optimization and tracking modules. To reduce computational overhead on the Jetson Nano, backend metrics were sampled every fifth frame.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Baseline System Performance Across Scenarios

Table 1 summarizes the baseline ORB-SLAM3 performance across the three simulated environments. The Absolute Trajectory Error (ATE) RMSE increased substantially with dynamic scene complexity, rising from 0.098 ± 0.023 m in the static scenario to 0.454 ± 0.011 m in Dynamic 1 and 0.572 ± 0.116 m in Dynamic 3, corresponding to 4.6-fold and 5.8-fold increases, respectively. These results demonstrate that dynamic objects reduce the long-term localization accuracy of monocular SLAM.

Table 1. Performance of the baseline ORB-SLAM3 system across the three scenarios (mean ± std of three runs, RMSE values).

Metric	Static	Dynamic 1	Dynamic 3
ATE RMSE (m)	0.098 ± 0.023	0.454 ± 0.011	0.572 ± 0.116
RPE-translation RMSE (m)	0.066 ± 0.004	0.052 ± 0.001	0.098 ± 0.009
RPE-rotation RMSE (°)	4.883 ± 0.260	3.336 ± 0.056	3.691 ± 0.349
Tracking success rate (%)	89.8 ± 0.5	92.0 ± 0.0	93.9 ± 1.5
Number of keyframes	239.7 ± 9.4	326.0 ± 0.0	347.7 ± 0.5

Notably, local frame-to-frame error metrics (RPE-translation and RPE-rotation) did not follow the same trend as ATE. The static scenario exhibited the highest RPE-rotation (4.883°), despite having the lowest global drift ATE. This stems from Gazebo's texture-poor static surfaces (flat walls and floors), which yield sparse tracking points. In contrast, moving actors provide distinct, high-contrast textures that temporarily improve frame-to-frame feature tracking, even though they drive severe cumulative drift over time. This observation regarding the distinction between local and cumulative error measures is consistent with the definitions of RPE and ATE provided by Sturm et al. (2012). Figure 3 shows the relevant ATE trajectories, and Figure 4 presents the ORB feature extraction views for the three scenarios.

Figure 3. Absolute Trajectory Error (ATE) plots for (a) Static, (b) Dynamic 1, and (c) Dynamic 3.
Figure 4. ORB feature extraction views of the baseline system for (a) Static, (b) Dynamic 1, and (c) Dynamic 3.

3.2. Effect of YOLO-Based Dynamic Object Masking

Table 2 compares the baseline ORB-SLAM3 system against the proposed YOLOv8n-seg-based masking pipeline for both dynamic scenarios.

Table 2. Performance comparison of the proposed method (YOLOv8n-seg + ORB-SLAM3) against the baseline in Dynamic 1 and Dynamic 3 scenarios (conf = 0.6, mean ± std of three runs).

Metric	Dynamic 1		Dynamic 3	
	ORB-SLAM3	YOLO + ORB-SLAM3	ORB-SLAM3	YOLO+ORB-SLAM3
ATE RMSE (m)	0.454 ± 0.011	0.294 ± 0.140	0.572 ± 0.116	0.311 ± 0.026
RPE-translation RMSE (m)	0.052 ± 0.001	0.053 ± 0.007	0.098 ± 0.009	0.060 ± 0.006
RPE-rotation RMSE (°)	3.336 ± 0.056	3.890 ± 0.371	3.691 ± 0.349	3.183 ± 0.145
Tracking success rate (%)	92.0 ± 0.0	92.7 ± 10.4	93.9 ± 1.5	92.9 ± 3.1
Number of keyframes	326.0 ± 0.0	292.3 ± 23.1	347.7 ± 0.5	319.7 ± 10.6

The proposed method reduced ATE RMSE from 0.454 to 0.294 m (35.2%) in Dynamic 1 and from 0.572 to 0.311 m (45.6%) in Dynamic 3. The larger improvement in Dynamic 3 suggests that masking becomes more beneficial as the amount of dynamic content increases. In Dynamic 1, RPE-rotation RMSE slightly increased from 3.336° to 3.890°. This effect can be attributable to temporary loss of static features when the pedestrian mask covered a large image region. In Dynamic 3, however, all metrics improved, showing that removing multi-actor drift outweighed this temporary loss of static features. Figure 5 demonstrates the resulting ATE trajectories, and Figure 6 indicates the corresponding ORB feature extraction views.
Figure 5. Absolute Trajectory Error (ATE) plots with YOLO-based masking for (a) Dynamic 1 and (b) Dynamic 3.
Figure 6. ORB feature extraction views with YOLO-based masking for (a) Dynamic 1, and (b) Dynamic 3.

3.3. Confidence Threshold Ablation Study

An ablation study was performed in Dynamic 1 using confidence thresholds of 0.4, 0.6, and 0.8, reported in Table 3. The results reveal a U-shaped relationship between confidence threshold and localization accuracy. At a threshold of 0.4, the segmentation tended to be more

aggressive, potentially removing some useful static features and leading to overmasking. Conversely, at a threshold of 0.8, the segmentation was prone to undermasking, with some dynamic regions remaining unmasked.

Table 3. Ablation study on the YOLOv8n-seg confidence threshold (Dynamic 1, mean ± std of three runs).

Metric	Confidence Threshold		
	0.4	0.6	0.8
ATE RMSE (m)	0.396 ± 0.023	0.294 ± 0.140	0.339 ± 0.080
RPE-translation RMSE (m)	0.064 ± 0.018	0.053 ± 0.007	0.088 ± 0.008
RPE-rotation RMSE (°)	3.466 ± 0.324	3.890 ± 0.371	3.614 ± 0.238
Tracking success rate (%)	90.2 ± 2.3	92.7 ± 10.4	86.3 ± 5.6

Both effects yielded higher ATE RMSE (0.396 m and 0.339 m, respectively) than the intermediate threshold (conf = 0.6, ATE RMSE = 0.294 m), which was consequently adopted for all subsequent experiments. Therefore, 0.6 provided the best balance between removing dynamic features and preserving static features. Although no threshold performed best for all metrics, 0.6 was selected based mainly on ATE and tracking success.

3.4. Segmentation Model Accuracy and Task-Level Transferability

The fine-tuned YOLOv8n-seg model achieved a mask mAP@0.5 of 0.995 and mAP@(50–95) of 0.949 on the 40-image validation split (Table 4), drawn from the same 198-image annotated dataset used for fine-tuning.

Table 4. Accuracy of the fine-tuned YOLOv8n-seg model (of 198 annotated images collected in the Dynamic 1 environment, 158 were used for training and the remaining 40 for validation).

Segmentation	P	R	mAP@0.5	mAP@(50–95)	N
Box	0.997	1.000	0.995	0.969	40
Mask	0.997	1.000	0.995	0.949	40

Figure 7 illustrates the related precision-recall and F1-confidence curves for the validation set.

Figure 7. Performance curves of the fine-tuned YOLOv8n-seg segmentation model on the validation set.

However, evaluation on 30 randomly selected frames from the actual experiments gave lower mean IoU values: 0.614 ± 0.136 for Dynamic 1 and 0.669 ± 0.200 for Dynamic 3 (Table 5).

Table 5. Spot-check validation of YOLOv8n-seg segmentation quality (n = 30 frames, ground-truth polygon annotation, IoU/Dice, conf = 0.6).

Metric	Dynamic 1	Dynamic 3
Mean IoU	0.614 ± 0.136	0.669 ± 0.200
Mean Dice	0.752 ± 0.105	0.782 ± 0.163
Min IoU	0.395	0.254
Max IoU	0.868	0.930

Figure 8 shows relevant examples of these spot-check segmentation results.

Figure 8. Spot-check segmentation validation for sample frames from Dynamic 1 and Dynamic 3.

The gap between validation and in-operation segmentation quality may result from mask dilation and occasional false-positive segmentation of static objects. The high variance in Dynamic 3 (IoU std = 0.200) was primarily observed when the actor appeared small or near the image boundaries.

Remarkably, as shown in Fig. 7(b), the confidence threshold that maximized the validation F1 score (0.772) differed from that minimizing SLAM trajectory error (0.6), indicating that the masking threshold should be tuned for downstream SLAM performance rather than segmentation metrics alone.

3.5. Map Quality Analysis

Table 6 presents the reprojection error, inlier ratio, and average track length for all five configurations. Figure 9 depicts the maps and trajectories produced by a selected run of each configuration.

Table 6. Map quality metrics across all five configurations (mean ± std of three runs).

Scenario	Reprojection Error (px)	Inlier Ratio (%)	Track Length (frames)
Static	1.685 ± 0.048	79.70 ± 1.07	14.64 ± 0.50
Dynamic 1	1.551 ± 0.024	80.57 ± 0.95	15.67 ± 0.88
Dynamic 1 + Yolo	1.625 ± 0.039	80.13 ± 0.87	15.14 ± 0.96
Dynamic 3	1.602 ± 0.020	80.07 ± 0.31	15.91 ± 0.28
Dynamic 3 + Yolo	1.643 ± 0.020	78.80 ± 0.36	15.79 ± 0.48

Figure 9. X–Y map and trajectory comparison across the five experimental configurations. (a) Static, (b) Dynamic 1, (c) Dynamic 3, YOLO-based masking for (d) Dynamic 1 and (e) Dynamic 3.

Dynamic baselines achieve lower reprojection error and longer track lengths than the static case, despite their substantially higher trajectory error. This is likely due to the high-contrast texture introduced by the moving actors, which improves short-term feature tracking but

contributes to long-term drift. Applying YOLO-based masking reverses this trend slightly increasing reprojection error (Dynamic 1: +4.8%; Dynamic 3: +2.6%) while improving cumulative trajectory accuracy. Track length also decreased slightly, while the inlier ratio remained relatively stable. This suggests that masking mainly changes the type of features used by ORB-SLAM3 rather than significantly affecting feature matching quality.

Across several runs, some keyframes remained active for unusually long periods, particularly around tracking-loss and relocalization events. Dynamic occlusion and the keyframe culling process may contribute to this behaviour and merit further investigation.

4. CONCLUSION

This study investigated YOLOv8n-seg-based dynamic-object masking for monocular ORB-SLAM3 in dynamic indoor environments, using an simulated indoor environment in Gazebo. Three scenarios of increasing dynamic complexity (static, single-actor, and three-actor) were tested, each with and without masking across fifteen independent runs. Dynamic actors increased ATE RMSE by up to 5.8-fold while improving local map metrics. YOLO-based masking reduced ATE RMSE by 35.2% and 45.6% in the single and three actor scenarios, respectively, with greater gains at higher dynamic object density. The resulting shift in local map metrics highlights the complementary nature of map-quality and localization measures.

The confidence-threshold ablation showed a non-monotonic effect, with conf = 0.6 providing the best localization accuracy. Despite near-perfect validation performance (mask mAP@0.5 = 0.995), in-operation mean IoU was lower (0.614–0.669), emphasizing the need for task-level evaluation when tuning masking for SLAM.

Overall, YOLOv8n-seg-based instance segmentation improved SLAM robustness in dynamic scenes. Future work will extend this pipeline to physical platforms in real-world indoor settings.

REFERENCES

Bescós B, Fácil JM, Civera J, Neira J. (2018). DynaSLAM: Tracking, mapping, and inpainting in dynamic scenes. IEEE Robotics and Automation Letters, 3(4), 4076–4083. https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2860039

Campos C, Elvira R, Gómez Rodríguez JJ, Montiel JMM, Tardós JD. (2021). ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multi-map SLAM. IEEE Transactions on Robotics, 37(6), 1874–1890. https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3075644

Chu G, Peng Y, Luo X, Gong J. (2023). YG-SLAM: Enhancing visual SLAM in dynamic environments with YOLOv8 and geometric constraints. IEEE Access, 11, 141421–141434. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3342080

Cong P, Li J, Liu J, Xiao Y, Zhang X. (2024). SEG-SLAM: Dynamic indoor RGB-D visual SLAM integrating geometric and YOLOv5-based semantic information. Sensors, 24(7), 2102. https://doi.org/10.3390/s24072102

Jocher G, Chaurasia A, Qiu J. (2023). Ultralytics YOLOv8 (Version 8.0.0) [Computer software]. https://github.com/ultralytics/ultralytics https://doi.org/10.5281/zenodo.22648364

Koenig N, Howard A. (2004). Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 3, 2149–2154. https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389727

Singh B, Kumar P, Kaur N. (2024). YDM-SLAM: YOLOv8-powered dynamic mapping of environment using ORB-SLAM3. 2024 International Conference on Data Science and Network Security (ICDSNS), 1–7. https://doi.org/10.1109/ICDSNS62112.2024.10691024

Sturm J, Engelhard N, Endres F, Burgard W, Cremers D. (2012). A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 573–580. https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385773

Wu W, Guo L, Gao H, You Z, Liu Y, Chen Z. (2022). YOLO-SLAM: A semantic SLAM system towards dynamic environment with geometric constraint. Neural Computing and Applications, 34(8), 6011–6026. https://doi.org/10.1007/s00521-021-06764-3

Yu C, Liu Z, Liu XJ, Xie F, Yang Y, Wei Q, Fei Q. (2018). DS-SLAM: A semantic visual SLAM towards dynamic environments. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 1168–1174. https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593691

TÜRK İŞ HUKUKUNDA İŞ SÖZLEŞMESİNİN DEVRİNDE KIDEM VE İŞVERENLERİN SORUMLULUĞU

Prof. Dr. İbrahim GÖRÜCÜ
Inonu University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Division of Labour Law
ORCID ID: 0000-0003-0640-4180
Res. Assist. Mehmet Emin BEKİK
Inonu University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Division of Labour Law
ORCID ID: 0000-0001-6959-1716

ÖZET
İş sözleşmesinin devri, işveren tarafının değişmesine rağmen iş ilişkisinin sürekliliğini sağlayan ve Türk Borçlar Kanunu'nun 429. maddesinde düzenlenen bir kurumdur. İş sözleşmesinin devrinde, sözleşmenin sona ermemesi nedeniyle feshe bağlı hakların doğması kural olarak söz konusu olmamakla birlikte, işçinin devreden işveren yanında geçen hizmet süresinin kıdeme bağlı haklar bakımından korunması gerekmektedir. Nitekim TBK m. 429 uyarınca, işçinin hizmetine bağlı haklarının belirlenmesinde devreden işveren yanında işe başladığı tarihin esas alınması, işçinin kıdeminin devir nedeniyle kesintiye uğramamasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, iş sözleşmesinin devrinin işçinin kıdemine bağlı hakları üzerindeki etkileri ve devreden ve devralan işverenlerin sorumlulukları incelenmektedir. Bu kapsamda, öncelikle iş sözleşmesinin devri ile 4857 sayılı İş Kanunu'nun 6. maddesinde düzenlenen işyeri devri arasındaki farklar ortaya konulmakta; ardından 1475 sayılı İş Kanunu'nun yürürlükte bulunan 14. maddesinde öngörülen kıdem tazminatına ilişkin sorumluluk rejiminin iş sözleşmesinin devrine uygulanıp uygulanamayacağı ele alınmaktadır. Çalışmanın temel tartışma konusunu, işyeri devrinde devreden işveren bakımından öngörülen sınırlı sorumluluğun, iş sözleşmesinin devrinde kıyasen uygulanmasının mümkün olup olmadığı oluşturmaktadır. Bu bağlamda doktrindeki farklı görüşler ve Yargıtay uygulaması değerlendirilerek, işçinin kıdeme bağlı haklarının korunması ile devreden ve devralan işverenler arasındaki sorumluluk dengesinin nasıl kurulması gerektiği incelenmektedir. Ayrıca kıdem tazminatı, ihbar tazminatı ve yıllık ücretli izin bakımından ortaya çıkan farklı sonuçlar değerlendirilerek, her bir hakkın hukuki niteliğine göre ayrı bir sorumluluk rejiminin benimsenmesinin gerekip gerekmediği tartışılmaktadır.
Anahtar kelimeler: İş sözleşmesi, işyeri devri, kıdem tazminatı, yıllık ücretli izin.

SENIORITY AND EMPLOYER LIABILITY IN THE TRANSFER OF EMPLOYMENT CONTRACTS UNDER TURKISH LABOUR LAW

ABSTRACT
The transfer of an employment contract is a legal institution that ensures the continuity of the employment relationship despite a change in the employer and is regulated under Article 429 of the Turkish Code of Obligations. In the transfer of an employment contract, although the termination of the contract does not, as a rule, occur and therefore termination-related entitlements do not arise, the employee's period of service with the transferring employer must be preserved with regard to rights contingent upon seniority. Indeed, pursuant to Article 429 of the Turkish Code of Obligations, the date on which the employee commenced employment with the transferring employer is taken into account in determining rights arising from the

employee's period of service, thereby ensuring that the employee's seniority is not interrupted by the transfer. This study examines the effects of the transfer of an employment contract on the employee's seniority-based entitlements and the liability of the transferring and transferee employers. In this context, it first distinguishes the transfer of an employment contract from the transfer of a workplace regulated under Article 6 of the Turkish Labour Law No. 4857. It then considers whether the liability regime concerning severance pay set forth in Article 14 of the former Labour Law No. 1475, which remains in force, may be applied by analogy to the transfer of an employment contract. The principal issue addressed in the study is whether the limited liability imposed on the transferring employer in cases of workplace transfer may, by analogy, be applied to the transfer of an employment contract. In this regard, differing views in legal scholarship and the case law of the Turkish Court of Cassation are examined in order to determine how a proper balance should be established between the protection of employees' seniority-based entitlements and the allocation of liability between the transferring and transferee employers. The study also evaluates the differing consequences arising with respect to severance pay, notice pay, and annual paid leave, and considers whether each entitlement requires a distinct liability regime based on its specific legal nature.

Keywords: Transfer of an employment contract, transfer of a workplace, severance pay, annual paid leave.

1.GİRİŞ

İş sözleşmesinin devri, işveren tarafının değişmesine rağmen iş ilişkisinin devamlılığını sağlayan ve 6098 sayılı Türk Borçlar Kanunu'nun 429. maddesinde düzenlenen bir hukuki kurumdur. Devir sonucunda işveren değişmekte, ancak işçinin mevcut iş sözleşmesinden doğan hak ve yükümlülükleri devam etmektedir. Bu kapsamda işçinin devreden işveren yanında geçirdiği hizmet süresinin korunması, özellikle kıdeme bağlı hakların belirlenmesi bakımından önem taşımaktadır. İş sözleşmesinin devrinde kıdemin korunmasına ilişkin açık düzenleme bulunmasına rağmen, devreden ve devralan işverenlerin bu haklardan doğan sorumluluklarının kapsamı konusunda çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Özellikle 4857 sayılı İş Kanunu'nun 6. maddesinde işyeri devri için öngörülen sorumluluk hükümlerinin, iş sözleşmesinin devrine kıyasen uygulanıp uygulanamayacağı tartışmalıdır. Bu husus, başta kıdem tazminatı olmak üzere ihbar tazminatı ve yıllık ücretli izin hakları bakımından farklı hukuki sonuçların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu çalışmada, öncelikle iş sözleşmesinin devri ile işyeri devri arasındaki temel farklılıklar ele alınmakta, ardından işçinin kıdeminin devralan işveren bakımından nasıl korunacağı incelenmektedir. Bu çerçevede devreden ve devralan işverenlerin sorumlulukları, 1475 sayılı İş Kanunu'nun yürürlükte bulunan 14. maddesi ve 4857 sayılı İş Kanunu'nun 6. maddesi dikkate alınarak; doktrindeki görüşler ve Yargıtay uygulaması ışığında değerlendirilmektedir.

2.KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. İş Sözleşmesi

4857 sayılı İş Kanunu'nun 8. maddesinde iş sözleşmesinin tanımı yapılmıştır. Bu maddeye göre iş sözleşmesi, bir tarafın (işçi) bağımlı olarak iş görmeyi, diğer tarafın (işveren) da ücret ödemeyi üstlenmesinden oluşan sözleşmedir. 4857 sayılı İş Kanunu kapsamında iş sözleşmesi; iş görme, ücret ve bağımlılık unsurlarının bir araya gelmesiyle meydana gelen bir sözleşme türü olarak kabul edilmektedir. Söz konusu unsurlar, iş sözleşmesini diğer sözleşme türlerinden ayıran temel özellikleri oluşturmaktadır (Süzek, 2019). İş sözleşmesinin hukuki yapısı değerlendirildiğinde, taraflardan yalnızca birinin borç altına girdiği tek taraflı bir ilişki söz konusu olmadığı görülmektedir. Aksine, işçi ve işverenin karşılıklı olarak edim üstlendiği ve bu edimlerin birbirine bağlı olduğu bir hukuki ilişki bulunmaktadır (Çelik, 2023).

2.2.İş Sözleşmesinin Devri

İş sözleşmesinin devri, 6098 sayılı Türk Borçlar Kanunu'nun 429. maddesinde düzenlenmiştir. Buna göre hizmet(iş) sözleşmesinin sürekli olarak başka bir işverene devredilebilmesi, işçinin yazılı olarak onay vermesine bağlıdır. Dolayısıyla işçinin yazılı rızası, sözleşmenin devrinin geçerliliği bakımından temel bir koşul niteliğindedir.

Devir gerçekleştiğinde, devralan işveren, iş sözleşmesinden kaynaklanan tüm hak ve yükümlülükleriyle birlikte işveren sıfatını kazanır. Bununla birlikte, işçinin kıdem ve hizmet süresine bağlı haklarının belirlenmesinde, devralan işverenin yanında işe başladığı tarih değil, devreden işveren nezdinde çalışmaya başladığı tarih dikkate alınır. Böylece sözleşmenin devri, işçinin önceki çalışma süresine dayanan haklarının korunmasını sağlar (Alp, 2009).

Sözleşmenin devri, alacağın temliki ve borcun naklinden kapsamı ve hukuki sonuçları itibarıyla ayrılmaktadır. Alacağın temlikinde belirli bir alacak hakkının, borcun naklinde ise belirli bir borcun başka bir kişiye geçirilmesi söz konusudur. Buna karşılık sözleşmenin devrinde, sözleşme taraflarından birinin yalnızca belirli bir hakkı veya borcu değil, sözleşmeden kaynaklanan hukuki konumu bütün olarak başka bir kişiye aktarılmaktadır. Dolayısıyla sözleşmeyi devralan kişi, yalnızca sözleşmeden doğan münferit bir hak veya borcun sahibi olmayıp sözleşmenin tarafı haline gelmektedir (Çelik vd., 2023; Kocagil, 2011).

3. İŞ SÖZLEŞMESİNİN DEVRİNDE KIDEM VE İŞVERENLERİN SORUMLULUĞU

İş sözleşmesinin devriyle birlikte devralan işveren, işçi ile devreden işveren arasında kurulmuş olan mevcut sözleşmeden doğan hak ve yükümlülükleri bir bütün olarak üstlenmektedir. Bu devrin gerçekleşmesiyle birlikte devralan işveren, sözleşmenin tarafı sıfatını kazanarak işveren konumuna geçmektedir (Çankaya ve Çil, 2011). İş sözleşmesinin devri sonucunda devreden işveren ile işçi arasındaki mevcut sözleşmesel ilişki sona ermekte, ancak iş sözleşmesinin içeriğinde herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir. Sözleşme, mevcut hükümleriyle işçi ile devralan işveren arasındaki hukuki ilişki içerisinde varlığını sürdürmektedir. Böylece iş ilişkisinin devamlılığı sağlanırken yalnızca işveren tarafında bir değişiklik meydana gelmektedir (Akyiğit, 2024). İş sözleşmesinin devriyle birlikte devralan işveren, devreden işverenin sözleşmeden kaynaklanan hukuki konumunu üstlenmektedir. Bu kapsamda devralan işveren, yalnızca devir tarihinden sonra ortaya çıkacak hak ve yükümlülüklerden değil, aynı zamanda devirden önce doğmuş bulunan ve sözleşme ilişkisi kapsamında varlığını sürdüren hak ve borçlardan da sorumlu olmaktadır (Süzek, 2019).

4857 sayılı İş Kanunu'nun 6. maddesine göre işyeri veya işyerinin bir bölümünün hukukî bir işleme dayalı olarak başka bir işverene devredilmesi hâlinde, devir tarihinde işyerinde mevcut olan iş sözleşmeleri, bütün hak ve borçlarıyla birlikte devralan işverene geçmektedir. Bu durumda devralan işveren, işçinin hizmet süresine bağlı haklarının belirlenmesinde, işçinin kendi yanında işe başladığı tarihi değil, devreden işveren yanında işe başladığı tarihi esas almakla yükümlüdür. Devir hâlinde, devirden önce doğmuş ve devir tarihinde ödenmesi gereken borçlardan devreden ve devralan işveren birlikte sorumludur. Bununla birlikte, devreden işverenin bu sorumluluğu devir tarihinden itibaren iki yıllık süreyle sınırlandırılmıştır. Tüzel kişiliğin birleşme, katılma veya tür değiştirme yoluyla sona ermesi hâlinde ise söz konusu birlikte sorumluluk hükümleri uygulanmamaktadır.

1475 sayılı İş Kanunu kapsamında düzenlenen kıdem tazminatından yararlanabilmenin temel koşullarından biri, işçinin İş Kanunu'nun kapsamına giren bir iş ilişkisi içerisinde çalışmasıdır. Bununla birlikte, 1475 sayılı Kanun'un kıdem tazminatına ilişkin 14. maddesi dışındaki hükümlerinin yürürlükten kaldırılmış olması nedeniyle, bir kişinin işçi niteliğini taşıyıp taşımadığının belirlenmesinde 4857 sayılı İş Kanunu hükümleri esas alınmaktadır (Çelik vd., 2023; Sümer, 2025). Kıdem tazminatına hak kazanılabilmesi bakımından işçinin, iş sözleşmesinin sona erdiği tarih itibarıyla aynı işverenin işyerlerinde en az bir yıllık hizmet

süresini tamamlamış olması gerekmektedir. Bu nedenle, kıdem tazminatı bakımından yalnızca çalışma sürelerinin toplamı değil, bu sürelerin hangi işveren nezdinde geçirildiği de önem taşımaktadır (Mollamahmutoğlu vd., 2022). Bir yıllık hizmet koşulunun gerçekleşebilmesi için işçinin aynı işverene bağlı olarak aynı işyerinde çalışmış olması zorunlu değildir. İşçinin aynı işverene ait farklı işyerlerinde geçirdiği çalışma süreleri bir bütün olarak değerlendirilerek kıdem hesabına dahil edilmektedir. Buna karşılık, işçinin farklı işverenler yanında geçirdiği sürelerin toplamı bir yılı aşsa dahi, bu süreler kural olarak tek bir işverene bağlı hizmet süresi oluşturmadığından, yalnızca bu çalışmalara dayanılarak kıdem tazminatına hak kazanılması mümkün değildir (Süzek, 2019).

6098 sayılı Türk Borçlar Kanunu'nun 429. maddesine göre İşçinin hizmet süresine bağlı haklarının belirlenmesinde, devralan işveren yanında çalışmaya başladığı tarih değil, devreden işveren nezdindeki işe giriş tarihi esas alınmaktadır. Bu nedenle, işçinin devreden işveren yanında geçirdiği çalışma süresi de hizmet süresinin hesabında dikkate alınmakta ve hizmet süresine bağlı olarak doğan haklar bakımından devralan işveren sorumluluk üstlenmektedir (Özkaraca, 2014).

Devralan işveren, devir konusu sözleşmeden kaynaklı taraf sıfatının yanı sıra, devreden işveren ile işçi arasındaki sözleşmeden kaynaklı bütün hak ve borçların sahibi haline geleceği için, iş sözleşmesinin tarafını oluşturan işçi, devreden işveren nezdindeki kıdemine bağlı olan ve olmayan haklarını devralan işverene karşı da ileri sürebilecektir446. İş sözleşmesinin devri sonucunda devralan işveren, devreden işverenin işçi karşısında halihazırda bulunan hukuki konumunu üstlenerek iş sözleşmesinin yeni işveren tarafı haline geldiği için devreden işveren nezdinde geçen hizmet sürelerini de devralan işveren üstlenmiş olur. Devir işlemi sonucunda devralan işveren, devreden işverenin işçi karşısındaki sözleşmesel konumunu üstlendiğinden, işçinin devreden işveren yanında geçirdiği çalışma süresi de mevcut iş ilişkisi bakımından korunmaktadır. Başka bir ifadeyle, iş sözleşmesinin devriyle birlikte yalnızca işveren tarafı değişmekte; işçinin önceki işveren nezdinde geçirdiği hizmet süresi de devralan işveren bakımından dikkate alınmaya devam etmektedir. Bu durum, işçinin hizmet süresine bağlı olarak sahip olduğu hakların işveren değişikliği nedeniyle ortadan kalkmasını önlemektedir (Çelik, 2023; Süzek, 2019; Akyiğit, 2024).

Kıdem tazminatı, iş sözleşmesinin sona ermesiyle birlikte muaccel hale gelen bir alacak niteliğindedir. İşyeri devrine ilişkin İş Kanunu'nun 6. maddesinin üçüncü fıkrasında ise devreden ve devralan işverenin sorumluluğu, devir tarihinden önce doğmuş ve bu tarihte ödenmesi gereken borçlarla sınırlandırılmıştır. Bu çerçevede, devreden işverenin kıdem tazminatından doğan sorumluluğu, işçinin kendi nezdinde çalıştığı süreyle sınırlı olmak üzere devam ederken, devralan işveren iş ilişkisinin devam eden kısmından ve kıdem tazminatının hesabında dikkate alınan toplam hizmet süresinden kaynaklanan yükümlülükleri üstlenmektedir. Ayrıca, İş Kanunu m. 6/3'te öngörülen ve devreden işverenin sorumluluğunu devir tarihinden itibaren iki yıllık süreyle sınırlandıran düzenleme, kıdem tazminatı bakımından uygulanmamaktadır (Yıldız, 2016).

4.SONUÇ

İş sözleşmesinin devrinde, işveren değişmesine rağmen iş ilişkisinin devamlılığı sağlanmakta ve işçinin önceki hizmet süresi kıdeme bağlı haklar bakımından korunmaktadır. Nitekim Türk Borçlar Kanunu'nun 429. maddesi uyarınca, işçinin hizmet süresine bağlı haklarının belirlenmesinde devreden işveren yanında işe başladığı tarih esas alınmaktadır. Bu düzenleme ile işçinin kıdeminin devir nedeniyle kesintiye uğraması önlenmektedir. Bununla birlikte, iş sözleşmesinin devri ile 4857 sayılı İş Kanunu'nun 6. maddesinde düzenlenen işyeri devrinin birbirinden farklı hukuki kurumlar olması, sorumluluk rejiminin belirlenmesi bakımından önem taşımaktadır. İş Kanunu m. 6 uyarınca, devirden önce doğmuş ve devir tarihinde ödenmesi

gereken borçlardan devreden ve devralan işveren birlikte sorumlu tutulmakta, devreden işverenin sorumluluğu ise devir tarihinden itibaren iki yıl ile sınırlandırılmaktadır. İş sözleşmesinin devrinde ise aynı yönde açık bir sorumluluk düzenlemesi bulunmamaktadır. Bu nedenle, işyeri devrine ilişkin İş Kanunu m. 6'da öngörülen sınırlı sorumluluk rejiminin iş sözleşmesinin devrine kıyasen uygulanıp uygulanamayacağı önem kazanmaktadır. Özellikle 1475 sayılı İş Kanunu'nun yürürlükte bulunan 14. maddesinde düzenlenen kıdem tazminatı bakımından, işçinin toplam hizmet süresinin korunması ile devreden ve devralan işverenlerin sorumluluklarının kapsamının birbirinden ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, iş sözleşmesinin devrinde işçinin kıdeminin korunması esas olmakla birlikte, devreden ve devralan işverenlerin sorumluluğunun belirlenmesinde 4857 sayılı İş Kanunu md. 6 ile 1475 sayılı İş Kanunu md. 14 hükümlerinin, Türk Borçlar Kanunu md. 429 ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirmede hem işçinin kıdeme bağlı haklarının korunması hem de işverenlerin sorumluluklarının hukuki niteliğe uygun şekilde belirlenmesi elzemdir.

KAYNAKÇA

Akyiğit, E. (2024). Toplu iş hukuku (5. baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi.
Alp, M. (2009). İş sözleşmesinin değiştirilmesi. Ankara: Seçkin Yayınevi.
Çankaya, O. G. ve Çil, Ş. (2011). İş hukukunda üçlü ilişkiler (3. Baskı). Ankara: Yetkin Yayınları.
Çelik, N., Caniklioğlu, N., Canbolat, T. ve Özkaraca, E. (2023). İş hukuku dersleri (36.baskı). İstanbul: Beta.
Kocagil, İ. (2011). Yeni borçlar kanunu ışığında iş sözleşmesinin devri. Sicil İş Hukuku Dergisi, Haziran, S. 22, 46-61.
Mollamahmutoğlu, H., Astarlı, M. ve Baysal, U. (2022). İş hukuku (7.baskı). Ankara: Lykeion Yayınları.
Özkaraca, E. (2014). İş sözleşmesinin devri. İş Hukukunda Genç Yaklaşımlar (Koç Üniversitesi Hukuk Fakültesi Hukuka Genç Yaklaşımlar Konferans Serisi), On İki Levha Yayıncılık, İstanbul.
Sümer, H.H. (2025). İş hukuku (28.baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi.
Süzek, S. (2019). İş hukuku (18.baskı). İstanbul: Beta.
Yıldız, G. B. (2016). Bireysel iş ilişkisinin kurulması, hükümleri ve işin düzenlenmesi, yargıtay'ın iş hukuku ve sosyal güvenlik hukuku kararlarının değerlendirilmesi semineri. İstanbul: Oniki Levha Yayınları.

TÜRK İŞ HUKUKUNDA DENEME SÜRELİ İŞ SÖZLEŞMESİNDE SENDİKAL HAKLAR

Prof. Dr. İbrahim GÖRÜCÜ
Inonu University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Division of Labour Law
ORCID ID: 0000-0003-0640-4180
Res. Assist. Mehmet Emin BEKİK
Inonu University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Division of Labour Law
ORCID ID: 0000-0001-6959-1716

ÖZET

Deneme süreli iş sözleşmesi, taraflara iş ilişkisinin başlangıç aşamasında, deneme süresi içerisinde sözleşmeyi bildirim süresine ve buna bağlı tazminat yükümlülüğüne tabi olmaksızın sona erdirme imkânı tanıyan özel bir sözleşme türüdür. Deneme süresinin temel işlevi, tarafların iş ilişkisinin devamına yönelik iradelerini ve iş ilişkisinin gereklerini karşılıklı olarak değerlendirmelerine olanak sağlamaktır. Bununla birlikte, bu dönemde işçinin işçi sıfatının ve iş sözleşmesinden doğan haklarının devam etmesi, deneme süresinin sendikal hak ve özgürlükler bakımından herhangi bir koruma boşluğu meydana getirip getirmediği sorusunu gündeme getirmektedir. Bu çalışmada, deneme süresi içerisinde bulunan işçinin sendikal haklardan yararlanma imkânı ile söz konusu hakların işverenin fesih yetkisi karşısındaki hukuki konumu incelenmektedir. Bu kapsamda, öncelikle deneme süresindeki işçinin sendikaya üye olma, sendikal faaliyetlere katılma, toplu iş sözleşmesinden yararlanma ve grev hakkını kullanma imkânı ele alınmaktadır. İşçinin deneme süresince işçi statüsünü muhafaza ettiği ve sendikal hakların sözleşmenin türü, süresi veya işçinin kıdemi esas alınarak ortadan kaldırılamayacağı kabul edilmektedir. Bu çerçevede deneme süresinin, sendikal hakların kullanımını sınırlayan bağımsız bir hukuki sebep olarak değerlendirilemeyeceği ortaya konulmaktadır. Çalışmanın diğer temel inceleme alanını, deneme süresi içerisinde işyeri sendika temsilcisi veya işçi kuruluşu yöneticisi seçilen işçinin sendikal güvencelerden yararlanması oluşturmaktadır. Bu bağlamda, deneme süresinin sağladığı fesih kolaylığı ile 6356 sayılı Sendikalar ve Toplu İş Sözleşmesi Kanunu'nda düzenlenen sendikal güvenceler arasındaki ilişki incelenmekte; Anayasa'nın 51. maddesinde güvence altına alınan sendika hakkı ışığında, deneme süresinin sendikal güvenceleri etkisiz kılacak biçimde yorumlanamayacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Böylece çalışma, deneme süresinin işveren bakımından tanıdığı fesih imkânının, sendikal hakların özünü ve bu haklara bağlı güvenceleri ortadan kaldırmayacağı yönündeki yaklaşımı ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Deneme süresi, iş hukuku, sendikal haklar, sendikal güvence.

TRADE UNION RIGHTS UNDER EMPLOYMENT CONTRACTS SUBJECT TO A PROBATIONARY PERIOD IN TURKISH LABOUR LAW

ABSTRACT

An employment contract subject to a probationary period is a particular form of employment relationship that permits the parties, during the probationary period, to terminate the contract without being subject to notice requirements or the corresponding compensation obligations. The primary function of the probationary period is to enable both parties to assess the suitability and sustainability of the employment relationship at its initial stage. Nevertheless, the continuation of the employee's legal status and employment-related rights throughout the probationary period raises the question of whether, and to what extent, trade union rights and protections apply during this period. This paper examines the exercise of trade union rights by

employees subject to a probationary period and the legal position of such rights vis-à-vis the employer's power of termination. The study first addresses the employee's right to join a trade union, participate in trade union activities, benefit from a collective agreement, and exercise the right to strike during the probationary period. Since the employee retains their status as an employee throughout the probationary period, the mere existence of such a period cannot, in itself, constitute a legal ground for restricting or excluding the exercise of trade union rights. Accordingly, probationary status should not be construed as creating a legal sphere in which employees are deprived of the protection afforded to trade union rights. A further issue examined is whether an employee who is elected as a workplace trade union representative or appointed as an officer of a workers' organisation during the probationary period may benefit from the statutory protections applicable to such positions. In this context, the paper analyses the interaction between the employer's simplified termination power during the probationary period and the trade union protections provided under Law No. 6356 on Trade Unions and Collective Labour Agreements. In light of Article 51 of the Turkish Constitution, which guarantees freedom of association and the right to form and join trade unions, the study argues that the probationary period cannot be interpreted in a manner that renders trade union rights and the statutory safeguards attached to them ineffective.
Keywords: Probationary period, labour law, trade union rights, trade union protection.

1.GİRİŞ

Deneme süreli iş sözleşmesi, taraflara iş ilişkisinin başlangıç aşamasında birbirlerini ve çalışma koşullarını değerlendirme imkânı sağlayan özel bir sözleşme türüdür. 4857 sayılı İş Kanunu'nun 15. maddesi uyarınca deneme süresi içerisinde taraflar, iş sözleşmesini bildirim süresine uymaksızın ve tazminat ödeme yükümlülüğü olmaksızın sona erdirebilmektedir. Bununla birlikte deneme süresi, işçinin işçi sıfatını ve iş sözleşmesinden doğan haklarını ortadan kaldıran bir dönem değildir. Bu durum, deneme süresinde bulunan işçinin sendikal haklardan yararlanıp yararlanamayacağı ve bu hakların işverenin fesih yetkisi karşısındaki konumu bakımından önem taşımaktadır. Anayasa'nın 51. maddesi ve 6356 sayılı Sendikalar ve Toplu İş Sözleşmesi Kanunu kapsamında güvence altına alınan sendikal hakların, iş sözleşmesinin deneme süreli olması nedeniyle sınırlandırılıp sınırlandırılamayacağı özellikle incelenmesi gereken bir hukuki sorundur. Bu çalışmada, deneme süresinde bulunan işçinin sendikaya üye olma, sendikal faaliyette bulunma, işyeri sendika temsilcisi veya sendika yöneticisi olma, toplu iş sözleşmesinden yararlanma ve grev hakkını kullanma imkânları ele alınmaktadır. Ayrıca deneme süresinin sağladığı fesih kolaylığı ile sendikal güvenceler arasındaki ilişki değerlendirilerek, deneme süresinin sendikal hakların kullanımını sınırlayan bağımsız bir hukuki sebep oluşturup oluşturmadığı ortaya konulmaya çalışılmaktadır.

2.DENEME SÜRELİ İŞ SÖZLEŞMESİ

Deneme süresi, iş sözleşmesinin kurulmasının ardından tarafların mevcut iş ilişkisinin kendileri açısından uygun olup olmadığını değerlendirebildikleri başlangıç dönemidir. Bu süre içerisinde taraflar, belirli koşullar altında iş sözleşmesini herhangi bir bildirimde bulunmaksızın ve tazminat ödeme yükümlülüğü doğmaksızın sona erdirebilirler (Süzek, 2019). Deneme süresi işveren bakımından işçinin işe uygunluğunun, mesleki bilgi ve becerilerinin, çalışma performansının ve işyerindeki tutum ve davranışlarının gözlemlenmesine olanak tanımaktadır. İşçi açısından ise yeni işyerine, çalışma düzenine ve işin gerektirdiği koşullara uyum sağlama ve bunları değerlendirme sürecidir. Dolayısıyla deneme süresinin temelinde, tarafların iş ilişkisinin devamının kendileri bakımından uygun olup olmadığını karşılıklı olarak değerlendirmelerine imkân sağlama amacı bulunmaktadır. Bu yönüyle deneme süresi, işçi ile

işverenin birbirlerini ve aralarındaki çalışma ilişkisinin koşullarını tanımalarına hizmet eden bir hukuki kurum olarak nitelendirilebilir (Çelik vd.,2023; Sümer, 2025).

4857 sayılı İş Kanunu'nun 15.maddesinde deneme süreli iş sözleşmesi hususu düzenlenmiştir. Bu maddeye göre iş sözleşmesinde tarafların anlaşmasıyla deneme süresine ilişkin bir hükme yer verilmesi mümkündür. Bu durumda deneme süresinin uzunluğu kural olarak iki ayı geçemez. Bununla birlikte, toplu iş sözleşmesi kapsamında deneme süresinin dört aya kadar belirlenebilmesine imkân tanınmıştır. Deneme süresi devam ederken işçi veya işveren, iş sözleşmesini herhangi bir bildirim süresine uymaksızın ve tazminat ödeme yükümlülüğü olmaksızın sona erdirebilir. Bununla birlikte, sözleşmenin deneme süresi içerisinde feshedilmesi, işçinin bu süre içerisinde gerçekleştirdiği çalışmanın karşılığını ve çalışmadan kaynaklanan diğer haklarını ortadan kaldırmayacaktır. Dolayısıyla işçinin deneme süresinde çalıştığı günlere ilişkin ücret ve doğmuş bulunan diğer işçilik haklarının kendisine ödenmesi gerekmektedir (Akyiğit, 2024).

6098 sayılı Türk Borçlar Kanunu'nun 433. maddesinde deneme süresine ilişkin düzenlemeye yer verilmiştir. Anılan hüküm uyarınca, tarafların hizmet(iş) sözleşmesine deneme süresi koymaları mümkündür; ancak bu sürenin iki ayı aşmaması gerekir. Deneme kaydının kararlaştırıldığı hâllerde taraflar, deneme süresi içerisinde sözleşmeyi herhangi bir fesih süresine bağlı kalmaksızın ve tazminat ödeme yükümlülüğü olmadan sona erdirebilirler (Kayar, 2019).

3. DENEME SÜRELİ İŞ SÖZLEŞMESİNDE SENDİKAL HAKLAR

3.1. Sendika Üyeliği, İşyeri Sendika Temsilcisi ve Sendika Yöneticisi Olma Hakkı

Anayasa'nın 51. maddesi, çalışanların sendikal örgütlenme özgürlüğünü güvence altına almaktadır. Buna göre çalışanlar, çalışma ilişkilerinden kaynaklanan ekonomik ve sosyal hak ve menfaatlerini korumak ve geliştirmek amacıyla herhangi bir ön izin alma zorunluluğu bulunmaksızın sendika ve üst kuruluşlar kurabilmektedir. Bunun yanında kişiler, kurulan sendikalara kendi iradeleriyle üye olma veya üyeliklerini sona erdirme konusunda serbesttir. Bu kapsamda hiç kimse, iradesi dışında bir sendikaya üye olmaya veya mevcut üyeliğini sona erdirmeye zorlanamaz. Böylece anayasal düzenleme, hem sendika kurma ve sendikaya katılma özgürlüğünü hem de sendika üyeliğinden ayrılma serbestisini güvence altına almaktadır.

6356 sayılı Sendikalar ve Toplu İş Sözleşmesi Kanunu'nun 17. maddesinde, işçi sendikalarına üye olabilmenin koşulları düzenlenmiştir. Buna göre, on beş yaşını tamamlamış ve ilgili Kanun kapsamında işçi niteliğine sahip olan kişiler, işçi sendikalarına üye olma hakkına sahiptir. Dolayısıyla sendika üyeliği bakımından temel şartlardan biri, kişinin kanun anlamında işçi statüsünde bulunması ve on beş yaşını doldurmuş olmasıdır. 6356 sayılı Sendikalar ve Toplu İş Sözleşmesi Kanunu'nun 2. maddesinde, Kanunun uygulanması bakımından esas alınacak işçi, işveren ve işyeri kavramlarının 4857 sayılı İş Kanunu'ndaki tanımlara göre belirleneceği düzenlenmiştir. Bu nedenle, 6356 sayılı Kanun kapsamında söz konusu kavramların anlam ve kapsamının tespitinde öncelikle 4857 sayılı İş Kanunu'nda yer alan tanımlar dikkate alınmalıdır (Tunçomağ ve Centel, 2022). Bu bağlamda deneme süresi içerisinde bulunan işçi, iş sözleşmesinin tarafı ve işçi sıfatını taşıması nedeniyle bireysel iş hukukundan kaynaklanan hak ve borçların yanı sıra toplu iş hukukunun sağladığı korumadan da yararlanır. Bu nedenle deneme süresinde çalışan işçinin sendikaya üye olma, toplu iş sözleşmesinden yararlanma ve grev hakkını kullanma gibi sendikal ve toplu iş hukukuna ilişkin haklardan yararlanması mümkündür. Dolayısıyla işçinin deneme süresinde bulunması, onun sendikal haklarının sınırlandırılması veya bu haklar bakımından diğer işçilerden farklı bir uygulamaya tabi tutulması için tek başına bir gerekçe oluşturmayacaüı gibi hukuka aykırı olacaktır (Sümer, 2025; Manav Özdemir, 2016).

Deneme süresi devam eden işçinin, işyeri sendika temsilciliğine veya işçi kuruluşunda yöneticilik görevine seçilmesi mümkündür. Zira söz konusu görevlere seçilebilme imkânı, işçinin deneme süresindeki statüsüne değil, işçi sıfatına bağlı olarak sahip olduğu sendikal haklara dayanmaktadır. Bu itibarla, iş sözleşmesinin deneme süresine tabi olması, işçinin sendikal bir göreve aday olmasına veya bu göreve seçilmesine engel teşkil etmemektedir (Çelik vd., 2023). Deneme süresine tabi olarak çalışan bir işçinin işyeri sendika temsilciliği veya sendika yöneticiliği görevini üstlenmesinin önünde hukuki bir engel bulunmamaktadır. Deneme süresinin mevcut olması, işçinin sendikal sıfatından kaynaklanan hak ve güvencelerin uygulanmasını kendiliğinden ortadan kaldırmaz. Aksine, bu güvencelerin yalnızca iş sözleşmesinin deneme süresine tabi olduğu gerekçesiyle uygulanmaması, Anayasa ve 6356 sayılı Kanun'un 23. ve 24. maddesi tarafından güvence altına alınan hakların korunması bakımından tartışmalı bir sonuç doğuracaktır.

3.2.Toplu İş Sözleşmesi ve Grev Hakkı

Anayasa'nın 53. maddesi, işçi ve işverenlere çalışma ilişkilerinden kaynaklanan ekonomik ve sosyal koşullar ile çalışma şartlarını karşılıklı olarak düzenleyebilmek amacıyla toplu iş sözleşmesi yapma hakkı tanımaktadır. 6356 sayılı Sendikalar ve Toplu İş Sözleşmesi Kanunu'nun 2. maddesinde toplu iş sözleşmesi; iş sözleşmesinin kurulmasına, içeriğinin belirlenmesine ve sona ermesine ilişkin hususları düzenlemek amacıyla işçi sendikası ile işveren sendikası veya herhangi bir sendikaya üye olmayan işveren arasında akdedilen sözleşme olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu düzenlemede toplu iş sözleşmesinden yararlanma bakımından temel ölçüt, kişinin işçi sıfatını taşımasıdır. Kanun hükmünde, işçinin hangi tür iş sözleşmesi kapsamında çalıştığına ilişkin ayrıca bir ayrım veya sınırlama öngörülmemiştir. Bu nedenle, toplu iş sözleşmesinden yararlanma bakımından belirleyici olan husus, işçinin işçi statüsüne sahip olması olup, iş sözleşmesinin deneme süreli olması tek başına bu haktan yararlanılmasına engel teşkil etmemektedir. Bu bağlamda deneme süresi içerisinde işçi, sendikaya üye olarak veya üye olmadan dayanışma aidatı ödeyerek yürürlükteki toplu iş sözleşmesinden yararlanması mümkündür (Akyiğit, 2024).

Anayasa'nın 54. maddesi, toplu iş sözleşmesi görüşmeleri sırasında taraflar arasında uyuşmazlık ortaya çıkması hâlinde işçilere grev hakkı tanımaktadır. Buna göre grev, toplu iş sözleşmesinin kurulması sürecinde ortaya çıkan uyuşmazlıkların çözümünde işçilerin başvurabileceği anayasal bir hak niteliğindedir. 6356 sayılı Sendikalar ve Toplu İş Sözleşmesi Kanunu'nun 58. maddesine göre işçilerin, topluca çalışmamak suretiyle işyerinde faaliyeti durdurmak veya işin niteliğine göre önemli ölçüde aksatmak amacıyla, aralarında anlaşarak veya bir kuruluşun aynı amaçla topluca çalışmamaları için verdiği karara uyarak işi bırakmalarına grev denir. Toplu iş sözleşmesinin kurulması sürecinde taraflar arasında uyuşmazlık meydana gelmesi durumunda, işçilerin ekonomik ve sosyal hakları ile çalışma koşullarını korumak veya bunların geliştirilmesini sağlamak amacıyla ve kanunda öngörülen usul ve şartlara uygun şekilde gerçekleştirilen grev, kanuni grev olarak nitelendirilmektedir. Bu çerçevede Türk iş hukukunda hukuken korunan grev, toplu iş sözleşmesi görüşmeleri sırasında ortaya çıkan uyuşmazlığın ardından ve 6356 sayılı Kanun'da öngörülen koşulların yerine getirilmesi suretiyle gerçekleştirilen kanuni grevdir (Sümer, 2025). Anayasa'nın 54. maddesi ile 6356 sayılı Sendikalar ve Toplu İş Sözleşmesi Kanunu'nun grev hakkına ilişkin hükümleri birlikte değerlendirildiğinde, grev hakkının işçiye tanınmış kolektif bir hak olduğu görülmektedir. Bu hakkın kullanılmasında esas alınması gereken husus, işçinin kanun kapsamında işçi sıfatını taşıması ve grevin kanunda öngörülen koşullar çerçevesinde gerçekleştirilmesidir. İş sözleşmesinin deneme kaydı içermesi, işçinin toplu iş hukukundan kaynaklanan haklarının kapsamı bakımından ayrıca bir sınırlama teşkil etmemektedir. Bu

nedenle, kanuni grevin gerçekleşmesi için gerekli şartların mevcut olması hâlinde, deneme süresi içerisinde bulunan işçinin de grev hakkından yararlanabileceği kabul edilmelidir.

4.SONUÇ

Deneme süreli iş sözleşmesi, taraflara iş ilişkisinin başlangıcında karşılıklı değerlendirme imkânı sağlamakta ve belirli koşullar altında iş sözleşmesinin bildirimsiz ve tazminatsız sona erdirilmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte deneme süresi içerisinde işçi, işçi sıfatını ve iş sözleşmesinden doğan haklarını korumaya devam etmektedir. Bu nedenle deneme süresinin, işçinin sendikal haklardan yararlanmasını engelleyen bağımsız bir hukuki neden olarak kabul edilmesi mümkün değildir. Deneme süresindeki işçi, gerekli koşulların bulunması hâlinde sendikaya üye olabilmekte, sendikal faaliyetlere katılabilmekte, işyeri sendika temsilcisi veya sendika yöneticisi olabilmekte, toplu iş sözleşmesinden yararlanabilmekte ve kanuni grev hakkını kullanabilmektedir. Öte yandan deneme süresinin işverene tanıdığı fesih kolaylığı, sendikal hakları ve bu haklara bağlı güvenceleri etkisiz hâle getirecek biçimde yorumlanmamalıdır. Anayasa'nın 51. maddesinde güvence altına alınan sendika hakkı ile 6356 sayılı Kanun'da düzenlenen sendikal güvenceler birlikte değerlendirildiğinde, iş sözleşmesinin deneme süreli olması tek başına işçinin sendikal koruma dışında bırakılmasını haklı kılan bir neden değildir. Bu bakımdan deneme süresi ile sendikal haklar arasında kurulacak hukuki dengede, deneme süresinin amacı korunurken sendikal hakların etkinliğini ortadan kaldıracak yorumlardan kaçınılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Akyiğit, E. (2024). Toplu iş hukuku (5. baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi.

Çelik, N., Caniklioğlu, N., Canbolat, T. ve Özkaraca, E. (2023). İş hukuku dersleri (36.baskı). İstanbul: Beta.

Kayar, İ. (2019). 6098 sayılı Türk Borçlar Kanunu'na göre borçlar hukuku: Genel hükümler-Özel borç ilişkileri (11. Bs.). Ankara: Seçkin Yayınevi.

Manav Özdemir, E. (2016). Türk hukukunda grevin iş sözleşmesine Etkisi. Ankara: Turhan Kitabevi.

Sümer, H.H. (2025). İş hukuku (28.baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi.

Süzek, S. (2019). İş hukuku (18.baskı). İstanbul: Beta.

Tunçomağ, K. ve Centel, T. (2022). İş hukukunun esasları (10. baskı). İstanbul: Beta.

A DIGITAL TWIN-BASED INTRUSION DETECTION SYSTEM FOR INDUSTRIAL IOT: AN AUTOENCODER AND DEEP NEURAL NETWORK FUSION APPROACH

Uras PANAHI
Artvin Çoruh University, Department of Computer Engineering, Artvin
ORCID ID: 0000-0001-8061-7235

ABSTRACT

The concept of digital twins (DTs) has started to become a vital paradigm for real-time monitoring, simulation and predictive maintenance of Industrial Internet of Things (IIoT) and industrial control systems (ICS). But with the growing connectivity of such environments has come the growing surface for attack, with critical infrastructure now facing increasingly sophisticated cyber threats that traditional intrusion detection systems (IDSs) can't catch, especially with zero-day attacks. This work introduces a Digital Twin-based Intrusion Detection System (DT-IDS) framework that incorporates an autoencoder anomaly detection module and a deep neural network (DNN) multiclass threat detection module in a single digital twin. The digital twin will be continually synchronized and provide a virtual copy of the actual IIoT network that allows for proactive behavioral analysis, predictive threat assessment, and automated response through a closed-loop feedback system. The framework was tested using the Edge-IIoTset benchmark, which is composed of 61 features and 15 attack classes that represent realistic IIoT traffic. Experimental results show that the DT-IDS obtains classification accuracy of 99.12%, precision of 99.01%, recall of 98.87%, F1 score of 98.94%, and a false alarm rate of only 0.42%, which is higher than the standalone DNN, autoencoder, random forest, and support vector machine baselines. The analysis of reconstruction error verified a distinction between normal traffic (0.018 mean error) and attack traffic (up to 1.342 mean error), and demonstrated the system's ability to recognize unknown attacks. The results suggest that the digital twin technology can be used in conjunction with deep learning to provide a powerful and scalable solution for protecting IoT environments.

Keywords: Digital twin, intrusion detection system, Industrial IoT, deep neural network, anomaly detection, cybersecurity

1. INTRODUCTION

Industrial Internet of Things (IIoT) and Industry 4.0 has revolutionized manufacturing, energy, critical infrastructure, and connected sensors, actuators, programmable logic controllers (PLCs), and edge gateways into large-scale cyber-physical systems (CPS). This connectivity helps to streamline operations and facilitate data-driven decision-making, but it also substantially increases the attack surface of adversaries (Pinto et al. 2023). Traditionally, perimeter defenses have provided the protection and isolation for traditional industrial control systems (ICS), but today, they are vulnerable to attacks leveraging standard IT protocols, legacy devices, and insecure communication channels (Al-Shamayleh et al. 2024). Traditional intrusion detection systems (IDSs) are mostly based on signature-based matching or supervised machine-learning classifiers based on known attack signatures. They are effective against known threats but cannot handle attacks from unknown distributions or zero days attacks that are not in the training distribution (Lim et al. 2023). This is not acceptable in safety-critical IoT areas where an unnoticed intrusion may result in physical damage or loss of production and the diversity of resource-constrained IIoT devices makes it even more challenging to deploy a computing-heavy security solution at the edge. Recently, Digital twins (DTs) have become a

promising technology to overcome these challenges. Digital twin is a dynamic virtual copy of a physical asset which can be updated in real time with bidirectional data transfer (Wang et al. 2023). Digital twins, which are first used in simulation, optimization and predictive maintenance and are now being used for industrial systems, are a growing topic to consider as a security enabler (Varghese et al. 2022). A digital twin can real-time compare the expected and observed state of the physical network, which can help identify abnormal behavior – a sign of an active intrusion. This is especially useful for the detection of new attacks with no existing signature (Mohsin et al. 2023). However, there is still some work to be done, as there are several open challenges. Security of the digital twin itself, the latency of the synchronization between physical and virtual layers and scalability of the detection models to large industrial networks are still topics of ongoing research (Suhail et al. 2023). Besides, most previously published digital twin security research addresses conceptual frameworks or scenarios with one attack and does not provide complete detection systems that are tested on real datasets and evaluated in the context of realistic scenarios (Balta et al. 2024).

To overcome these challenges, this paper introduces a Digital Twin-based Intrusion Detection System (DT-IDS), which combines an unsupervised anomaly detection approach based on a reconstruction-based autoencoder, with a supervised multiclass threat classification approach based on a deep neural network (DNN). The autoencoder learns a compact representation of normal IIoT traffic and the outlier detection uses the high reconstruction error to detect attacks that have not been seen before, while the DNN classifies known attacks and quickly and efficiently responds to them. The framework is tested on a comprehensive and realistic dataset of IoT and IIoT cyber-attacks, called Edge-IIoTset (Ferrag et al. 2022).

This work has several main contributions as follows:

(i) A Closed-loop, Real-time, IIoT security system with a unified Digital Twin architecture that integrates autoencoder anomaly detection with DNN threat classification.

(iii) A detailed experimental analysis with the Edge-IIoTset dataset, showing its superior performance compared to four baseline methods in terms of accuracy, precision, recall, F1-score, false alarm rate and ROC-AUC.

(iii) A reconstruction error analysis to ensure the system is able to distinguish between normal and malicious traffic and can be generalized to new attack patterns.

The rest of the article will proceed as follows. The materials and the methods are described in Section 2, such as architecture proposed, dataset and model design. The results of the experiments are presented and discussed in Section 3. This study is summarized and future research directions are suggested in Section 4.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Digital Twin-based IDS architecture

The proposed DT-IDS architecture is comprised of four layers: (1) the physical IIoT layer, which includes PLCs, sensors, actuators and edge gateways; (2) the digital twin layer, which keeps a continually synchronized virtual replica of the physical network; (3) the detection layer that includes an autoencoder anomaly module and a DNN threat classifier; and (4) the decision and response layer, which generates alerts, mitigates threats, and provides feedback to the digital twin. Digital twin reads real time telemetry data from physical layer, such as network flow data, protocol metadata, and device parameters. The data is first preprocessed, and simultaneously given to the autoencoder and the DNN. The autoencoder computes the reconstruction error for all inputs, and any inputs whose reconstruction error is larger than a pre-defined threshold are considered anomalous and a possible zero-day/unknown attack. At the same time, the DNN categorizes each sample into one of the known attack categories. The

outputs of both modules are combined in the decision layer where a confidence weighted rule is applied to decide if an alert is raised, a mitigation action is triggered or the digital twin's behavioral baseline is updated. The feedback loop enables the system to adapt to evolving threat landscapes over time.

2.2. Dataset

The Edge-IIoTset dataset (Ferrag et al. 2022) was used to evaluate the proposed framework. Edge-IIoTset is a unique and comprehensive cyber security dataset of centralized and federated learning for intrusion detection in IoT and IIoT applications developed using a realistic testbed that includes a seven-layer IIoT smart factory topology that covers a wide-range of cyber attacks, benign traffic and various protocols. It has 61 network and protocol features and 15 attack classes. Its main characteristics are summarized in Table 1.

Table 1. Summary of the Edge-IIoTset dataset characteristics.

Feature	Description
Total records	2,219,261
Number of features	61
Attack classes	15
Attack categories	DDoS/DoS, MITM, Injection, Scanning, Ransomware, Backdoor, Password, XSS, Uploading
Normal traffic share	21.3%
Protocol coverage	MQTT, Modbus, HTTP, TCP, UDP, ICMP, ARP
Data format	CSV (tabular)

2.3. Data preprocessing and feature engineering

The raw data of the network was cleaned of missing and duplicate data. All categorical features were one-hot encoded and numerical features were min-max scaled in the range [0, 1] for stable training of the neural model. A correlation-based feature selection step was used, 61 normalized features were selected by keeping the features with low mutual correlation and high relevance to the label. The dataset was split into 70 % training, 15 % validation and 15 % testing sets, while keeping class distribution, to guarantee the training was independent of the validation and testing sets.

2.4. Autoencoder anomaly module

The autoencoder is a symmetric neural network that is trained with only normal (benign) traffic. It maps the 61-dimensional input to a 16-dimensional latent representation, and reconstructs the original input from this representation using ReLU activations in the hidden layers, and a sigmoid output, trained using Adam and mean squared error (MSE) loss. The model is trained only using normal traffic; thus, it produces small reconstruction errors for benign traffic, and much larger reconstruction errors for anomalous or malicious traffic. For any sample, the error is compared to a threshold from a validation set that is designed to optimize the F1 score with the lowest number of false alarms. This unsupervised mechanism enables the DT-IDS to identify previously unknown and zero-day attacks which are not trained with labeled examples (Namoun et al. 2024).

2.5. DNN threat classifier

The DNN is a supervised multiclass classification model that predicts a class (normal or one of attacks) for each input sample. It consists of 3 fully connected hidden layers (128, 64, 32 neurons) with ReLU activations, batch normalization and dropout (0.3) to prevent overfitting, the output layer is a softmax, which produces class probability estimates. The model was trained using Adam with a learning rate of 0.001, using categorical cross-entropy as the loss function,

and early stopping based on the validation loss. The autoencoder identifies anomalous behavior, while the DNN does fine-graining of known threats to initiate specific response actions. The decision fusion layer merges both outputs: autoencoder-anomalous samples that are not confidently classified by the DNN are considered potential zero-day threats and are passed to the next processing stages for further analysis.

2.6. Evaluation metrics

Standard intrusion detection metrics were used to assess the performance of the proposed DT-IDS: accuracy, precision, recall, F1 score, false alarm rate (FAR), and area under the curve of the receiver operating characteristic (ROC-AUC). Accuracy is the overall percentage of the correctly classified samples. Precision is the percentage of true attacks detected by the system from all positive samples flagged by the system, and recall (detection rate) is the percentage of positive samples that are correctly identified by the system. F1 Score is the harmonic average of precision and recall. In operational IIoT environments, where too many false alarms may cause alert fatigue and disrupt operations, FAR is a significant measurement. The hyperparameters used in the two neural models are summarized in Table 2.

Table 2. Hyperparameter configuration of the autoencoder and DNN models.

Hyperparameter	Autoencoder	DNN classifier
Hidden layers	3 (64-16-64)	3 (128-64-32)
Latent dimension	16	-
Activation	ReLU / Sigmoid	ReLU / Softmax
Optimizer	Adam	Adam
Learning rate	0.001	0.001
Loss function	MSE	Categorical cross-entropy
Dropout rate	0.2	0.3
Batch size	256	128
Epochs	50 (early stopping)	50 (early stopping)

3. RESULTS AND DISCUSSION

The proposed DT-IDS was tested on the test subset of the Edge-IIoTset which was not used in training and compared with four baseline methods: a stand-alone DNN classifier, a stand-alone autoencoder for binary anomaly detection, a random forest (RF) classifier, and a support vector machine (SVM) with radial basis function kernel. To make a fair comparison, all baseline models were trained and evaluated using the same data splitting and data preprocessing pipeline.

3.1. Overall performance comparison

The overall performance of the methods evaluated are given in Table 3 and Fig. 1. The proposed DT-IDS gave the best results in every evaluation metric, having an accuracy of 99.12%, a precision of 99.01%, a recall of 98.87%, and an F1-score of 98.94%. Most importantly, the number of false alarms was decreased to 0.42%, which is a 63% relative improvement over the standalone DNN (1.15%) and a significant improvement over the autoencoder (2.31%) and SVM (2.85%) baselines. There is a high level of separability between normal traffic and malicious traffic (ROCAUC of 0.997). The enhanced measures are due to the complementary trait of the two detection modules; the autoencoder detects distributional anomalies which are not detected by supervised classifiers, and the DNN accurately categorizes known threats; the continuous synchronization of the digital twin allows real-time contextual analysis.

Table 3. Overall performance comparison of intrusion detection methods on the Edge-IIoTset test set.

Method	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)	FAR (%)	ROC-AUC
SVM	95.22	94.85	94.30	94.57	2.85	0.971
Random Forest	97.06	96.78	96.51	96.64	1.58	0.988
Autoencoder	96.15	95.80	95.42	95.61	2.31	0.978
DNN	97.83	97.45	97.21	97.33	1.15	0.994
Proposed DT-IDS	99.12	99.01	98.87	98.94	0.42	0.997

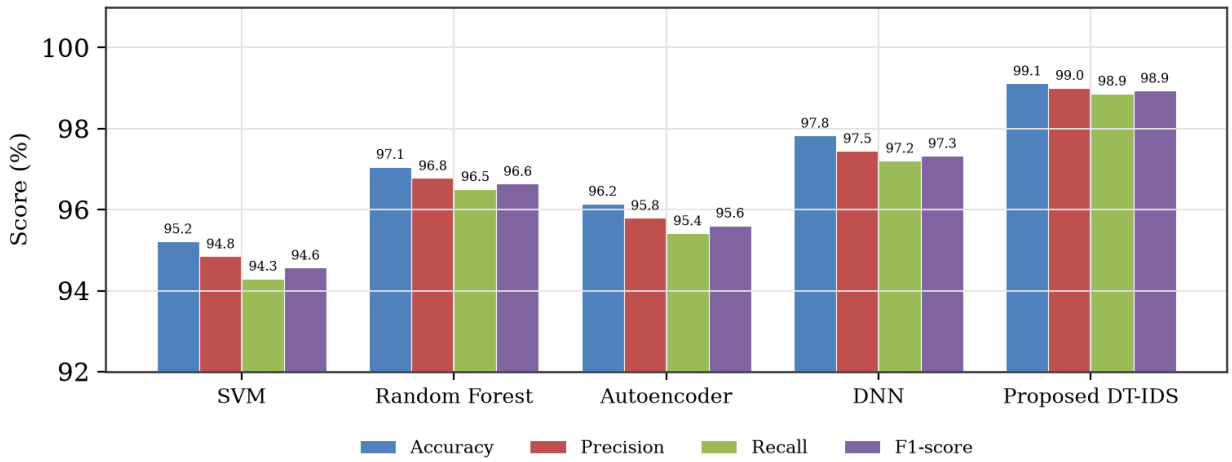


Fig. 1. Overall performance comparison of intrusion detection methods.

3.2. Per-class detection performance

The detection rates of the proposed DT-IDS per class are as shown in Table 4. System's detection rates were high in all attack categories, with the best performance seen in DDoS/DoS attack (99.7%) and scanning attack (99.3%) both of which have specific network flow patterns. Lower detection results were seen for injection-based attacks (SQL injection 98.5%, XSS 97.8%) and backdoor/password attacks (98.2%), attacks which are more low-volume and stealthy, and may look like regular traffic. These results illustrate the potential of using anomaly detection in combination with supervised classification for achieving good performance in heterogeneous attack types.

Table 4. Per-class detection performance of the proposed DT-IDS.

Traffic class	Detection rate (%)	False alarm rate (%)
Normal	99.40	0.42
DDoS/DoS	99.70	0.18
MITM (ARP spoofing)	98.90	0.55
SQL injection	98.50	0.71
XSS	97.80	0.83
Ransomware	99.10	0.39
Scanning/Reconnaissance	99.30	0.30
Backdoor/Password	98.20	0.77

3.3. Reconstruction-error analysis

One of the major benefits of the digital twin approach is that previously unseen attacks can be detected with reconstruction-error analysis. Normal traffic resulted in a mean reconstruction error of 0.018, significantly higher errors were recorded for DDoS/DoS attacks (1.342), and ransomware attacks (1.128) as shown in Fig. 2. This distinct difference between the error distributions shows that the autoencoder does learn the boundary of normal behavior and that attacks cause measurable distributional deviations. It is crucial for zero-day detection: even attacks that are not in the training set lead to higher reconstruction errors and issue an alert that the decision fusion layer can escalate for further investigation.

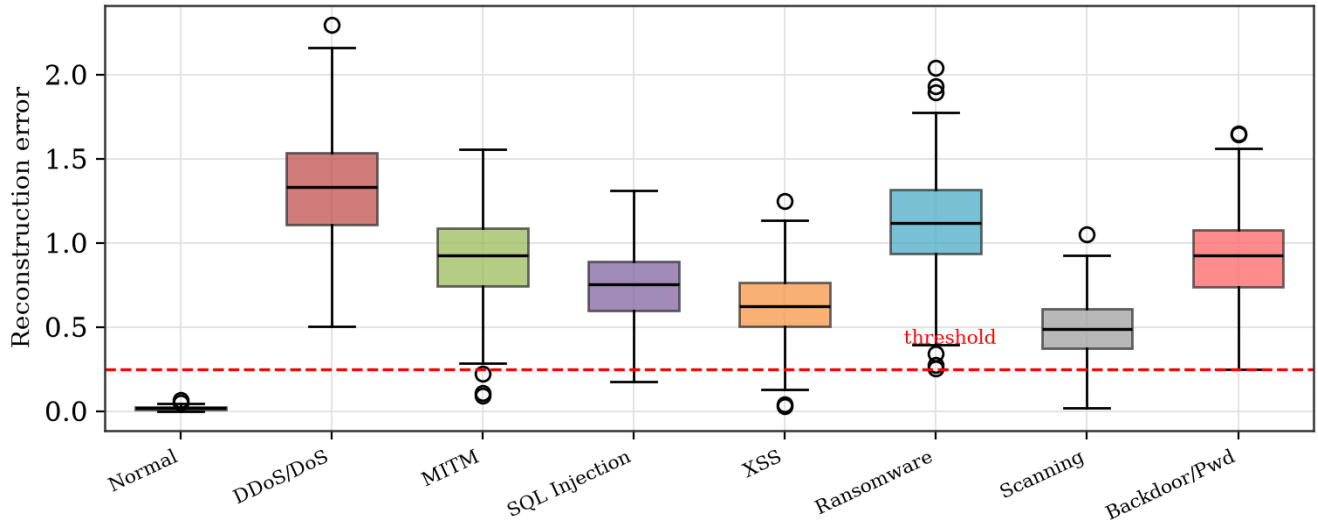


Fig. 2. Reconstruction-error distribution for normal and attack traffic.

3.4. ROC analysis

The receiver operating characteristic (ROC) curves of the evaluated methods are shown in Fig. 3. The proposed DT-IDS had the highest area under the curve (AUC = 0.997), which indicated good performance in achieving a better trade-off between the true positive rate and the false positive rate. The standalone classifiers were also effective at the known attack classes such as DNN (AUC = 0.994), RF (AUC = 0.988), AE (AUC = 0.978), and SVM (AUC = 0.971), with the latter two having the lowest separation rates in low-volume and stealthy attacks. In the operational environment, the ability to have a small, but consistent, reduction in false alarms is significant, as this will lead to operator workload reduction and a lesser risk of missing a real threat for the DT-IDS compared to a standalone DNN (Rahman 2025).

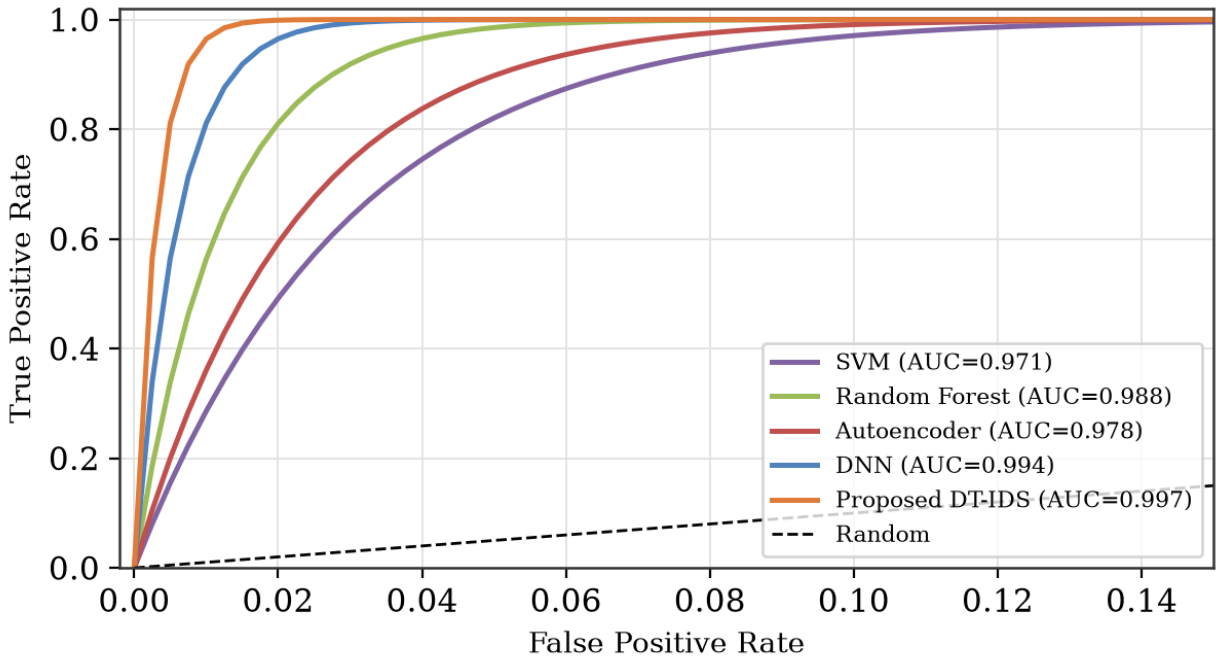


Fig. 3. ROC curves of the evaluated methods (zoomed view).

3.5. Computational cost and detection latency

Low latency inference is another key component of real-time IIoT security besides detection accuracy. The proposed DT-IDS method was able to infer the class with an average latency per sample of 2.1 ms, compared to 1.6 ms for the standalone DNN, 1.1 ms for the autoencoder, 0.4 ms the random forest and 0.9 ms for the SVM. The fused architecture has a slight overhead, but the overall latency is still below the typical 10ms needed for real-time IIoT intrusion detection schemes (Lim et al. 2023). The overhead of the digital twins grows with the size of the network, but can be distributed over time with small increments, making it appropriate for deployment on the edge, where resources are limited.

3.6. Discussion

The results of the experiments show that the use of digital twin technology in conjunction with deep learning provides a powerful and flexible intrusion detection system for IIoT applications. The biggest benefit of the digital twin is its ability to keep an accurate behavioral model of the physical network and act as a baseline when it comes to detecting anomalies and predicting threats. An advantage of the proposed DT-IDS over signature-based IDSs is the ability to detect deviation from normal behavior, such as zero-day attacks, which represents one of the biggest challenges of current IIoT security solutions (Pinto et al. 2023). The digital twin architecture that incorporates the autoencoder and DNN also eliminates the dilemma between detection coverage and classification accuracy. The autoencoder is very good at detecting the unusual behavior without considering the type of attack, and the DNN can give a detailed classification of the known attacks. The decision fusion layer merges these complementary capabilities, mitigating false negatives and false alarms and aligns with recent research confirming that hybrid/multi-model approaches are more effective than single-model IDSs for realistic IIoT datasets (Al-Shamayleh et al. 2024; Rahman 2025).

Although these early findings are encouraging, there are a number of caveats to note. This evaluation was performed in a benchmark dataset; in reality, deployments can have adverse

distribution shifts, encrypted traffic, and evasion techniques. The security of the digital twin must be guaranteed as well, since the compromised digital twin could be used to dismiss alert or add false behavioral profiles (Suhail et al. 2023). Investigating scalability of the synchronization mechanism to very large industrial networks is required. These challenges should be addressed in future work via federated digital twin architectures, adversarial robustness training and adopting a zero-trust approach to ensure defense-in-depth of critical infrastructure.

4. CONCLUSIONS

In this study, we proposed a Digital Twin-based Intrusion Detection System (DT-IDS) that integrates an autoencoder-based anomaly detection module and a deep neural network threat classifier within a unified digital twin architecture for securing Industrial IoT environments. The digital twin maintains a real-time virtual replica of the physical network, thereby enabling continuous behavioral analysis, proactive threat assessment, and closed-loop feedback for automated response. The framework was evaluated on the Edge-IIoTset benchmark, where it achieved an accuracy of 99.12%, an F1-score of 98.94%, a false alarm rate of 0.42%, and a ROC-AUC of 0.997, thereby outperforming the standalone DNN, autoencoder, random forest, and SVM baselines. The reconstruction-error analysis further revealed a clear separation between normal and malicious traffic, which enabled the system to flag previously unseen behavioral patterns and thus extend detection coverage to zero-day attacks. Taken together, these findings indicate that combining digital twin technology with deep learning provides an accurate, adaptive, and scalable solution for IIoT security, addressing several limitations of conventional intrusion detection systems. Future work will focus on validating the framework on live industrial testbeds and on strengthening it against adversarial and evasion techniques through federated digital twin architectures and adversarial robustness training.

References

[1] Al-Shamayleh AS, Qaddos A, Akhunzada A, et al. (2024). A novel intrusion detection framework for optimizing IoT security. Scientific Reports 14, 21509. doi:10.1038/s41598-024-72049-z

[2] Balta EC, Tilbury D, Moyne J, et al. (2024). Digital Twin-Based Cyber-Attack Detection Framework for Cyber-Physical Manufacturing Systems. IEEE Trans. Automation Science and Engineering 21, 3125-3140. doi:10.1109/TASE.2023.3243147

[3] Ferrag MA, Friha O, Hamouda D, Maglaras L, Janicke H. (2022). Edge-IIoTset: A New Comprehensive Realistic Cyber Security Dataset of IoT and IIoT Applications for Centralized and Federated Learning. IEEE Access 10, 40281-40306. doi:10.1109/ACCESS.2022.3165809

[4] Lim HS, Alaghbari K, Saad M, Yong YS. (2023). Deep Autoencoder-Based Integrated Model for Anomaly Detection and Efficient Feature Extraction in IoT Networks. IoT 4(3), 295-318. doi:10.3390/iot4030016

[5] Mohsin A, Janicke H, Nepal S, Holmes D. (2023). Digital Twins and the Future of their Use Enabling Shift Left and Shift Right Cybersecurity Operations. arXiv:2309.13612. doi:10.48550/arXiv.2309.13612

[6] Namoun A, Tufail A, De Silva LD, et al. (2024). An improved autoencoder-based approach for anomaly detection in industrial control systems. Systems Science & Control Engineering 12(1), 1-18. doi:10.1080/21642583.2024.2334303

[7] Pinto A, Gutierrez J, Herrera LC, Donoso Y. (2023). Survey on Intrusion Detection Systems Based on Machine Learning Techniques for the Protection of Critical Infrastructure. Sensors 23(5), 2415. doi:10.3390/s23052415

[8] Rahman S. (2025). A Multi-Model Digital Twin-Based Intrusion Detection System: Integrating Autoencoder, DNN, and Anomaly Detection. IJETT 73(11), 147-164. doi:10.14445/22315381/IJETT-V73I11P112

[9] Suhail S, Jurdak R, Hussain R. (2023). Security Attacks and Solutions for Digital Twins. Computers in Industry 143, 103961. doi:10.1016/j.compind.2023.103961

[10] Varghese SA, Ghadim AD, Balador A, et al. (2022). Digital Twin-based Intrusion Detection for Industrial Control Systems. Proc. IEEE PerCom Workshops, 444-449. doi:10.1109/PerComWorkshops53856.2022.9767492

[11] Wang Y, Su Z, Guo S, et al. (2023). A Survey on Digital Twins: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy. IEEE IoT Journal 10(5), 4665-4696. doi:10.1109/JIOT.2023.3263909

[12] Zohourian A, Dadkhah S, Neto EP, et al. (2023). CICIoT2023: A Real-Time Dataset and Benchmark for Large-Scale Attacks in IoT. Sensors 23(13), 5941. doi:10.3390/s23135941

TEKNOKENT FİRMALARINDA YARATICI VE YENİLİKÇİ İŞ DAVRANIŞLARININ YORDAYICILARI: ÖRGÜTSEL DİJİTAL DÖNÜŞÜME HAZIRLIK İLE GİRİŞİMCİ DAVRANIŞ

Dr. Öğr. Üyesi Ebru POLAT
Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Antakya, Hatay
ORCID ID: 0000-0002-2546-7040

ÖZET

Dijital dönüşümün hız kazandığı günümüz iş ortamında, teknoloji odaklı işletmelerin rekabet güçlerini sürdürebilmeleri, çalışanların girişimci, yaratıcı ve yenilikçi davranışlar sergilemeleriyle yakından ilişkilidir. Bu araştırmanın amacı, teknokent firmalarında çalışanların algıladıkları örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ile girişimci davranışlarının yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarıyla ilişkisini incelemektir. Nicel araştırma yöntemlerinden ilişkisel tarama modeline göre yürütülen araştırmanın çalışma grubunu teknokent firmalarında çalışan 189 kişi oluşturmaktadır. Verilerin toplanmasında Örgütsel Dijital Dönüşüme Hazırlık Ölçeği, Girişimci Davranış Ölçeği ile Yaratıcı ve Yenilikçi İş Davranışları Ölçeği kullanılmıştır. Verilerin çözümlenmesinde değişkenlerin dağılım özelliklerini belirlemek amacıyla betimsel istatistiklerden; değişkenler arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla korelasyon analizinden ve yordayıcı rolleri belirlemek amacıyla regresyon analizinden yararlanılmıştır. Katılımcıların %50.8'i erkek ve %65.1'i lisans mezunudur. Çarpıklık ve basıklık katsayıları incelendiğinde verilerin normallik açısından kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda araştırma değişkenlerinin tamamı orta düzeydedir. Bununla birlikte, algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranış ortalamalarının orta düzeyin üst sınırına yakın olduğu görülmüştür. Korelasyon analizi sonucunda algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık, girişimci davranış, yaratıcı iş davranışı ve yenilikçi iş davranışı değişkenleri arasında pozitif yönlü ve anlamlı ilişkiler bulunduğu belirlenmiştir. Regresyon analizi sonuçlarına göre algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranış, yenilikçi iş davranışındaki varyansın %41,8'ini açıklarken, aynı yordayıcılar yaratıcı iş davranışındaki varyansın %38,4'ünü açıklamıştır. Her iki regresyon modeli de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş; girişimci davranışın yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarını yordama gücünün, algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlığa göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bulgular, teknokent firmalarında yaratıcı ve yenilikçi çalışan davranışlarının anlaşılmasında örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ile bireysel girişimci davranışın birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Dijital dönüşüme hazırlık, girişimci davranış, yaratıcı iş davranışı, yenilikçi iş davranışı, teknokent firmaları.

PREDICTORS OF CREATIVE AND INNOVATIVE WORK BEHAVIORS IN TECHNOPARK FIRMS: ORGANIZATIONAL READINESS FOR DIGITAL TRANSFORMATION AND ENTREPRENEURIAL BEHAVIOR

ABSTRACT

In today's business environment, where digital transformation is accelerating, the ability of technology-oriented firms to sustain their competitiveness is closely associated with employees' entrepreneurial, creative, and innovative behaviors. This study aims to examine the relationships between employees' perceived organizational readiness for digital transformation, entrepreneurial behavior, and creative and innovative work behaviors in technopark firms. The

study was conducted using a correlational survey design, one of the quantitative research methods, and its study group consisted of 189 employees working in technopark firms. Data were collected using the Organizational Readiness for Digital Transformation Scale, Entrepreneurial Behavior Scale, and Creative and Innovative Work Behaviors Scale. Descriptive statistics were used to determine the distributional characteristics of the variables, correlation analysis was employed to examine the relationships among them, and regression analysis was conducted to assess their predictive roles. Of the participants, 50.8% were male and 65.1% held a bachelor's degree. Examination of the skewness and kurtosis coefficients indicated that the data were within acceptable limits in terms of normality. The analysis showed that all research variables were at moderate levels. However, the mean scores for perceived organizational readiness for digital transformation and entrepreneurial behavior were close to the upper boundary of the moderate range. The correlation analysis revealed positive and statistically significant relationships among perceived organizational readiness for digital transformation, entrepreneurial behavior, creative work behavior, and innovative work behavior. The regression results showed that perceived organizational readiness for digital transformation and entrepreneurial behavior explained 41.8% of the variance in innovative work behavior, while the same predictors explained 38.4% of the variance in creative work behavior. Both regression models were statistically significant, and entrepreneurial behavior demonstrated greater predictive power for creative and innovative work behaviors than perceived organizational readiness for digital transformation. The findings highlight the importance of considering organizational readiness for digital transformation and individual entrepreneurial behavior together when seeking to understand employees' creative and innovative behaviors in technopark firms.

Keywords: Readiness for digital transformation, entrepreneurial behavior, creative work behavior, innovative work behavior, technopark firms.

1. GİRİŞ

Bilgi yoğunluğu, teknolojik belirsizlik ve hızlı değişimle şekillenen günümüz iş dünyasında işletmelerin rekabet gücünü koruyabilmesi, yeni teknolojilerin sunduğu olanakları özgün fikirlere ve uygulanabilir yeniliklere dönüştürebilmesiyle yakından ilişkilidir (AlEssa & Durugbo, 2022; Umrani vd., 2025; Yazar & Öncül, 2026). Bu süreçte çalışanlar, örgütsel yenilik kapasitesinin temel aktörleri olarak öne çıkmaktadır (Umrani vd., 2025). Örgütlerin değişen çevre koşullarına uyum sağlamasında çalışanların iş süreçlerini sorgulamaları, sorunlara özgün çözümler geliştirmeleri, yeni yöntemler araştırmaları ve ürettikleri fikirlerin uygulanmasını desteklemeleri belirleyici rol oynamaktadır (Basadur vd., 2014; Salam & Senin, 2022). Bu nedenle yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları, işletmelerin sürdürülebilir rekabet üstünlüğü elde etmesini sağlayan stratejik çalışan davranışları arasında yer almaktadır (AlEssa & Durugbo, 2022; Huu, 2023). Çalışan yaratıcılığı, yeni ve yararlı fikirlerin üretilmesini ifade ederken yenilikçi iş davranışı, fikir üretmenin ötesine geçerek bu fikirlerin örgüt içinde desteklenmesini, geliştirilmesini ve uygulamaya dönüştürülmesini kapsayan çok aşamalı bir süreç olarak kabul edilmektedir (De Jong & Den Hartog, 2008; Umrani vd., 2025). Bu yönüyle yenilikçi iş davranışı, çalışanların bireysel yaratıcılıklarını somut örgütsel çıktılara dönüştürmelerini sağlayan temel davranışsal mekanizmalardan biridir. Yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarının birbirini tamamlayan bu niteliği, söz konusu davranışları örgütlerin değişen koşullara uyum sağlaması, değer yaratması ve rekabet gücünü koruması açısından kritik hâle getirmektedir (AlEssa & Durugbo, 2022; Umrani vd., 2025).

Yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarının ortaya çıkmasında çalışanların içinde bulundukları örgütsel koşullar belirleyici rol oynamaktadır (Kılıç, 2024; Volery & Tarabashkina, 2021). Bu

bağlamda örgütün teknolojik değişime yönelik hazırlık düzeyi, çalışanların yeni fikirler geliştirmelerini ve bu fikirleri uygulamaya dönüştürmelerini destekleyen önemli bir örgütsel unsur olarak değerlendirilebilir. Örgütsel dijital dönüşüme hazırlık; işletmenin dijital dönüşüme yönelik vizyonunu, yönetsel yetkinliklerini, dijital stratejisini, iletişim ve ekip çalışması süreçlerini, dijital güvenlik uygulamalarını ve dönüşüm sürecini izleme kapasitesini kapsayan bütüncül bir örgütsel yeterliliği ifade etmektedir (Michelotto & Joia, 2024; Öztırak, 2025). Dijital dönüşüme hazır olarak algılanan bir örgüt, çalışanlara yeni teknolojileri deneme, farklı bilgi kaynaklarına erişme ve iş süreçlerini yeniden tasarlama olanağı sağlayabilir (Trenerry vd., 2021). Böyle bir ortam, çalışanların mevcut uygulamaların ötesine geçerek yeni fikirler geliştirmelerini ve bu fikirleri hayata geçirmelerini kolaylaştırabilir.

Yaratıcılığın ve yenilikçiliğin davranışsal temellerinden biri de çalışanların girişimci davranışlarıdır. Girişimci davranış; fırsatları fark etme, inisiyatif kullanma, yeni beceriler edinme, belirsizlik karşısında hareket tarzını değiştirme, çözüm üretme ve çalışma arkadaşlarını yeni fikirler geliştirmeye teşvik etme gibi davranışları kapsamaktadır (Bird & Schjoedt, 2009; Jong vd., 2015). Dolayısıyla bu özelliklere sahip çalışanların rutin görevlerle sınırlı kalmayarak sorunları fırsata dönüştürmeleri, özgün fikirler üretmeleri ve yeniliklerin uygulanmasında etkin rol üstlenmeleri beklenmektedir.

Bu ilişkilerin incelenmesi, teknoloji geliştirme, yenilik üretme ve bilginin ticarileştirilmesi amacıyla faaliyet gösteren teknokent firmaları bakımından ayrı bir önem taşımaktadır (Altunoğlu & Gürel, 2015; Kılıç, 2024). Teknokentlerin yenilik odaklı yapısı nedeniyle, çalışanların fırsatları değerlendirmeleri, özgün çözümler üretmeleri ve bu çözümleri uygulanabilir çıktılara dönüştürmeleri beklenmektedir (Yazar & Öncül, 2026). Dolayısıyla teknokent çalışanları bağlamında, algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ile girişimci davranışın yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarını birlikte ne ölçüde açıkladığının ortaya konulması önemli görülmektedir. Bu doğrultuda araştırmanın amacı, teknokent firmalarında çalışanların algıladıkları örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ile sergiledikleri girişimci davranışların yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarını ne ölçüde yordadığını incelemektir.

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, teknokent firmalarında çalışanların algıladıkları örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve sergiledikleri girişimci davranışlar ile yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları arasındaki ilişkileri incelemek; örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ile girişimci davranışın yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarını yordama düzeyini belirlemektir. Bu amaç çerçevesinde aşağıda yer alan araştırma sorularına yanıt aranmıştır:

- Teknokent firmalarında çalışanların algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık, girişimci davranış, yaratıcı iş davranışı ve yenilikçi iş davranışı düzeyleri nasıldır?
- Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ile çalışanların yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları arasında anlamlı bir ilişki var mıdır?
- Çalışanların girişimci davranışları ile yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları arasında anlamlı bir ilişki var mıdır?
- Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranış, çalışanların yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarını anlamlı düzeyde yordamakta mıdır?

2. YÖNTEM

Bu bölümde araştırmanın modeli, çalışma grubu, veri toplama araçları ve veri analiz yöntemlerinden oluşan metodolojik çerçeve sunulmuştur.

2.1. Araştırmanın Modeli

Bu araştırma, nicel araştırma yaklaşımı çerçevesinde ilişkisel tarama modeline göre yürütülmüştür. İlişkisel tarama modeli, iki veya daha fazla değişken arasındaki birlikte

değişimin varlığını ve derecesini belirlemeyi amaçlamaktadır (Büyüköztürk, 2024; Creswell & Creswell, 2017).

2.2. Veri Toplama Araçları

Veri toplama aracı olarak Dijital Dönüşüme Hazırlık Ölçeği, Girişimci Davranış Ölçeği, Yaratıcı ve Yenilikçi İş Davranışları Ölçeği kullanılmıştır.

Dijital Dönüşüme Hazırlık Ölçeği: Çalışanların örgütlerini dijital dönüşüme hazır bulma düzeylerini belirlemek amacıyla Öztırak (2025) tarafından geliştirilen Dijital Dönüşüme Hazırlık Ölçeği kullanılmıştır. Ölçek, beşli Likert tipinde (1 = Hiç Katılmıyorum, 5 = Kesinlikle Katılıyorum) derecelendirilen toplam sekiz maddeden oluşmaktadır. Ölçek tek boyutlu bir yapıya sahip olup ters kodlanan madde içermemektedir. Ölçeğin geliştirme çalışmasında Cronbach Alpha iç tutarlılık katsayısı 0.95 olarak hesaplanmıştır. Bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen güvenirlik analizinde ise Cronbach Alpha katsayısı 0.97 olarak belirlenmiştir.

Girişimci Davranış Ölçeği: Çalışanların örgüt içindeki girişimci davranış düzeylerini belirlemek amacıyla Pearce vd. (1997) tarafından geliştirilen ve Akkoç vd. (2019) tarafından Türkçeye uyarlanan Girişimci Davranış Ölçeği kullanılmıştır. Ölçek, beşli Likert tipinde (1 = Hiç Katılmıyorum, 5 = Tamamen Katılıyorum) derecelendirilen toplam altı maddeden oluşmaktadır. Tek boyutlu bir yapıya sahip olan ölçeğin 3., 4. ve 6. maddeleri ters kodlanmaktadır. Türkçe uyarlama çalışmasında Cronbach Alpha iç tutarlılık katsayısı, yazılım sektörü çalışanlarından oluşan ilk örneklem için 0.97 ve lojistik sektörü çalışanlarından oluşan ikinci örneklem için 0.92 olarak rapor edilmiştir. Bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen güvenirlik analizinde ise Cronbach Alpha katsayısı 0.96 olarak hesaplanmıştır.

Yaratıcı ve Yenilikçi İş Davranışları Ölçeği: Çalışanların yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarını belirlemek amacıyla De Jong ve Den Hartog (2010) tarafından geliştirilen ve Vural Özkan (2023) tarafından Türkçeye uyarlanan Yenilikçi İş Davranışları Ölçeği kullanılmıştır. Ölçek, beşli Likert tipinde (1 = Hiçbir Zaman, 5 = Her Zaman) derecelendirilen toplam dokuz maddeden oluşmaktadır. İki boyutlu bir yapıya sahip olan ölçekte yaratıcı iş davranışı dört, yenilikçi iş davranışı ise beş maddeyle ölçülmektedir. Ölçekte ters kodlanan madde bulunmamaktadır. Türkçe uyarlama çalışmasında Cronbach Alpha iç tutarlılık katsayısı ölçeğin bütünü için 0.91, yaratıcı iş davranışı boyutu için 0.85 ve yenilikçi iş davranışı boyutu için 0.88 olarak rapor edilmiştir. Bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen güvenirlik analizinde Cronbach Alpha katsayısı yaratıcı iş davranışı boyutu 0.94, yenilikçi iş davranışı boyutu için 0.96 ve ölçeğin bütünü için 0.97 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen bulgular, araştırmada kullanılan ölçeklerin mevcut örneklem açısından yüksek düzeyde güvenirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

2.3. Örneklem

Bu araştırmanın çalışma grubunu, Türkiye'nin güneyinde bulunan bir teknokentte faaliyet gösteren firmalarda çalışan 189 kişi oluşturmaktadır. Katılımcılar, ulaşılabilirlik ve gönüllülük ölçütleri doğrultusunda uygun örnekleme yöntemiyle belirlenmiştir. Uygun örnekleme, araştırmacının erişebildiği ve araştırmaya gönüllü olarak katılmayı kabul eden bireylerden veri toplanmasına imkân sağlayan, zaman ve maliyet açısından elverişli bir örnekleme yaklaşımıdır (Büyüköztürk vd., 2012). Araştırma verileri çevrimiçi ve basılı anket formları aracılığıyla toplanmış ve analizler 189 katılımcıdan elde edilen veriler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Katılımcıların demografik özellikleri

Demografik Değişkenler	Gruplar	Sayı (n)	Yüzde %
Cinsiyet	Kadın	93	49.2
	Erkek	96	50.8
Yaş	19–24 yaş	73	38.6
	25–29 yaş	58	30.7

	30 yaş ve üzeri	58	30.7
Eğitim Durumu	Önlisans	50	26.5
	Lisans	123	65.1
	Lisansüstü	16	8.5
Toplam		189	100.0

Tablo 1 incelendiğinde katılımcıların %49.2'sinin kadın (n = 93), %50.8'inin ise erkek (n = 96) olduğu ve çalışma grubunun cinsiyet bakımından dengeli bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Yaş dağılımı incelendiğinde katılımcıların %38.6'sının 19–24 yaş (n = 73), %30.7'sinin 25–29 yaş (n = 58) ve %30.7'sinin 30 yaş ve üzeri (n = 58) grubunda yer aldığı görülmektedir. Eğitim durumu bakımından katılımcıların %26.5'i önlisans (n = 50), %65.1'i lisans (n = 123) ve %8.5'i lisansüstü mezunudur (n = 16).

2.4. Veri Analizi

Analizlere başlamadan önce veri setinin doğruluğu ve analize uygunluğu kontrol edilmiş; kayıp değerler ile tek ve çok değişkenli aykırı gözlemler incelenmiştir. Yapılan ön incelemelerde, analiz sonuçlarını anlamlı biçimde etkileyebilecek düzeyde kayıp veriye veya aykırı gözleme rastlanmamıştır. Değişkenlerin normal dağılım varsayımını karşılayıp karşılamadığını belirlemek amacıyla çarpıklık ve basıklık katsayıları değerlendirilmiştir. Elde edilen katsayıların ±1.5 sınırları içinde kalması, verilerin normal dağılımdan önemli ölçüde sapmadığını göstermiştir (Tabachnick & Fidell, 1996). Katılımcıların demografik özelliklerinin ortaya konulmasında frekans ve yüzde dağılımlarından; araştırma değişkenlerinin düzeylerinin belirlenmesinde ise aritmetik ortalama ve standart sapma değerlerinden yararlanılmıştır. Ölçeklerden elde edilen ortalama puanların yorumlanmasında eşit aralıklı sınıflandırma yaklaşımı benimsenmiş ve sınıf aralıkları "dizi genişliği/grup sayısı" formülü kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre 1,00–2,33 arasındaki puanlar düşük, 2,34–3,66 arasındaki puanlar orta ve 3,67–5,00 arasındaki puanlar yüksek düzey olarak değerlendirilmiştir.

Araştırma değişkenleri arasındaki ilişkilerin yönünü ve gücünü belirlemek amacıyla korelasyon analizi uygulanmıştır. Korelasyon katsayılarının yorumlanmasında .00–.30 arasındaki değerler düşük, .30–.70 arasındaki değerler orta ve .70–1.00 arasındaki değerler yüksek düzeyde ilişki olarak kabul edilmiştir (Büyüköztürk, 2024). Regresyon analizinden önce bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı bulunup bulunmadığı incelenmiştir. Bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayılarının .85'in altında kalması, çoklu doğrusal bağlantı sorununun bulunmadığına ilişkin bir ön gösterge olarak değerlendirilmiştir (Çokluk vd., 2010).

Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarını yordama düzeyini belirlemek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir (Chatterjee & Hadi, 2015). İstatistiksel analizlerde anlamlılık düzeyi .05 olarak kabul edilmiştir.

3. BULGULAR

Bu bölümde, araştırma kapsamında toplanan verilerin analizinden elde edilen bulgular sistematik bir biçimde sunulmuştur. Öncelikle verilerin normal dağılıma ne ölçüde yaklaştığını incelemek amacıyla çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) katsayıları dikkate alınmıştır. Katılımcıların araştırma değişkenlerine ilişkin algı düzeylerini ortaya koymak ve verilerin dağılım özelliklerini değerlendirmek amacıyla ise betimsel istatistikler gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda her bir değişken için aritmetik ortalama ($\bar{X}$) ve standart sapma (Ss) değerleri hesaplanmıştır. Araştırma değişkenlerine ilişkin hesaplanan betimsel istatistikler ve dağılım göstergeleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2: Araştırma değişkenlerine ilişkin betimsel istatistikler ve normallik değerleri

Değişken	N	M	SS	Çarpıklık (Skewness)	Basıklık (Kurtosis)
Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık	189	3.63	1.18	−0.80	−0.51
Girişimci davranış		3.58	1.13	−0.55	−0.68
Yenilikçi iş davranışı		3.26	1.14	0.00	−1.32
Yaratıcı iş davranışı		3.22	1.21	0.08	−1.45
Genel yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları		3.24	1.15	0.03	−1.37

Tablo 2 incelendiğinde, çarpıklık katsayılarının −0.80 ile 0.08, basıklık katsayılarının ise −1.45 ile −0.51 arasında değiştiği belirlenmiştir. Tüm değişkenlere ait çarpıklık ve basıklık katsayılarının ±1.50 sınırları içerisinde kalması, verilerin normal dağılımdan ciddi bir sapma göstermediğini ve parametrik analizlerin uygulanması açısından normallik varsayımının karşılandığını ortaya koymaktadır. Aritmetik ortalama değerleri incelendiğinde katılımcıların en yüksek ortalamaya algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık değişkeninde sahip olduğu görülmektedir (M = 3.63, SS = 1.18). Bu değişkeni sırasıyla girişimci davranış (M = 3.58, SS = 1.13), yenilikçi iş davranışı (M = 3.26, SS = 1.14) ve yaratıcı iş davranışı (M = 3.22, SS = 1.21) izlemektedir. Yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları genel puanının ise 3.24 (SS = 1.15) olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, katılımcıların araştırma değişkenlerine ilişkin algılarının genel olarak orta düzeyde olduğunu göstermektedir.

Araştırma kapsamında ele alınan değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkilerini incelemek amacıyla korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Değişkenler arasındaki ilişkilerin yönünü ve gücünü gösteren korelasyon analizi bulguları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Araştırma değişkenleri arasındaki korelasyon katsayıları

Değişkenler	1	2	3	4	5
1. Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık	1				
2. Girişimci davranış	.573**	1			
3. Yenilikçi iş davranışı	.489**	.627**	1		
4. Yaratıcı iş davranışı	.456**	.605**	.931**	1	
5. Genel yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları	.482**	.628**	.985**	.979**	1

** p < .01

Tablo 3 incelendiğinde, araştırma değişkenleri arasında pozitif yönlü ve anlamlı ilişkiler bulunduğu görülmektedir (p < .01). Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık; girişimci davranış (r = .573), yenilikçi iş davranışı (r = .489), yaratıcı iş davranışı (r = .456) ve genel yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları (r = .482) ile pozitif yönlü ve orta düzeyde ilişkilidir. Girişimci davranışın yenilikçi iş davranışı (r = .627), yaratıcı iş davranışı (r = .605) ve genel yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları (r = .628) ile pozitif yönlü ve orta düzeyde anlamlı ilişkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Genel olarak bulgular, algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık

ve girişimci davranışın, çalışanların yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarıyla pozitif yönde ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Araştırmada algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın, çalışanların yenilikçi ve yaratıcı iş davranışlarını yordama düzeylerini belirlemek amacıyla ayrı ayrı çoklu doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Yenilikçi iş davranışının bağımlı değişken olarak ele alındığı analizden elde edilen bulgular Tablo 4'te, yaratıcı iş davranışının bağımlı değişken olarak ele alındığı analiz sonuçları ise Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 4. Örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın yenilikçi iş davranışını yordamasına ilişkin bulgular

Yordayıcı değişkenler	R	R^2	B	Standart hata	β	t	p
Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık	.647	.418	.187	.066	.193	2.830	0.005
Girişimci davranış			.523	.069	.516	7.559	< .001

Not. Bağımlı değişken: Yenilikçi iş davranışı.

Tablo 4 incelendiğinde, algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın yenilikçi iş davranışını yordamasına yönelik kurulan regresyon modelinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir, $F(2, 186) = 66.810$, $p < .001$. Yordayıcı değişkenler, yenilikçi iş davranışındaki toplam varyansın %41.8'ini açıklamaktadır. Diğer değişkenin etkisi kontrol altında tutulduğunda hem algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlığın ($B = .187$, $\beta = .193$, $t = 2.830$, $p = 0.005$) hem de girişimci davranışın ($B = .523$, $\beta = .516$, $t = 7.559$, $p < .001$) yenilikçi iş davranışını pozitif yönde ve anlamlı biçimde yordadığı belirlenmiştir. Standartlaştırılmış regresyon katsayıları karşılaştırıldığında, girişimci davranışın yenilikçi iş davranışının açıklanmasına daha güçlü bir katkı sunduğu görülmektedir.

Tablo 5. Örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın yaratıcı iş davranışını yordamasına ilişkin bulgular

Yordayıcı değişkenler	R	R^2	B	Standart hata	β	t	p
Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık	.619	.384	.166	.072	.163	2.316	0.022
Girişimci davranış			.548	.075	.511	7.277	< .001

Not. Bağımlı değişken: Yaratıcı iş davranışı

Tablo 5'te yer alan bulgulara göre, algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın yaratıcı iş davranışını yordamasına yönelik kurulan regresyon modeli istatistiksel olarak anlamlıdır, $F(2, 186) = 57.854$, $p < .001$. Modelde yer alan yordayıcı değişkenler, yaratıcı iş davranışındaki toplam varyansın %38.4'ünü açıklamaktadır. Diğer değişkenin etkisi kontrol altında tutulduğunda algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlığın ($B = .166$, $\beta = .163$, $t = 2.316$, $p = 0.022$) ve girişimci davranışın ($B = .548$, $\beta = .511$, $t = 7.277$, $p < .001$) yaratıcı iş davranışını pozitif yönde ve anlamlı biçimde yordadığı görülmektedir. Standartlaştırılmış regresyon katsayıları, yaratıcı iş davranışının yordanmasında girişimci davranışın algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlığa kıyasla daha güçlü bir yordayıcı olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu araştırmada, teknokent firmalarında çalışanların algıladıkları örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve sergiledikleri girişimci davranışlar ile yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları arasındaki ilişkiler incelenmiş; örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarını yordama düzeyi belirlenmiştir.

Bulgular, çalışanların örgütsel dijital dönüşüme hazırlık, girişimci davranış, yaratıcı iş davranışı ve yenilikçi iş davranışı düzeylerinin genel olarak orta düzeyde olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte katılımcıların en yüksek ortalamaya algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık değişkeninde sahip olduğu belirlenmiştir. Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ortalamasının yüksek düzey sınırına oldukça yakın olması, teknokent çalışanlarının firmalarını dijital dönüşüm için gerekli örgütsel koşullara belirli ölçüde sahip olarak değerlendirdiklerini ve bu değerlendirmenin teknokentlerin teknoloji geliştirme, yenilik üretme ve bilgiyi ticarileştirme işlevleriyle ilişkili olabileceğini düşündürmektedir (Yazar & Öncül, 2026). Bununla birlikte, hazırlık algısının yüksek düzeye ulaşmamış olması nedeniyle firmaların dijital dönüşüm vizyonu, yönetsel yetkinlik, dijital strateji, örgüt içi iletişim, ekip çalışması, dijital güvenlik ve dönüşüm sürecinin izlenmesi gibi alanlarda gelişime ihtiyaç duyduğu söylenebilir (Michelotto & Joia, 2024; Öztırak, 2025).

Katılımcıların girişimci davranışlarının orta düzeyde bulunması, fırsatları fark etme, inisiyatif kullanma, yeni beceriler edinme, değişen koşullara uyum sağlama ve yeni çözümler geliştirme eğilimlerinin belirli ölçüde mevcut olduğunu düşündürmektedir (Bird & Schjoedt, 2009).

Bulgular katılımcıların yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarının orta düzeyde olduğunu göstermektedir. Çalışan yaratıcılığı, yeni ve yararlı fikirlerin üretilmesini ifade ederken yenilikçi iş davranışı bu fikirlerin desteklenmesi, geliştirilmesi ve uygulanmasını kapsamaktadır (De Jong & Den Hartog, 2008; Umrani vd., 2025). Dolayısıyla yaratıcı ve yenilikçi davranışların orta düzeyde olması nedeniyle, çalışanların yeni fikirler ortaya koyduklarını ancak bu davranışların teknokent firmalarında beklenebilecek güçlü bir yenilik kapasitesine tam olarak dönüşmediği söylenebilir.

Korelasyon analizi sonucunda algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ile girişimci davranış arasında pozitif yönlü ve orta düzeyde bir ilişki bulunmuştur. Bu sonuç, çalışanların örgütlerini dijital dönüşüme daha hazır algılamaları ile örgüt içinde daha fazla girişimci davranış sergilemeleri arasında anlamlı bir birlikte değişim bulunduğunu göstermektedir. Dijital dönüşüme hazır örgütlerin çalışanlara yeni teknolojileri deneme, farklı bilgi kaynaklarından yararlanma ve iş süreçlerini yeniden tasarlama olanağı sunabilmesi (Trenerry vd., 2021), çalışanların fırsatları fark etmesini ve inisiyatif almasını kolaylaştırabilir. Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlığın yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarıyla pozitif yönlü ve orta düzeyde ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, örgütlerini dijital dönüşüme daha hazır olarak değerlendiren çalışanların daha fazla yaratıcı ve yenilikçi davranış sileme eğiliminde olduklarını ortaya koymaktadır. Dijital dönüşüm, çalışanlara bilgiye erişim, iletişim, iş birliği, problem çözme ve süreçlerin yeniden tasarlanması bakımından yeni olanaklar oluşturmaktadır (Cetindamar Kozanoglu & Abedin, 2021). Bu olanaklar, çalışanların mevcut uygulamaları sorgulamalarına, alternatif çözümler geliştirmelerine ve ürettikleri fikirleri uygulamaya dönüştürmelerine uygun bir zemin hazırlayabilir. Dolayısıyla araştırma bulgusu, çalışanların yaratıcı ve yenilikçi davranışlarının bireysel özelliklerden bağımsız biçimde ele alınamayacağını; bu davranışların ortaya çıkmasında örgütün teknolojik ve yönetsel hazırlığının da önemli olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, yaratıcı ve yenilikçi davranışların örgütsel koşullardan etkilendiğini ileri süren değerlendirmelerle uyumludur (Kılıç, 2024; Volery & Tarabashkina, 2021).

Girişimci davranış ile yaratıcı ve yenilikçi iş davranışları arasında belirlenen pozitif yönlü ilişkiler, araştırmanın bir diğer önemli bulgusudur. Girişimci davranış; fırsatları fark etme, inisiyatif kullanma, değişen koşullar karşısında yeni hareket biçimleri geliştirme, sorunlara çözüm üretme ve diğer çalışanları yeni fikirler geliştirmeye yönlendirme gibi davranışları içermektedir (Bird & Schjoedt, 2009; Jong vd., 2015). Bu davranışların yeni fikirlerin üretilmesini ve bu fikirlerin uygulanması için gerekli girişimlerin başlatılmasını desteklemesi

beklenmektedir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlara göre girişimci davranışın yaratıcılık ile uygulamaya dönük yenilikçilik arasında işlevsel bir bağlantı oluşturabileceği söylenebilir.

Çoklu regresyon analizi sonucunda algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın birlikte yenilikçi iş davranışındaki varyansın %41.8'ini açıkladığı belirlenmiştir. Modelin açıklama gücü, çalışanların yenilikçi iş davranışlarının anlaşılmasında bu iki değişkenin önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Diğer yordayıcı değişken kontrol edildiğinde algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık yenilikçi iş davranışını pozitif ve anlamlı biçimde yordamaktadır. Buna göre dijital dönüşüm için gerekli vizyon, strateji, teknolojik altyapı, yönetsel destek, iletişim ve izleme mekanizmalarının varlığına yönelik olumlu çalışan algısı, yenilikçi davranışların sergilenmesini destekleyen bir örgütsel zemin oluşturmaktadır. Bununla birlikte girişimci davranışın standartlaştırılmış regresyon katsayısı daha yüksektir. Bu sonuç, yenilikçi iş davranışının açıklanmasında örgütsel hazırlığın önemli olmakla birlikte, çalışanın fırsatları değerlendirme ve inisiyatif alma yönündeki davranışsal eğiliminin daha belirleyici olduğunu göstermektedir.

Algılanan örgütsel dijital dönüşüme hazırlık ve girişimci davranışın yaratıcı iş davranışındaki varyansın %38.4'ünü açıkladığı görülmüştür. Her iki değişken de yaratıcı iş davranışını pozitif ve anlamlı biçimde yordamaktadır. Bu sonuç, çalışanların yeni ve yararlı fikirler üretmesinin hem içinde bulundukları örgütün dijital dönüşüme hazırlık düzeyiyle hem de kendi girişimci davranışlarıyla bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır. Burada da girişimci davranışın göreli katkısının daha yüksek olması, yaratıcılığın yalnızca elverişli örgütsel koşulların bulunmasıyla kendiliğinden ortaya çıkmadığını göstermektedir. Örgütsel olanakların yaratıcı çıktılara dönüşebilmesi için çalışanların bu olanakları fark etmesi, inisiyatif kullanması, sorunların çözümüne etkin biçimde katılması ve düşüncelerini davranışa dönüştürmesi gerekmektedir. Başka bir ifadeyle, dijital dönüşüme hazırlık yaratıcı ve yenilikçi davranışları kolaylaştıran örgütsel bir bağlam sunarken girişimci davranış, bu bağlamın çalışan davranışlarına yansımasını sağlayan daha yakın bir davranışsal unsur olarak değerlendirilebilir.

Araştırma sonuçları doğrultusunda teknokent firmalarına yönelik çeşitli öneriler geliştirilebilir. Öncelikle dijital dönüşüm, sadece teknolojik yatırımlarla sınırlı tutulmamalı; açık bir vizyon doğrultusunda çalışanların günlük görevleriyle ilişkilendirilmelidir. Çalışanların dijital uygulamaların seçimi ve değerlendirilmesine katılımı ile düzenli geribildirimleri, dönüşüm sürecinin ihtiyaçlarla uyumlu yürütülmesine katkı sağlayabilir. İkinci olarak, çalışanların girişimci davranışlarını desteklemek amacıyla özerklik, zaman, bütçe, teknik destek ve şeffaf öneri sistemleri sağlanmalıdır. Yönetici desteğine, psikolojik güvene ve yapıcı geribildirime dayalı, öğrenme sağlayan başarısızlıkları cezalandırmayan bir çalışma ortamı, çalışanların yenilik üretme ve risk alma eğilimlerini güçlendirebilir. Üçüncü olarak, yaratıcılık ve yenilikçilik birbirini tamamlayan süreçler olarak ele alınmalı; eğitimler ve disiplinler arası çalışmalarla üretilen fikirlerin prototip, pilot uygulama, mentorluk ve hızlı değerlendirme mekanizmalarıyla yenilikçi çıktılara dönüştürülmesi desteklenmelidir. Teknokent yönetimleri de firmalar arası bilgi paylaşımı, deneyim aktarımı ve ortak proje geliştirmeyi kolaylaştıran platformlar oluşturabilir.

Her çalışmada olduğu gibi bu araştırmanın da bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Çalışmanın yalnızca Türkiye'nin güneyinde bulunan bir teknokentte faaliyet gösteren firmaların çalışanlarıyla gerçekleştirilmesi, bulguların farklı teknokentlere ve sektörlere genellenmesini sınırlandırmaktadır. Katılımcıların uygun örnekleme yöntemiyle belirlenmiş olması da örneklemin temsil gücü bakımından dikkate alınmalıdır. Verilerin öz bildirime dayalı ölçeklerle ve aynı zaman diliminde toplanması, ortak yöntem yanlılığı olasılığını gündeme getirmektedir. Ayrıca ilişkisel ve kesitsel araştırma deseni, değişkenler arasında nedensel sonuçlar

çıkarılmasına izin vermemektedir. Regresyon analizinde kullanılan yordama ifadesi istatistiksel açıklamayı belirtmekte olup doğrudan nedensel etki şeklinde yorumlanmamalıdır.

Gelecekte yapılacak araştırmalarda farklı teknokentlerden, teknoloji firmalarından ve sektörlerden daha geniş örneklemlere ulaşılması önerilmektedir. Boylamsal çalışmalar yoluyla örgütsel dijital dönüşüme hazırlık, girişimci davranış ve yaratıcı-yenilikçi iş davranışlarındaki değişimler zaman içerisinde incelenebilir. Yönetici değerlendirmeleri, proje kayıtları, çalışan önerilerinin sayısı, geliştirilen prototipler ve uygulamaya geçirilen yenilikler gibi farklı veri kaynaklarının kullanılması, öz bildirim verilerinin sınırlılıklarını azaltabilir. Ayrıca örgütsel dijital dönüşüme hazırlığın yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarına hangi mekanizmalar aracılığıyla yansıdığını açıklamak üzere girişimci davranışın aracılık rolü incelenebilir.

KAYNAKÇA

Akkoç, İ., Çalışkan, A., & Turunç, Ö. (2019). Girişimci davranış: Bir ölçek uyarlama çalışması. *Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi*, *14*(1), 1-10. https://doi.org/10.29131/uiibd.562196

AlEssa, H. S., & Durugbo, C. M. (2022). Systematic review of innovative work behavior concepts and contributions. *Management Review Quarterly*, *72*(4), 1171-1208. https://doi.org/10.1007/s11301-021-00224-x

Altunoğlu, A. E., & Gürel, E. B. B. (2015). Effects of leader–member exchange and perceived organizational support on organizational innovation: The case of Denizli Technopark. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *207*, 175-181. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.10.170

Basadur, M., Gelade, G., & Basadur, T. (2014). Creative problem-solving process styles, cognitive work demands, and organizational adaptability. *The journal of applied behavioral science*, *50*(1), 80-115. https://doi.org/10.1177/0021886313508433

Bird, B., & Schjoedt, L. (2009). Entrepreneurial behavior: Its nature, scope, recent research, and agenda for future research. *Understanding the entrepreneurial mind: Opening the black box*, 327-358. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0443-0_15

Büyüköztürk, Ş. (2024). *Sosyal Bilimler İçin Veri Analizi El Kitabı* (38. baskı). Ankara: Pegem Akademi.

Büyüköztürk, Ş., Akgün, Ö. E., Demirel, F., Karadeniz, Ş., & Çakmak, E. K. (2012). Bilimsel araştırma yöntemleri. Ankara: Pegem Akademi.

Cetindamar Kozanoglu, D., & Abedin, B. (2021). Understanding the role of employees in digital transformation: conceptualization of digital literacy of employees as a multi-dimensional organizational affordance. *Journal of enterprise information management*, *34*(6), 1649-1672. https://doi.org/10.1108/JEIM-01-2020-0010

Chatterjee, S., & Hadi, A. S. (2015). *Regression analysis by example*. John Wiley & Sons.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage publications.

Çokluk, Ö., Şekercioğlu, G. ve Büyüköztürk, Ş. (2010). *Sosyal bilimler için çok değişkenli istatistik: SPSS ve LISREL uygulamaları.* Pegem Akademi.

De Jong, J. P., & Den Hartog, D. N. (2008). Innovative work behavior: Measurement and validation. *EIM Business and Policy Research*, *8*(1), 1-27.

De Jong, J., & Den Hartog, D. (2010). Measuring innovative work behaviour. *Creativity and innovation management*, *19*(1), 23-36.

Huu, P. T. (2023). Impact of employee digital competence on the relationship between digital autonomy and innovative work behavior: a systematic review: PT Huu. *Artificial Intelligence Review*, *56*(12), 14193-14222. https://doi.org/10.1007/s10462-023-10492-6

Jong, J. P. D., Parker, S. K., Wennekers, S., & Wu, C. H. (2015). Entrepreneurial behavior in organizations: does job design matter?. *Entrepreneurship theory and practice*, *39*(4), 981-995. https://doi.org/10.1111/etap.12084

Kılıç, A. (2024). The Effect Of Innovative Work Behaviour On Organisational Creativity: A Case Of Technopark Employees. *Eurasian Academy of Sciences Social Sciences Journal*, (57), 81-94.

Michelotto, F., & Joia, L. A. (2024). Organizational digital transformation readiness: An exploratory investigation. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, *19*(4), 3283-3304. https://doi.org/10.3390/jtaer19040159

Öztırak, M. (2025). Dijital dönüşüme hazırlık ölçeğinin geliştirilmesi. *Scientific Journal of Space Management and Space Economy*, *5*(1).

Salam, S., & Senin, A. A. (2022). A bibliometric study on innovative behavior literature (1961–2019). *Sage Open*, *12*(3), 21582440221109589. https://doi.org/10.1177/21582440221109589

Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (1996). *Using multivariate statistics* (3rd ed.). HarperCollins College Publishers.

Trenerry, B., Chng, S., Wang, Y., Suhaila, Z. S., Lim, S. S., Lu, H. Y., & Oh, P. H. (2021). Preparing workplaces for digital transformation: An integrative review and framework of multi-level factors. *Frontiers in psychology*, *12*, 620766. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.620766

Umrani, W. A., Rafique, N., Kundi, Y., Ahmed, U., & Abi Abdallah, R. (2025). Impact of authentic leadership on employees' creative work behavior: a mediated moderated model. *Journal of Management Development*, *44*(2), 138-153. https://doi.org/10.1108/JMD-09-2024-0293

Volery, T., & Tarabashkina, L. (2021). The impact of organisational support, employee creativity and work centrality on innovative work behaviour. *Journal of Business Research*, *129*, 295-303. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.02.049

Vural Özkan, G. (2015). Yaratıcı ve yenilikçi iş davranışlarının ölçümü: Yenilikçi iş davranışları ölçeği'nin Türkçe'ye uyarlama çalışması. *İş'te Davranış Dergisi*, *8*(2), 121-137. https://doi.org/10.25203/idd.1370523

Yazar, F. F., & Öncül, M. S. (2026). The Impact of Organizational Culture on Innovative Work Behaviors: A Study on Technopark Enterprises in the TR83 Region. *Journal of Business Administration and Social Studies*, *10*(1), 1-11. https://doi.org/10.5152/JBASS.2026.26002

ACİL SERVİSLERDE KAÇIRILMIŞ HEMŞİRELİK BAKIMI: HASTA GÜVENLİĞİNE ETKİLERİ VE ÖNLEYİCİ YAKLAŞIMLAR

Dr. Öğr.Üyesi .Hamiyet KIZIL
Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Hemşirelik Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0002-0722-589X
Halime TAMİNCE
Öğrenci, Hamidiye Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Hemşirelik Esasları Tezli Yüksek Lisans Programı, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0009-0008-2778-4462

ÖZET

Bu geleneksel derleme, acil servislerde kaçırılmış hemşirelik bakımının görünümünü, belirleyici etmenlerini, hasta ve hemşireler üzerindeki sonuçlarını ve önlenmesine yönelik yaklaşımları incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması Eylül 2026'da PubMed ve Google Scholar üzerinde "missed nursing care", "emergency department", "emergency nursing" ve "patient safety" anahtar sözcükleri ile Türkçe karşılıkları da kullanılarak yürütülmüştür. Güncellik, yöntemsel açıklık, acil servisle doğrudan ilişki ve kavramsal bütünlüğe katkı ölçütleri doğrultusunda toplam 20 kaynak değerlendirmeye alınmıştır. Kaynakların altısını acil servise özgü ampirik araştırmalar, beşini derleme veya kavramsal sentezler, dördünü acil servis dışındaki klinik ortamlarda yürütülen ampirik araştırmalar, üçünü kavram analizi veya ölçüm aracı geliştirme çalışmaları ve ikisini etik ve hasta güvenliği bağlamındaki çalışmalar oluşturmuştur. Bu kaynaklardan 16'sı anlatısal senteze doğrudan dâhil edilmiştir. Bulgular, acil servislerde hasta iletişimi, psikososyal destek, hasta ve ailesinin eğitimi, yeniden değerlendirme, dokümantasyon, taburculuk planlaması ve uygulanan girişimlerin etkinliğinin izlenmesinin en sık kaçırılan bakım alanları olduğunu göstermiştir. Personel yetersizliği, değişken hasta yoğunluğu, yüksek iş yükü, zaman kısıtlılığı, sık kesintiler, kaynak eksikliği ve ekip içi iletişim sorunları temel belirleyiciler olarak öne çıkmıştır. Kaçırılmış bakımın olumsuz hasta olayları, bakım kalitesi ve hasta memnuniyetinde azalma ile hemşirelerde ahlaki sıkıntı, tükenmişlik ve iş doyumunda düşüşle ilişkili olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak kaçırılmış hemşirelik bakımı, bireysel kusurdan çok bakım talebi ile sistem kapasitesi arasındaki uyumsuzluğu yansıtan önemli bir hasta güvenliği sorunudur. Acil servise özgü ölçüm araçlarının geliştirilmesi, bakım gereksinimine duyarlı kadrolama, etkili ekip çalışması, destekleyici güvenlik kültürü ve tamamlanmamış bakımın güvenli biçimde devredilmesi önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: "*Acil servis, hasta güvenliği, hemşirelik bakımı, kaçırılmış bakım"*

MISSED NURSING CARE IN EMERGENCY DEPARTMENTS: ITS IMPACT ON PATIENT SAFETY AND PREVENTIVE STRATEGIES

ABSTRACT

This review was conducted to examine the manifestations and determinants of missed nursing care in emergency departments, its consequences for patients and nurses, and approaches to its prevention. The literature search was conducted in September 2026 using PubMed, Google Scholar, and the publisher platforms of relevant journals. The keywords "missed nursing care," "emergency department," "emergency nursing," and "patient safety," together with their Turkish equivalents, were used. A total of 20 sources were included based on their currency, methodological clarity, direct relevance to emergency departments, and contribution to

conceptual coherence. Of these sources, six were empirical studies specific to emergency departments, five were reviews or conceptual syntheses, four were empirical studies conducted in clinical settings other than emergency departments, three were concept analyses or instrument-development studies, and two addressed ethical issues and patient safety. Sixteen of these sources were directly included in the narrative synthesis. The findings indicated that patient communication, psychosocial support, patient and family education, reassessment, documentation, discharge planning, and monitoring the effectiveness of interventions were the most frequently missed aspects of care in emergency departments. Inadequate staffing, fluctuating patient volumes, high workloads, time constraints, frequent interruptions, resource limitations, and communication problems within healthcare teams emerged as the primary determinants. Missed nursing care was associated with adverse patient events, reduced quality of care and patient satisfaction, and moral distress, burnout, and decreased job satisfaction among nurses. In conclusion, missed nursing care represents a major patient safety concern that reflects a mismatch between care demands and system capacity rather than individual failure. The development of emergency department-specific measurement instruments, care-needs-based staffing, effective teamwork, a supportive safety culture, and the safe handover of unfinished care are recommended.
Keywords: “emergency department, nursing care, missed nursing care, patient safety”

GİRİŞ

Acil servisler; yaşamı tehdit altında olan, bilinci kapalı, konfüze, yaşlı, fiziksel olarak güçsüz veya kendini ve haklarını koruyamayacak durumdaki hastaların başvurduğu, yüksek etik sorumluluk gerektiren sağlık alanlarıdır. Ayrıca acil servislerde sağlık profesyonelleri, ölüm ve sakatlık gibi ciddi sonuçları önlemek amacıyla hızlı kararlar almak zorunda olmakta, ancak yoğunluk ve zaman kısıtlılığı nedeniyle hastaların durumunu yeterince değerlendirmekte zorlanabilmektedir. Bu nedenle acil servislerde hasta güvenliği, etik yaklaşım ve özenli bakım büyük önem taşımaktadır (Bayraktar & Sivrikaya, 2018; Duhalde ve ark., 2023). Hasta güvenliği, kaliteli ve nitelikli sağlık hizmetinin temel unsurlarından biridir. Hasta güvenliğinin göz ardı edilmesi; tıbbi ve ihmal hatalarına, hastalık ve komplikasyonların artmasına, kalıcı sakatlıklara, hastanede yatış süresinin uzamasına, hasta ve yakınlarının psikolojik ve sosyal açıdan zarar görmesine ve en ciddi sonuç olarak ölüme yol açabilmektedir. Bu nedenle sağlık hizmetlerinde temel amaç, yarar sağlamak kadar zarar vermemek ve olası hataları önlemektir. Özellikle hemşirelik hizmetlerinde ortaya çıkan ve çoğu zaman fark edilmeyen ihmal hataları, hasta güvenliğini tehdit ederek bakım kalitesini olumsuz etkilemektedir. Tüm bu nedenler, hasta güvenliğinin sağlık hizmetlerinin sunumunda öncelikli ve vazgeçilmez bir unsur olduğunu göstermektedir. Böylece hasta güvenliği yalnızca yanlış yapılan işlemlerden değil, yapılması gerektiği hâlde gerçekleştirilemeyen bakımdan da etkilenir (Kaya & Gündüz, 2022; Güleşen, 2022).

Kaçırılmış hemşirelik bakımı, hastanın gereksinim duyduğu bakımın bütünüyle veya kısmen atlanması ya da önemli ölçüde geciktirilmesi olarak tanımlanmaktadır (Kalisch ve ark., 2009; Güleşen, 2022). Bakımın tamamlanamamasına sebep olan faktörler; özellikle zaman ve personel yetersizliği, iş yükü, kaynakların sınırlılığı, ekip çalışması ve güvenlik kültürü olarak belirlenmiştir (Jones ve ark., 2015). Kaçırılmış hemşirelik bakımı, hasta güvenliği ve kaliteli hasta bakımını olumsuz etkilerken hemşireler üzerinde yoğun stres ve düşük benlik saygısına ve iş doyumunda düşüşe neden olmaktadır Tamamlanmamış bakımın hasta memnuniyetinde ve algılanan bakım kalitesinde azalmaya, olumsuz hasta olaylarında artışa ve hemşirelerin iş doyumunda düşüşe yol açabileceği gösterilmiştir (Güleşen, 2022; Jones ve ark., 2015). Acil servislerde atlanmış hemşirelik bakımı çok boyutlu ve birbiriyle ilişkili faktörlerin etkisiyle

ortaya çıkan önemli bir bakım kalitesi ve hasta güvenliği sorunudur. Literatürde, bakımın atlanmasının yalnızca bireysel hemşire davranışlarıyla açıklanamayacağı; hemşire iş gücü, iş yükü, zaman kısıtlılığı, çalışma ortamının özellikleri, organizasyonel yapı, ekip içi iletişim ve mevcut kaynakların yeterliliği gibi sistem düzeyindeki faktörlerle yakından ilişkili olduğu belirtilmektedir. Özellikle hemşire sayısının yetersiz olması, hemşire başına düşen hasta sayısının artması ve yoğun iş yükü, hemşirelerin mevcut zaman ve kaynakları bakım gereksinimlerinin aciliyetine göre önceliklendirmelerine neden olabilmektedir (Duhalde ve ark.,, 2023; Jones ve ark., 2015). Bu derlemede acil servislerde kaçırılmış hemşirelik bakımının görünümü, nedenleri, sonuçları ve önleme seçenekler incelenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma geleneksel derleme olarak hazırlanmıştır. Literatür taraması Eylül 2026 tarihinde PubMed, Google Scholar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aramada "missed nursing care", "emergency department", "emergency nursing", "patient safety" sözcükleri ve Türkçe karşılıkları kullanılmıştır.

Acil serviste kaçırılmış bakımın sıklığını, türlerini, nedenlerini veya sonuçlarını inceleyen özgün çalışmalar; kavram analizi ve ölçüm araçlarının geliştirilmesine ilişkin temel çalışmalar; güncel sistematik, kapsam belirleme ve genel değerlendirme çalışmaları dâhil edilmiştir. Literatür taraması sonucunda toplam 20 kaynak derlemeye alınmıştır. Kaynakların altısını acil servise özgü ampirik araştırmalar, beşini derleme veya kavramsal sentezler, dördünü acil servis dışındaki klinik ortamlarda yürütülen ampirik araştırmalar, üçünü kavram analizi veya ölçüm aracı geliştirme çalışmaları ve ikisini etik ve hasta güvenliği bağlamındaki çalışmalar oluşturmuştur. Bu kaynaklardan 16'sı amaç, tasarım, örneklem veya bağlam, temel bulgular ve hemşirelik uygulamalarına yönelik çıkarımlar bakımından incelenerek anlatısal biçimde sentezlenmiş; dört kaynak ise çalışmanın etik, hasta güvenliği ve kavramsal çerçevesinin oluşturulmasında kullanılmıştır.Yalnızca yoğun bakım, ameliyathane veya uzun süreli bakım ortamına özgü olup acil servis bağlamına aktarılabilir bir mekanizma sunmayan çalışmalar dışlanmıştır. Kaynak seçiminde güncellik, yöntem açıklığı, acil servisle doğrudan ilişki ve derlemenin kavramsal bütünlüğüne katkı dikkate alınmıştır.

Tablo 1. Derlemeye alınan kaynakların çalışma türlerine göre dağılımı

Kaynak grubu	Sayı	Kaynaklar
Acil servise özgü ampirik çalışmalar	6	Amritzer vd., 2024; Babaii vd., 2025; Duhalde & Bååth, 2025; Ghezeljeh vd., 2021; Mainz vd., 2024; Rooddehghan vd., 2024
Derleme/kavramsal sentezler	5	Chaboyer vd., 2021; Chiappinotto vd., 2022; Duhalde vd., 2023; Güleşen, 2022; Provost vd., 2026
Acil servis dışı ampirik çalışmalar	4	Ball vd., 2014; Hessels vd., 2019; Piscotty & Kalisch, 2014; Piscotty vd., 2015
Kavram ve ölçüm aracı çalışmaları	3	Jones vd., 2015; Kalisch vd., 2009; Kalisch & Williams, 2009
Etik ve hasta güvenliği bağlam kaynakları	2	Bayraktar & Sivrikaya, 2018; Kaya & Gündüz, 2022
Toplam	**20**	

BULGULAR

Kaçırılmış Bakımn Acil Servisteki Görünümü

Acil servise özgü kapsam belirleme derlemesi, temel fiziksel gereksinimler ile psikososyal bakımın hasta yükü arttığında en kırılgan bakım alanları olduğunu göstermiştir (Duhalde ve ark., 2023). İsveç'te yürütülen kesitsel çalışmada 24 bakım maddesinin yarısından fazlası, katılımcıların en az yarısı tarafından kaçırılmış olarak bildirilmiştir (Amritzer ve ark., 2024). Bu sonuç, bakım eksikliğinin istisnai bir olaydan çok acil servis işleyişinde tekrar eden bir örüntü olabileceğini düşündürmektedir.

Rooddehghan ve ark. (2024) tarafından İran'daki iki hastanenin acil servislerinde gerçekleştirilen kesitsel ve gözlemsel çalışmada, atlanmış hemşirelik bakımının düzeyi ve türleri incelenerek hemşirelik uygulamaları araştırmacılar tarafından doğrudan gözlemlenerek değerlendirilmiştir. Bulgular, acil servislerde karşılanmamış hemşirelik bakımı düzeyinin yüksek olduğunu ve en fazla aksayan bakım alanının hasta iletişimi olduğunu göstermiştir. Buna karşılık acil arabası ve ekipmanların kontrolü en düşük düzeyde atlanan bakım alanı olarak belirlenmiştir. Hasta iletişiminin yanı sıra fizyolojik izlem, enfeksiyon kontrolü, taburculuk sonrası planlanan ziyaretler hakkında bilgilendirme, hemşirelik kayıtları ve vardiya değişiminde hasta bilgilerinin kontrolü gibi bakım uygulamalarında da aksaklıklar saptanmıştır (Rooddehghan ve ark., 2024). Zaman-kritik ve görünür görevlerin korunmasına karşılık rahatlatma, açıklama, eğitim ve taburculuk planlaması gibi ilişkisel bakım unsurları geri plana düşmektedir. Acil hemşirelerinin bakım algılarını inceleyen nitel çalışma da klinik aciliyeti yüksek görevler ile temel ve ilişkisel bakım arasında sürekli bir önceliklendirme yaşandığını ortaya koymuştur (Duhalde ve Bååth, 2025).

Belirleyici Etmenler

Kanıtlar kaçırılmış bakımın bireysel dikkatsizlikten çok kaynak ve talep arasındaki uyumsuzlukla ortaya çıktığını göstermektedir. Sistematik derlemede personel yetersizliği, beklenmeyen iş yükü, malzeme eksikliği, iletişim sorunları ve olumsuz çalışma ortamı başlıca öncüller olarak belirlenmiştir (Chiappinotto ve ark., 2022). Danimarka çalışmasında da yetersiz hemşire sayısı, hasta sayısı ve aciliyetindeki beklenmeyen artış ile yoğun kabul-taburculuk faaliyeti en önemli nedenlerdir (Mainz ve ark., 2024).

İş yükünün bakımın eksik bırakılmasıyla ilişkisi farklı ortamlarda tutarlı biçimde bildirilmiştir. Ball, ve ark., (2014), vardiyada tamamlanmayan bakımın yüksek iş yükü ve düşük bakım kalitesi algısıyla birlikte arttığını göstermiştir. Acil servis hemşireleri üzerinde yürütülen güncel çalışma da iş yükünü kaçırılmış bakımın önemli bir belirleyicisi olarak saptamış, hasta güvenliği yeterliliğinin koruyucu rolüne işaret etmiştir (Babaii ve ark., 2025).

Ekip Çalışması ve Güvenlik Kültürü

Acil servis bakımında görevlerin bağımsız değil, birbirine bağlı biçimde yürütülmesi ekip çalışmasını merkezi hâle getirir. Ghezeljeh ve ark.'ın (2021) 213 acil servis hemşiresiyle yaptığı çalışmada ekip çalışması ile kaçırılmış bakım arasında ters yönlü ilişki bulunmuş ve ekip değişkenleri kaçırılmış bakımdaki değişimin yaklaşık %14'ünü açıklamıştır. Bu bulgu ekip liderliği, ortak zihinsel model ve karşılıklı desteğin bakım sürekliliğine katkısını göstermektedir. Derlemelerin genel değerlendirmesi de yeterli personelin tek başına yeterli olmadığını; iletişim, ekip koordinasyonu ve destekleyici çalışma ortamının birlikte ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Chaboyer ve ark., 2021).

Güvenlik kültürü, hem bakım eksikliğinin oluşumunu hem de görünür hâle gelmesini etkiler. Hessels, ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada, daha olumlu hasta güvenliği kültürünün daha az kaçırılmış bakım ve daha az bildirilen advers olayla ilişkili olduğunu göstermiştir. Cezalandırıcı yaklaşım ise hemşirelerin bakım eksikliklerini bildirmesini engeller ve sistem düzeyindeki nedenlerin tartışılmasını güçleştirebilir.

Hasta ve Hemşire Sonuçları

Kaçırılmış bakım ile hasta sonuçları arasındaki kanıtların önemli bölümü kesitsel ve öz bildirime dayalıdır. Bu nedenle doğrudan nedensellik kurulamaz. Bununla birlikte kavramsal analizler ve çok merkezli araştırmalar; ilaç hataları, düşmeler, basınç yaralanmaları, ağrı yönetiminde gecikme, hasta memnuniyetsizliği ve algılanan bakım kalitesinde azalma gibi sonuçlarla tutarlı ilişkiler bildirmektedir (Jones ve ark., 2015; Provost ve ark., 2026). Acil serviste yeniden değerlendirme, iletişim ve taburculuk eğitiminin eksik bırakılması özellikle klinik kötüleşmenin geç fark edilmesi ve bakım geçişlerinin güvenliği açısından önem taşır.

Kaçırılmış bakım hemşireler açısından da etik ve mesleki bir yük oluşturur. Gerekli bakımı bildiği hâlde zaman veya kaynak sınırlılığı nedeniyle tamamlayamamak ahlaki sıkıntı, iş doyumunda azalma ve tükenmişlikle ilişkili olabilir. Bu nedenle sorun yalnızca hasta güvenliği göstergesi değil, sürdürülebilir hemşire iş gücü açısından da ele alınmalıdır (Chaboyer ve ark., 2021).

Önleyici Yaklaşımlar

Literatürde acil servislerde kaçırılmış hemşirelik bakımının azaltılmasına yönelik yaklaşımlar; ölçme ve izleme, iş gücü ve kaynak yönetimi, iş süreçlerinin düzenlenmesi, ekip çalışması ve bakım devri, güvenlik kültürü ve yönetsel destek ile teknoloji ve mesleki yeterlilik olmak üzere altı başlık altında sınıflandırılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Acil servislerde kaçırılmış hemşirelik bakımını önlemeye yönelik yaklaşımlar

Yaklaşım	Önerilen uygulamalar	Beklenen katkı	İlgili kaynaklar
Ölçme ve izleme	Kaçırılmış bakımın MISSCARE Survey gibi araçlarla düzenli değerlendirilmesi; acil servise özgü kontrol listelerinin kullanılması; sık aksayan bakım alanlarının belirlenmesi	Kaçırılmış bakımın görünür hâle getirilmesi, riskli bakım alanlarının belirlenmesi ve iyileştirme sonuçlarının izlenmesi	Kalisch & Williams, 2009; Rooddehghan ve ark., 2024
İş gücü ve kaynak yönetimi	Kadrolamanın hasta sayısının yanı sıra aciliyet, bakım karmaşıklığı ve hasta döngüsüne göre planlanması; yoğunluk dönemlerinde esnek personel desteği sağlanması; gerekli malzeme ve ekipmanların erişilebilirliğinin güvence altına alınması	Bakım talebi ile mevcut kapasite arasındaki uyumsuzluğun azaltılması ve hemşirelerin bakım gereksinimlerini zamanında karşılayabilmesi	Chiappinotto ve ark., 2022; Mainz ve ark., 2024; Babaii ve ark., 2025
İş süreçlerinin düzenlenmesi	Görev ve sorumlulukların netleştirilmesi; kritik bakım uygulamalarının önceliklendirilmesi; gereksiz belge tekrarlarının ve iş kesintilerinin azaltılması	Hemşirelerin doğrudan hasta bakımına ayırdığı sürenin artırılması ve bakım uygulamalarının gecikmesinin önlenmesi	Duhalde ve ark., 2023; Chaboyer ve ark., 2021
Ekip çalışması ve bakım devri	Ekip liderliğinin güçlendirilmesi; vardiya içi kısa güvenlik görüşmelerinin yapılması; standart hasta devir süreçlerinin kullanılması; tamamlanmamış bakımın sonraki ekibe açıkça aktarılması	Bakım sürekliliğinin korunması, görevlerin ekip içinde kaybolmasının önlenmesi ve ortak sorumluluğun geliştirilmesi	Ghezeljeh ve ark., 2021; Chaboyer ve ark., 2021
Güvenlik kültürü ve yönetsel destek	Kaçırılmış bakımın bireysel kusur yerine sistem göstergesi olarak ele alınması; cezalandırıcı olmayan bildirim ortamının	Bakım eksikliklerinin güvenli biçimde bildirilmesi, sistem kaynaklı nedenlerin	Hessels ve ark., 2019; Jones ve ark., 2015

	oluşturulması; sonuçların çalışanlarla düzenli paylaşılması	belirlenmesi ve kurumsal öğrenmenin desteklenmesi	
Teknoloji ve mesleki yeterlilik	Elektronik bakım hatırlatıcılarının kullanılması; geciken uygulamaları gösteren dijital sistemlerin geliştirilmesi; hemşirelerin hasta güvenliği ve bakım önceliklendirme yeterliliklerinin desteklenmesi	Unutulan veya geciken bakım uygulamalarının azaltılması ve yüksek iş yükü altında bakımın tamamlanmasının desteklenmesi	Piscotty & Kalisch, 2014; Piscotty ve ark., 2015; Babaii ve ark., 2025

Önleme stratejilerinin ilk basamağı, kaçırılmış bakımın düzenli ölçülmesidir. MISSCARE Survey kaçırılan bakım unsurlarını ve nedenlerini iş gücü, malzeme ve iletişim boyutlarında değerlendirmek üzere geliştirilmiştir (Kalisch ve Williams, 2009) (Tablo 2).

Personel sayısının hasta hacmi kadar aciliyet ve bakım karmaşıklığına göre planlanması temel örgütsel müdahaledir. Yoğunluk artışlarında esnek personel desteği, görevlerin netleştirilmesi ve kritik olmayan belge tekrarlarının azaltılması bakım için zaman yaratabilir. Ekip liderliği, vardiya içi kısa güvenlik görüşmeleri ve standart hasta devri bakımın ekip içinde kaybolmasını önleyebilir. Hasta güvenliği yeterliliğini geliştiren eğitimler de iş yükünün etkisini azaltabilecek bir bileşendir (Babaii ve ark., 2025) (Tablo 2).

Elektronik hemşirelik bakım hatırlatıcılarının kullanımının, atlanmış hemşirelik bakımı ile negatif yönde ilişkili olduğu ve bu tür teknolojilerin bakımın tamamlanmasını destekleyebileceği bildirilmiştir (Piscotty & Kalisch, 2014; Piscotty ve ark., 2015). Acil servislerde ise kontrol listeleri kullanılarak bakımın hangi alanlarda daha sık aksadığının belirlenebileceği ve elde edilen verilerin hemşirelik yöneticileri tarafından bakım süreçlerinin iyileştirilmesinde kullanılabileceği belirtilmektedir (Rooddehghan ve ark., 2024) (Tablo 2).

TARTIŞMA

Bu derlemenin bulguları acil servislerde kaçırılmış hemşirelik bakımının temel olarak talep ile mevcut bakım kapasitesi arasındaki uyumsuzluktan doğduğunu göstermektedir. Hemşireler zaman-kritik görevleri sürdürürken iletişim, rahatlatma, eğitim, dokümantasyon ve bakımın yeniden değerlendirilmesi daha sık ertelenmektedir. Bu örüntü, bakımın yalnızca teknik işlemler üzerinden değerlendirilmesinin hemşireliğin önemli bir bölümünü görünmez bırakacağını ortaya koymaktadır.

Acil servise özgü çalışmaların sonuçları daha geniş hastane literatürüyle uyumludur. Ball ve ark.' In (2014) iş yükü bulguları ile Chiappinotto ve arkadaşlarının (2022) sistematik sentezi, yetersiz kaynak ve bozulmuş iş süreçlerinin bakım eksikliğiyle ilişkisini desteklemektedir. Bununla birlikte acil servis, hasta temas süresinin kısa ve değişken olması nedeniyle diğer kliniklerden ayrılır. Bu nedenle ağız bakımı veya mobilizasyon gibi klasik MISSCARE maddeleri her acil servis hastasına aynı ölçüde uygulanabilir değildir; yeniden değerlendirme, semptom kontrolü, iletişim, güvenli devir ve taburculuk eğitimi daha bağlama duyarlı göstergelerdir.

Çalışmaların önemli bir bölümü tek merkezli, kesitsel ve hemşire öz bildirimine dayalıdır. Doğrudan gözlem kullanılan Rooddehghan ve ark. (2024) çalışması yöntemsel çeşitlilik sağlasa da gözlenen personelin davranış değiştirme olasılığı bulunmaktadır. Amritzer ve ark.'ın (2024) bulguları meslek gruplarının kaçırılmış bakımı farklı algılayabildiğini göstermektedir. Bu farklılık, ölçüm sonuçlarının gerçek bakım eksikliğinin yanı sıra rol beklentisi ve mesleki farkındalıktan etkilenebileceğini düşündürür.

Hasta sonuçlarıyla ilgili kanıtlar dikkatli yorumlanmalıdır. Kaçırılmış bakım ile advers olayların birlikte görülmesi, ilişkinin yönünü tek başına kanıtlamaz; yoğunluk ve hastalık

şiddeti her iki sonucu da artırabilir. Gelecekte vardiya düzeyinde hasta yoğunluğu, hemşirelik saati, klinik aciliyet, gerçekleştirilen bakım ve hasta sonuçlarını aynı zaman ekseninde inceleyen çok merkezli çalışmalar gereklidir. Türkiye'de acil servise özgü geçerli bir ölçüm aracının geliştirilmesi veya mevcut aracın uyarlanması önemli bir araştırma alanıdır.

Uygulama açısından en gerçekçi yaklaşım, kaçırılmış bakımı bireysel kusur olarak değil sistem sinyali olarak ele almaktır. Günlük güvenlik toplantılarında geciken bakımın konuşulması, yoğunluk eşiklerine göre destek personeli görevlendirilmesi ve hasta devrinde tamamlanmamış işlerin açıkça aktarılması düşük maliyetli başlangıç adımlarıdır. Yönetim düzeyinde ise aciliyet ve bakım gereksinimine dayalı kadrolama ile düzenli veri geri bildirimi gerekir. Ekip çalışmasının kaçırılmış bakımla ters ilişkisi, önleme programlarında ekip liderliği ve ortak sorumluluğa yer verilmesini desteklemektedir (Ghezeljeh ve ark., 2021).

SONUÇ

Kaçırılmış hemşirelik bakımı, acil servislerde hasta güvenliği ve bakım kalitesini etkileyen, ancak çoğu zaman rutin performans göstergelerinde görünmeyen bir sorundur. En sık risk altında kalan bakım alanları hasta iletişimi, psikososyal destek, eğitim, yeniden değerlendirme, dokümantasyon ve uygulanan tedavinin etkinliğinin izlenmesidir. Yetersiz kadro, değişken hasta yükü, yüksek aciliyet, kesintiler ve ekip içi iletişim sorunları temel belirleyicilerdir. Önleme; acil servise özgü ölçüm, bakım gereksinimine duyarlı kadrolama, etkili ekip çalışması, destekleyici güvenlik kültürü ve tamamlanmamış bakımın güvenli biçimde devredilmesini gerektirir. Türkiye'de çok merkezli prevalans çalışmaları, geçerli ölçüm araçları ve hasta sonuçlarını içeren ileriye dönük araştırmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Amritzer, M. A., Göransson, K. E., Berg, L. M., & Nymark, C. (2024). A new perspective on missed nursing care in the emergency department: A descriptive cross-sectional study. Journal of Emergency Nursing, 50(3), 392–402. https://doi.org/10.1016/j.jen.2023.12.006

Babaii, A., Rooholamin, M., Khoramirad, A., Mohammadbeigi, A., & Abbasinia, M. (2025). The association of nursing workload and patient safety competency of nurses with missed nursing care in emergency department: A cross-sectional analytical study. Heliyon, 11, e44077. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e44077

Ball, J. E., Murrells, T., Rafferty, A. M., Morrow, E., & Griffiths, P. (2014). Care left undone during nursing shifts: Associations with workload and perceived quality of care. BMJ Quality & Safety, 23(2), 116–125. https://doi.org/10.1136/bmjqs-2012-001767

Bayraktar, A. K., & Sivrikaya, S. K. (2018). Acil servis hemşirelik hizmetlerinde etik. *Hemşirelikte Eğitim ve Araştırma Dergisi*, *15*(1), 57-62.

Chaboyer, W., Harbeck, E., Lee, B. O., & Grealish, L. (2021). Missed nursing care: An overview of reviews. Kaohsiung Journal of Medical Sciences, 37(2), 82–91. https://doi.org/10.1002/kjm2.12308

Chiappinotto, S., Papastavrou, E., Efstathiou, G., Andreou, P., Stemmer, R., Ströhm, C., Schubert, M., de Wolf-Linder, S., Longhini, J., & Palese, A. (2022). Antecedents of unfinished nursing care: A systematic review of the literature. BMC Nursing, 21, 137. https://doi.org/10.1186/s12912-022-00890-6

DOI: 10.1186/s12873-024-00936-9.

Duhalde, H., & Bååth, C. (2025). Emergency nurses' perceptions of nursing care in an emergency department: A phenomenographic study. Journal of Emergency Nursing, 51(5), 840–849. https://doi.org/10.1016/j.jen.2025.03.018

Duhalde, H., Bjuresäter, K., Karlsson, I., & Bååth, C. (2023). Missed nursing care in emergency departments: A scoping review. International Emergency Nursing, 69, 101296. https://doi.org/10.1016/j.ienj.2023.101296

Ghezeljeh, T. N., Gharasoflo, S., & Haghani, S. (2021). The relationship between missed nursing care and teamwork in emergency nurses: A predictive correlational study. Nursing Practice Today, 8(2), 103–112. https://doi.org/10.18502/npt.v8i2.5121

Güleşen, G. (2022). Hemşirelik Bakımında Önemli Bir Kavram: Karşılanamayan Hemşirelik Bakımı ve Nedenleri. Türkiye Sağlık Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 5(1), 42-49. https://doi.org/10.51536/tusbad.1042757

Hessels, A. J., Paliwal, M., Weaver, S. H., Siddiqui, D., & Wurmser, T. A. (2019). Impact of patient safety culture on missed nursing care and adverse patient events. Journal of Nursing Care Quality, 34(4), 287–294. https://doi.org/10.1097/NCQ.0000000000000378

Jones, T. L., Hamilton, P., & Murry, N. (2015). Unfinished nursing care, missed care, and implicitly rationed care: State of the science review. International Journal of Nursing Studies, 52(6), 1121–1137. https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2015.02.012

Kalisch, B. J., & Williams, R. A. (2009). Development and psychometric testing of a tool to measure missed nursing care. Journal of Nursing Administration, 39(5), 211–219. https://doi.org/10.1097/NNA.0b013e3181a23cf5

Kalisch, B. J., Landstrom, G. L., & Hinshaw, A. S. (2009). Missed nursing care: A concept analysis. Journal of Advanced Nursing, 65(7), 1509–1517. https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2009.05027.x

Kaya, E., & Gündüz, S. (2022). Sağlık kurumlarinda merhamet yorgunluğu ve hasta güvenliğinin önemi. Uygulamalı Sosyal Bilimler ve Güzel Sanatlar Dergisi, 4(8), 46-61. https://izlik.org/JA75CZ92WW

Mainz, H., Tei, R., Andersen, K. V., Lisby, M., & Gregersen, M. (2024). Prevalence of missed nursing care and its association with work experience: A cross-sectional survey. International Journal of Nursing Studies Advances, 6, 100196. https://doi.org/10.1016/j.ijnsa.2024.100196

Piscotty, R. J., Jr, & Kalisch, B. (2014). The relationship between electronic nursing care reminders and missed nursing care. Computers, informatics, nursing : CIN, 32(10), 475–481. https://doi.org/10.1097/CIN.0000000000000092

Piscotty, R. J., Kalisch, B., Gracey-Thomas, A., & Yarandi, H. (2015). Electronic nursing care reminders: implications for nursing leaders. The Journal of nursing administration, 45(5), 239–242. https://doi.org/10.1097/NNA.0000000000000192

Provost, J., Gosselin, É., & Rochefort, C. M. (2026). The omission of nursing care in emergency departments: A conceptual analysis using Walker and Avant's methodology. Journal of Advanced Nursing, 82, 1750–1759. https://doi.org/10.1111/jan.17017

Rooddehghan, Z., Karimi, H., Mohammadnejad, E., Sayadi, L., Haghani, S., & Karimi, R. (2024). Missed nursing care in emergency departments: a cross-sectional descriptive study. BMC Emergency Medicine, 24, 22.

KISA VE UZUN VADELİ BORÇLANMANIN FİRMA KÂRLILIĞINA ETKİSİ TEKSTİL, GİYİM VE DERİ SEKTÖRÜNDE CCEMG YAKLAŞIMIYLA BİR İNCELEME

Hikmet Ubeyd BOYDAK
Hamza YETİK

Öz

İşletmeler faaliyetlerini sağlıklı biçimde sürdürebilmek için yeterli miktarda özsermayeye sahip olmak mecburiyetindedir. Özsermaye yetersizliği veya kaldıraç kullanımının daha avantajlı olduğu durumlarda işletmeler kısa ve uzun vadeli borçlanma yoluna gidebilmektedir. Her iki finansman kaynağı da işletmeler açısından belirli bir maliyet unsurlarını barındırmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Borsa İstanbul (BİST) Tekstil, Giyim ve Deri sektöründe işlem gören işletmelerin kısa ve uzun vadeli borçlanmalarının kârlılık performansları üzerindeki etkisini incelemektir. Araştırma kapsamında, 2000–2025 döneminde kesintisiz veriye sahip dokuz işletmenin yıllık finansal verileri kullanılarak dengeli bir panel veri seti oluşturulmuştur. Kârlılık göstergeleri olarak aktif kârlılığı (ROA) ve özsermaye kârlılığı (ROE) analize dahil edilirken; sermaye yapısı kısa vadeli borçlar (KVB) ve uzun vadeli borçlar (UVB) şeklinde iki ayrı bileşende ele alınmıştır. Panel veri setinde tespit edilen yatay kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliği doğrultusunda, nihai tahmin yöntemi olarak ikinci nesil tekniklerden Ortak Korelasyonlu Etkiler Ortalama Grup (CCEMG) tahmincisi uygulanmıştır. Analiz sonuçları hem kısa hem de uzun vadeli borçluluk düzeyinin ROA ve ROE üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve negatif bir etkiye sahip olduğunu, uzun vadeli borçlanmanın negatif etkisinin ise görece daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın kontrol değişkenlerinden firma büyüklüğünün kârlılığı pozitif etkilediği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, sektörde vadeden bağımsız olarak borçlanmanın kârlılığı sınırlandırdığını göstermekte ve yöneticilerin borçlanma tercihlerinde kârlılık üzerindeki baskıyı gözetmeleri gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sermaye Yapısı, Borçlanma Vadesi, Firma Kârlılığı, CCEMG Tahmincisi, BİST Tekstil Sektörü.

THE IMPACT OF SHORT- AND LONG-TERM BORROWING ON FIRM PROFITABILITY: AN ANALYSIS OF THE TEXTILE, CLOTHING, AND LEATHER SECTOR USING THE CCEMG APPROACH

Abstract

Enterprises must possess sufficient equity to sustain their operations effectively. In situations where equity is insufficient or the use of leverage offers greater advantages, enterprises may resort to short- and long-term borrowing. Both financing sources entail specific cost elements for the enterprises. The aim of this study is to examine the impact of short- and long-term borrowing on the profitability performance of enterprises listed in the Borsa Istanbul (BIST) Textile, Apparel, and Leather sector. A balanced panel dataset was constructed using the annual financial data of nine enterprises that provided uninterrupted data for the 2000–2025 period. Return on Assets (ROA) and Return on Equity (ROE) were included in the analysis as profitability indicators, while capital structure was addressed through two distinct components: short-term liabilities (STL) and long-term liabilities (LTL). Given the cross-sectional dependence and slope heterogeneity identified in the panel dataset, the Common Correlated Effects Mean Group (CCEMG) estimator—a second-generation technique—was employed as the final estimation method. The analysis results reveal that both short- and long-term debt levels have a statistically significant negative impact on ROA and ROE, with the negative impact of long-term borrowing being relatively more pronounced. Conversely, among the control variables, firm size was found to have a positive effect on profitability. The findings

indicate that borrowing—regardless of maturity—constrains profitability within the sector and suggest that managers should consider the pressure on profitability when making borrowing decisions.
Keywords: *Capital Structure, Debt Maturity, Firm Profitability, CCEMG Estimator, BIST Textile Sector.*

1. Giriş

İşletmeler faaliyetlerini sağlıklı biçimde sürdürebilmek için yeterli miktarda özsermayeye sahip olmak mecburiyetindedir. Özsermaye yetersizliği veya kaldıraç kullanımının daha avantajlı olduğu durumlarda işletmeler kısa ve uzun vadeli borçlanma yoluna gidebilmektedir. Kısa vadeli borçlar vadesi bir yıldan daha kısa olan borçları kapsarken; uzun vadeli borçlar bir yıldan uzun sürede ödenme yükümlülüğü içinde olunan borçlardır. Her iki finansman kaynağı da işletmeler açısından belirli bir maliyet unsurlarını barındırmaktadır. İşletmenin katlandığı genel fonlama maliyeti, mevcut ya da hedeflenen tüm kaynak bileşenlerinin maliyetlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Bu süreçte, her bir kaynağın kendine özgü yapısal dinamikleri münferit maliyet düzeyi üzerinde belirleyici olmakta; söz konusu bağımsız maliyetlerin sermaye yapısındaki paylarına göre ağırlıklandırılması ise firmanın toplam sermaye maliyetini ortaya koymaktadır (Say & Doğan, 2022, s. 1582).

Özsermaye maliyeti, yatırımcıların sermayelerini işletmeye tahsis etmeleri nedeniyle vazgeçtikleri alternatif getirileri temsil eden fırsat maliyetidir. İşletmeye fon aktarımıyla meydana çıkan özsermaye maliyeti, en iyi alternatifin getiri oranıyla yapılan yatırım arasındaki farkı ifade etmektedir. Bu maliyet unsurunun hesaplanması işletmenin halka açık ya da kapalı olmasına göre farklı şekillerde gerçekleştirilmektedir (Erol & Sarıaslan, 2008, s. 216). Borçlanma maliyeti ise, kullanılan kredilerin ve tedavüle çıkarılan tahvillerin işletmeye yüklediği finansman giderlerini ifade etmektedir. Matematiksel açıdan bu maliyet; borçlanma yoluyla elde edilen nakit tutarın şimdiki değerini, borcun anapara ve faiz itfası için katlanılacak gelecekteki nakit çıkışlarının şimdiki değerine eşitleyen iskonto oranıdır (Düzakın, 2024, s. 236). İşletmelerin varlıklarını fonlarken borçlanma kapasitelerinden ne denli yararlandıklarını tespit etmek açısından finansal oranlar temel bir gösterge niteliği taşımaktadır. Finansal yapı veya kaldıraç oranları olarak adlandırılan bu oranlar varlıkların finansmanında tercih edilen yabancı kaynak ve özkaynak dağılımını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra söz konusu oranlar, borçlanmanın işletme kârlılığı üzerindeki pozitif ya da negatif yönlü etkilerinin tespit edilmesine olanak tanımaktadır (Bektöre, Çömlekçi, & Sözbilir, 2018, s. 158).

Bu çalışmada BİST'te işlem gören tekstil, giyim ve deri işletmelerinin, kısa ve uzun vadeli borçlanmalarının işletme kârlılığına etkisinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Analiz dönemi 2000-2025 olarak belirlenen çalışmaya söz konusu dönemde verilerine eksiksiz ulaşılabilen dokuz işletme dahil edilmiştir. ROA ve ROE oranları kârlılık ölçütünü temsilen bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Firmaların uzun ve kısa vadeli borçluluk oranları ise aktif toplama göre baz alınarak bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada kontrol değişkeni olarak firma büyüklüğü, net satış büyümesi ve likidite oranı kullanılmıştır.

2. Literatür Taraması

Gana Menkul Kıymetler Borsası'nda kote şirketleri inceleyen Abor (2005), sermaye yapısı tercihlerinin işletme kârlılığı üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Çalışma sonucu elde edilen bulgular, hem kısa vadeli hem de toplam borçluluk düzeyinin özkaynak kârlılığı (ROE) ile istatistiksel olarak anlamlı ve pozitif bir ilişki içinde olduğunu gösterirken; uzun vadeli borçlanmanın kârlılığı negatif yönde etkilediğini ortaya koymuştur.

Sermaye yapısı dinamiklerini ve kârlılık etkileşimini inceleyen Frank ve Goyal (2008), işletme kârlılığı ile finansal kaldıraç düzeyi arasında pozitif bir ilişki saptamıştır. Çalışma bulgularında

firma ölçeği büyüdükçe borçlanma eğiliminin arttığı, küçük ölçekli işletmelerin ise daha düşük kaldıraçla çalıştığını ortaya çıkmıştır. Buna ek olarak işletmelerin operasyonel ve finansal açıdan elverişli dönemlerde yabancı kaynak kullanımına daha fazla yöneldiği tespit edilmiştir.
Kabakçı (2008), İMKB'de işlem gören ve gıda sektöründe faaliyet gösteren işletmeler üzerine gerçekleştirdiği çalışmada işletme büyüklüğü ile kârlılık arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Elde edilen çalışma bulgularına göre, işletme hacmi genişledikçe öz sermaye kârlılığının da arttığı dolayısıyla iki değişken arasında pozitif yönlü bir ilişkinin bulunduğu ortaya çıkmıştır. Aynı dönemde gerçekleştirilen başka bir çalışmada Albayrak ve Akbulut (2008) finansal kaldıraç ve öz sermaye karlılığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışma bulgularında göre iki değişken arasında pozitif ve anlamlı bir ilişkinin varlığı saptanmıştır.
Uluyol ve diğerleri (2014) bilişim, gıda, madencilik, tekstil ve inşaat sektörlerinde faaliyet gösteren BİST işletmelerini 1991:Ç1–2012:Ç4 döneminde çeyreklik verilerle analiz etmiştir. Çalışmada, finansal kaldıraç oranının özkaynak kârlılığı üzerindeki etkisi sınır testi yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Çalışma bulguları, borçlanma düzeyinin kârlılık üzerindeki etkisinin sektörlere göre farklılaştığını ortaya koymuştur. Analiz kapsamında yer alan sektörlerde finansal kaldıraç kullanımının öz sermaye kârlılığını istatistiksel olarak anlamlı ve negatif yönde etkilediği tespit edilmişken; inşaat sektöründe artan kaldıracın özkaynak kârlılığı üzerinde pozitif ve anlamlı bir etki yarattığı tespit edilmiştir.
Omağ (2015) 2009–2013 dönemini kapsayan çalışmasında, imalat alt sektörlerinin gelir tabloları üzerinden finansal kaldıraç derecelerini analiz etmiştir. Çalışma bulgularında, kaldıraç kullanımının sektörlere göre önemli ölçüde farklılaştığını; finansal kaldıraç etkisinden en yüksek düzeyde yararlanan sektörlerin başında tekstil ile kâğıt ve kâğıt ürünleri sektörünün geldiğini ortaya koymuştur. Buna bağlı olarak, faaliyet kârında (FVÖK) gerçekleşen değişimlerin hisse başına kârlılık üzerindeki yansımasının en güçlü hissedildiği sektörler tekstil ve kâğıt imalatı olmuştur.
Acaravcı (2015) sermaye yapısını belirleyen unsurları tespit etmeyi amaçladığı çalışmada 79 imalat işletmesini 1993-2010 döneminde incelemiştir. Panel veri analizi gerçekleştirilen çalışma bulgularına göre, finansal kaldıracın kârlılık üzerinde borç maliyeti sebebiyle genellikle negatif; faaliyet kaldıracının ise kapasite kullanımına bağlı olarak kârlılık dalgalanmasını artırıcı yönde etkileri tespit edilmiştir.
İçigen ve Karaş (2017) BİST perakende ticaret sektörü işletmelerinin 2012–2016 döneminde, çalışma sermayesi yönetimi ve kârlılıkları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışmada Havuzlanmış En Küçük Kareler yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada kârlılık ölçütü olarak aktif kârlılığı (ROA) baz alınmıştır. Bağımsız değişken olarak stok devir hızı, alacak tahsil ve borç ödeme vadelerini kapsayan nakit dönüşüm süresi kullanılmıştır. Cari oran, pazar payı ve kaldıraç oranı ise kontrol değişkeni olarak analize dahil edilmiştir. Ekonometrik model sonucunda, kaldıraç oranının aktif kârlılığı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve negatif bir etkisinin bulunduğu, buna karşın işletme sermayesi döngüsü bileşenleri ve diğer kontrol değişkenlerinin kârlılık üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.
Vuković ve Jakšić (2019), Güneydoğu Avrupa'da gıda sektöründe faaliyet gösteren 9.883 işletmeyi incelemiştir. Analiz dönemi 2010-2014 olarak belirlenen çalışmada, çalışma sermayesinin kârlılık üzerindeki etkisi probit regresyon modeliyle incelemiştir. Aktif kârlılığının bağımlı değişken olarak belirlendiği çalışmada, cari oran, borçlanma oranı, kısa vadeli borçların toplam aktiflere oranı ve işletme büyüklüğü bağımsız değişken olarak analize dahil edilmiştir. Elde edilen çalışma bulgularında, çalışma sermayesi bileşenlerinin büyük bir bölümünün işletmelerin kârlılık seviyeleri üzerinde anlamlı ve pozitif etkisinin olduğu ortaya çıkmıştır.

Say ve Doğan (2022) BİST Sınai Endeksinde işlem gören işletmelerin kısa vadeli borçlanmalarının aktif karlılığı üzerindeki etkisini ölçmeyi amaçladıkları çalışmada 96 işletmeyi 2009-2020 döneminde incelemiştir. Çalışma bulgularında kısa vadeli borçlanma ile aktif karlılığı arasında negatif yönlü ve anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir.

Özdemir ve Özel (2024) imalat sanayi işletmelerinin sermaye yapısı ve karlılık düzeyleri arasındaki ilişkiyi 2006-2020 döneminde analiz etmiştir. Çalışmada Driscoll ve Kraay standart hata tahmincisi kullanılmıştır. Çalışmada bağımlı değişken olarak ROA ve ROE oranları; bağımsız değişken olarak kısa vadeli borç, uzun vadeli borç ve toplam borç oranları kullanılmıştır. Kontrol değişkenleri olarak ise Ar-Ge harcamalarının, işletme toplam varlığının ve net satışların doğal logaritmaları kullanılmıştır. Çalışma bulguları, sermaye yapısı değişikliklerinin (kısa vadeli borç, uzun vadeli borç ve toplam borç) hem varlık getirisi hem de özsermaye getirisi ile olumsuz ilişkili içerisinde olduğunu göstermektedir. Benzer değişkenlerin kullanıldığı başka bir çalışmada Vătavua (2015) Romanya Bükreş Menkul Kıymetler Borsası'nda işlem gören imalat sektörü işletmelerinin sermaye yapısı ve karlılık düzeyleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışma bulgularına göre, Rumen imalat işletmelerinin borçluluk oranı azaldıkça işletme performanslarının daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Sermaye yapısı bileşenleri ile işletme kârlılığı arasındaki ilişkiyi ele alan çalışmalara genel olarak bakıldığında elde edilen bulguların piyasa koşullarına, sektörel dinamiklere ve borcun vade yapısına bağlı olarak farklılaştığı gözlemlenmektedir. Gelişmiş piyasalar ile bazı ampirik çalışmalarda (Abor, 2005; Albayrak ve Akbulut, 2008; Frank ve Goyal, 2008; Vuković ve Jakšić, 2019) borçlanmanın ve firma büyüklüğünün kaldıraçı avantajlı hale getirdiği ve ölçek ekonomisinin kârlılığı artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, Türkiye ve benzeri gelişmekte olan ülke piyasalarını ele alan çalışmaların çoğunda (Acaravcı, 2015; İçigen ve Karaş, 2017; Say ve Doğan, 2022; Özdemir ve Özel, 2024; Vătavua, 2015), yüksek finansman giderleri ve borçlanma maliyetleri nedeniyle gerek kısa gerekse uzun vadeli borç kullanımının aktif (ROA) ve özkaynak (ROE) kârlılığı üzerinde belirgin bir negatif etki oluşturduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kaldıracın kârlılık üzerindeki yansımasının sektörden sektöre farklılık gösterdiği (Uluyol vd., 2014; Omağ, 2015), tekstil gibi imalat alt kollarının finansal kaldıraç değişimlerine karşı yüksek hassasiyet taşıdığı görülmüştür. Bu doğrultuda literatürdeki genel eğilim, borçlanmanın kârlılık üzerindeki nihai etkisinin vadeden ve sektörel yapıdan bağımsız düşünülemeyeceğini ortaya koymaktadır.

3. Veri Seti ve Yöntem

Bu çalışmada, Borsa İstanbul Tekstil, Giyim ve Deri sektöründe faaliyet gösteren ve 2000-2025 döneminin tamamında kesintisiz veri sağlayan dokuz firmanın (BOSSA, DERİM, KORDS, KRTEK, LUKSK, MNDRS, SKTAS, YATAS, YUNSA) yıllık finansal verileri kullanılmıştır. Finnet2000 veri tabanı üzerinden derlenen veriler ile dengeli bir panel yapısı oluşturulmuştur. Aşırı değerlerin tahmin sonuçlarını çarpıtmasının önüne geçmek amacıyla tüm sürekli değişkenler %1 ve %99'uncu persantillerde winsorize edilmiştir. Çalışmada kullanılan değişkenler, tanımları, hesaplama yöntemleri ve ilgili literatürdeki örnek uygulamaları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Değişkenler, Tanımları ve İlgili Literatür

Rol	Değişken	Kısaltma	Tanım / Hesaplama	Dönem	İlgili Çalışmalar (Literatür Örnekleri)
Bağımlı Değişken	**Aktif Kârlılığı**	ROA	Net Kâr / Toplam Aktif	2000–2025	Abor (2005), Avcı (2016), Chinaemerem ve Anthony (2012), El-Sayed (2009), Herciu ve Ogrean (2017), Özdemir ve Özel (2024)
	Özsermaye Kârlılığı	ROE	Net Kâr / Özsermaye		Abor (2005), Kabakçı (2008), Albayrak ve Akbulut (2008), Özdemir ve Özel (2024), Vătavua (2015)
Bağımsız Değişken	**Kısa Vadeli Borç / Aktif**	KVB	Kısa vadeli yabancı kaynakların toplam aktife oranı		Avcı (2016), Çöllü (2021), El-Sayed (2009), Gill vd. (2011), Salim ve Yadav (2012), Özdemir ve Özel (2024)
	Uzun Vadeli Borç / Aktif	UVB	Uzun vadeli yabancı kaynakların toplam aktife oranı (Toplam Borç/Aktif oranından KVB çıkarılarak türetilmiştir; toplam kaldıraç oranı KVB ve UVB ile tam doğrusal bağlantılı olduğu için modele ayrıca dahil edilmemiştir)		Avcı (2016), Çöllü (2021), El-Sayed (2009), Gill vd. (2011), Salim ve Yadav (2012), Özdemir ve Özel (2024)
Kontrol Değişkeni	**Firma Büyüklüğü**	lnAKT	Toplam aktifin doğal logaritmasının birinci farkı (düzeyde durağan olmadığı için fark alınmıştır)		Avcı (2016), Chinaemerem ve Anthony (2012), Herciu ve Ogrean (2017), İskenderoğlu vd. (2012), Özdemir ve Özel (2024)
	Net Satış Büyümesi	SBY	Net satışlardaki yıllık yüzde değişim		Frank ve Goyal (2008), Uluyol vd. (2014)
	Likidite	CAR	Cari oranın (Dönen Varlıklar / Kısa Vadeli Borçlar) birinci farkı (düzeyde durağan olmadığı için fark alınmıştır)		İçigen ve Karaş (2017)

3.2. Yöntem

Analiz sürecine, panel veri setinin temel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bir dizi ön test uygulanarak başlanmıştır (Yerdelen Tatoğlu, 2021). Öncelikle örneklemdeki dokuz firmanın ortak makroekonomik şoklara aynı anda maruz kalma olasılığı göz önünde bulundurularak Pesaran (2004) CD testi ile yatay kesit bağımlılığı sınanmıştır. İncelenen değişkenlerde büyük çoğunluğunda istatistiksel olarak anlamlı düzeyde bağımlılık tespit edilmiştir. Bu bulgu klasik birinci nesil birim kök ve panel tahmin yöntemleri yerine yatay kesit bağımlılığını hesaba katan ikinci nesil tekniklerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır (Pesaran, 2007; Yerdelen Tatoğlu, 2023).

Değişkenlerin durağanlık düzeyleri, yatay kesit bağımlılığını dikkate alan ikinci nesil bir birim kök testi olan Pesaran (2007) CIPS (Cross-sectionally Augmented IPS) testi ile sınanmıştır

(Yerdelen Tatoğlu, 2023). Test sonuçlarına göre bağımlı değişkenler ROA, ROE ile bağımsız değişkenlerden UVB ve net satış büyümesi değişkeni SBY sabit terimli model spesifikasyonunda düzeyde durağan bulunmuştur. KVB değişkeni ise sabit terimli spesifikasyonda anlamlı çıkmamış, sabit terim ve trend içeren spesifikasyonda durağan hale gelmiştir (%5 düzeyinde anlamlı); bu nedenle KVB için nihai model tahmininde trend içeren spesifikasyon sonucu esas alınmıştır. Buna karşın lnAKT ve CAR değişkenlerinin gerek sabit terimli gerekse sabit terim ve trend içeren spesifikasyonlarda düzeyde durağan olmadığı belirlenmiştir. Söz konusu iki değişken birinci farkları alınarak durağan hale getirilmiş ve model tahmininde bu şekilde kullanılmıştır.

Modelin eğim katsayılarının firmalar arasında homojen olup olmadığı Pesaran ve Yamagata (2008) Δ testi ile sınanmış (Yerdelen Tatoğlu, 2023), her iki bağımlı değişken için de homojenlik varsayımı istatistiksel olarak reddedilmiştir ($p<0,01$). Bu bulgu, kaldıraç oranlarının kârlılık üzerindeki etkisinin firmadan firmaya farklılaştığına ve klasik sabit veya rassal etkiler modelleri yerine firma bazında heterojen eğimlere izin veren bir tahmin yönteminin gerekli olduğuna işaret etmektedir (Pesaran & Yamagata, 2008).

Elde edilen ön test bulguları birlikte değerlendirildiğinde, çalışmanın nihai tahmin yöntemi olarak Pesaran (2006) tarafından geliştirilen Ortak Korelasyonlu Etkiler Ortalama Grup (Common Correlated Effects Mean Group – CCEMG) tahmincisi tercih edilmiştir. CCEMG, her bir kesit birimi için ayrı regresyon denklemleri tahmin edip bu katsayıların basit ortalamasını alarak eğim heterojenliğine izin verirken modele bağımlı ve bağımsız değişkenlerin kesitler arası ortalamalarını (ve bunların gecikmeli değerlerini) ek regresör olarak dahil ederek gözlemlenemeyen ortak faktörlerden kaynaklanan yatay kesit bağımlılığını da kontrol altına almaktadır (Yerdelen Tatoğlu, 2023). Toplam kaldıraç oranı ile kısa ve uzun vadeli borç oranları (KVB/UVB) arasındaki tam doğrusal bağlantı dikkate alınarak, ana modelde yalnızca KVB ve UVB birlikte kullanılmış olup tahmin edilen model şu şekilde ifade edilebilir (Yerdelen Tatoğlu, 2023):

$$ROA_{it}\ (ROE_{it}) = \alpha_i + \beta_{1i}KVB_{it} + \beta_{2i}UVB_{it} + \beta_{3i}lnAKT_{it} + \beta_{4i}SBY_{it} + \beta_{5i}CAR_{it} + \gamma_i\bar{f}_t + \varepsilon_{it}$$

Burada i=1,…,9 örneklemdeki firmaları, t=2000,…,2025 yıllarını, αi firmaya özgü sabit terimi, $\bar{f}_t$ bağımlı ve bağımsız değişkenlerin kesitler arası ortalamalarıyla temsil edilen gözlemlenemeyen ortak faktörleri ve εit hata terimini ifade etmektedir. Nihai CCEMG katsayıları, her bir firma için ayrı ayrı tahmin edilen βi eğim katsayılarının kesitler arası basit ortalaması alınarak ($\hat{\beta} = (1/N)\Sigma\hat{\beta}i$) elde edilmiştir (Yerdelen Tatoğlu, 2023).

3. Bulgular

Bu bölümde, çalışmanın nihai tahmin yöntemine geçilmeden önce kullanılan değişkenlerin genel dağılım özellikleri tanımlayıcı istatistiklerle ortaya konmaktadır. Aralarındaki ikili ilişkiler korelasyon analiziyle incelenmektedir. Sonrasında panel veri setinin yatay kesit bağımlılığı, durağanlık, eğim homojenliği gibi temel özellikleri sırasıyla test edilerek en uygun tahmincinin belirlenmesi için sırasıyla yapılmıştır. Nihai tahminci olarak CCEMG tahmincisinden elde edilen bulgular sunulmaktadır.

Tablo 2. Tanımlayıcı İstatistikler

Değişken	Gözlem	Ortalama	Std. Sapma	Min.	Maks.
ROA	234	2,879	7,296	-16,260	27,610
ROE	234	5,146	20,595	-68,120	62,110
KVB	234	38,105	17,475	6,030	74,790
UVB	234	16,386	11,206	0,960	46,710
SBY	234	24,295	34,552	-25,300	135,650
CAR	234	1,596	0,845	0,570	6,850

Tablo 2'de sunulan tanımlayıcı istatistikler, %1 ve %99'uncu persantillerde winsorize edilmiş nihai veri setine aittir. Örneklemdeki firmaların ortalama aktif kârlılığı (ROA) %2,88, özsermaye kârlılığı (ROE) ise %5,15 düzeyindedir. Ancak her iki değişkenin de standart sapmasının ortalamasına kıyasla oldukça yüksek olması (ROA için 7,30, ROE için 20,60), sektördeki firmalar ve yıllar arasında kârlılık performansında belirgin bir değişkenlik olduğuna işaret edebilir. Kaldıraç değişkenlerine bakıldığında, örneklemdeki firmaların aktiflerinin ortalama %38,1'inin kısa vadeli (KVB), %16,4'ünün ise uzun vadeli (UVB) yabancı kaynaklarla finanse edildiği görülmektedir ki nitekim bu durum, sektördeki firmaların borçlanma tercihlerinde kısa vadeli kaynakların baskın olduğunu ifade edebilmektedir. Net satış büyümesinin (SBY) ortalamasının %24,3 gibi yüksek bir düzeyde olması ve standart sapmasının (34,55) ortalamayı aşması, hem enflasyonist dönemlerin nominal satış rakamlarını şişirmesinden hem de firmalar arası büyüme performansı farklılıklarından kaynaklanabilecek bir bulgudur.

Tablo 3. Korelasyon Matrisi

	ROA	ROE	KVB	UVB	lnAKT	SBY	CAR
ROA	1,000						
ROE	0,932	1,000					
KVB	-0,161	-0,066	1,000				
UVB	-0,222	-0,248	-0,276	1,000			
lnAKT	0,118	0,137	-0,163	0,132	1,000		
SBY	0,406	0,360	0,190	-0,041	-0,020	1,000	
CAR	0,225	0,162	-0,529	-0,083	-0,282	-0,143	1,000

Korelasyon matrisi incelendiğinde, ROA ile ROE arasında beklendiği üzere çok yüksek bir pozitif ilişki (r=0,932) bulunmaktadır. Hal böyleyken iki kârlılık göstergesinin aynı temel performansı farklı sermaye tabanları (aktif ve özsermaye) üzerinden yansıttığını doğrulamaktadır. Kaldıraç değişkenlerinin her ikisi de kârlılık göstergeleriyle negatif yönde ilişkili çıkmıştır. KVB ile UVB arasındaki korelasyonun düşük düzeyde olması (r=-0,276), bu iki değişkenin aynı model içinde birlikte kullanılmasının çoklu doğrusal bağlantı sorunu yaratmadığını göstermektedir. Buna karşın KVB ile CAR arasındaki nispeten yüksek negatif korelasyon (r=-0,529), kısa vadeli borçlanma düzeyi yüksek firmaların likidite oranlarının

görece daha düşük olduğuna işaret edebilirken iki değişken arasındaki bu ilişki teorik olarak beklenen bir sonuçtur.

Tablo 4. Yatay Kesit Bağımlılığı (CD) Testi Sonuçları

Değişken	CD İstatistiği	p-değeri	Sonuç
ROA	5,92	0,000	Bağımlılık var
ROE	4,61	0,000	Bağımlılık var
KVB	8,06	0,000	Bağımlılık var
UVB	10,06	0,000	Bağımlılık var
lnAKT (düzey)	29,28	0,000	Bağımlılık var
SBY	18,77	0,000	Bağımlılık var
CAR (düzey)	5,32	0,000	Bağımlılık var

Not: H0: yatay kesitler arasında bağımlılık yoktur.

Tablo 4'e bakıldığında, incelenen tüm değişkenlerde %1 anlamlılık düzeyinde yatay kesit bağımlılığının varlığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, örneklemdeki dokuz tekstil firmasının ortak makroekonomik etkenlere eşzamanlı olarak maruz kaldığını göstermekte olup, klasik birinci nesil panel veri tahmin yöntemleri yerine yatay kesit bağımlılığını hesaba katan ikinci nesil tekniklerin (CIPS birim kök testi, CCEMG tahmincisi vb.) kullanılması gerektiğine dair güçlü bir istatistiksel dayanak oluşturmaktadır.

Tablo 5. CIPS Birim Kök Testi Sonuçları

Değişken	Model	t-bar	Kritik Değer (%5)	p-değeri	Sonuç
ROA	Sabit	-2,989	-2,330	0,000	Durağan I(0)
ROE	Sabit	-2,753	-2,330	0,001	Durağan I(0)
KVB	Sabit+Trend	-2,837	-2,860	0,044	Durağan I(0)
UVB	Sabit	-2,520	-2,330	0,009	Durağan I(0)
SBY	Sabit	-3,492	-2,330	0,000	Durağan I(0)
lnAKT (düzey)	Sabit+Trend	-1,795	-2,860	0,456	Durağan değil
lnAKT (birinci fark)	Sabit	-3,459	-2,330	0,000	Durağan I(1)
CAR (düzey)	Sabit+Trend	-1,876	-2,860	0,919	Durağan değil
CAR (birinci fark)	Sabit	-3,217	-2,330	0,000	Durağan I(1)

Not: H0: seri birim kök içermektedir (durağan değildir).

Tablo 5'te yatay kesit bağımlılığını dikkate alan Pesaran (2007) CIPS testi sonuçları görülmektedir. ROA, ROE, KVB, UVB ve SBY değişkenlerinin tamamı düzeyde durağan [I(0)] bulunmuştur. Buna karşın firma büyüklüğünü temsil eden lnAKT ve likiditeyi temsil eden cari oran değişkenlerinin gerek sabit terimli gerekse sabit terim ve trend içeren model spesifikasyonlarında düzeyde durağan olmadığı tespit edilmiştir. Söz konusu iki değişkenin birinci farkları alındığında ise her ikisinin de %1 düzeyinde anlamlı biçimde durağan hale geldiği görülmüş (lnAKT için t-bar=-3,459; CAR için t-bar=-3,217, her ikisi de p=0,000) ve bu nedenle nihai model tahmininde bu iki değişken birinci fark biçiminde (lnAKT, CAR)

kullanılmıştır. lnAKT ve CAR değişkenlerinin düzeyde I(1) olması, Pesaran'ın (2006) CCE tahmincisinin asimptotik geçerliliği için öngördüğü durağan regresör varsayımı gereği, bu değişkenlerin CCEMG modeline dâhil edilmeden önce durağan hale getirilmesini gerekli kılmıştır. Nitekim söz konusu iki değişken, STDA/UVB/ROA/ROE gibi diğer I(0) değişkenlerle birlikte fark alınmış I(0) haliyle modele dâhil edilmiştir (Pesaran, 2006).

Tablo 6. Eğim Homojenliği (Δ) Testi Sonuçları

Model	Delta	p-değeri	Düzeltilmiş Delta (adj.)	p-değeri
ROA = f(KVB, UVB, lnAKT, SBY, CAR)	3,698	0,000	4,325	0,000
ROE = f(KVB, UVB, lnAKT, SBY, CAR)	5,136	0,000	6,008	0,000

Not: H0: eğim katsayıları homojendir.

Tablo 6'da Pesaran ve Yamagata (2008) eğim homojenliği testi sonuçları sunulmuştur. Hem ROA hem de ROE modelinde homojenlik varsayımını %1 anlamlılık düzeyinde reddetmektedir. Bu bulgu, kaldıraç oranlarının ve kontrol değişkenlerinin kârlılık üzerindeki etkisinin firmadan firmaya istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklılaştığını yani tüm firmalar için tek bir ortak eğim katsayısı varsayan klasik sabit etkiler ya da rassal etkiler modellerinin bu veri seti için uygun olmadığını ortaya koymaktadır. Ortaya çıkan bu sonuç, firma bazında heterojen eğimlere izin veren CCEMG tahmincisinin seçimini doğrudan gerekçelendirmektedir.

Ön test aşamasında tespit edilen yatay kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliği bir arada değerlendirilerek nihai tahmin yöntemi olarak belirlenen CCEMG tahmincisinden elde edilen bulgular Tablo 7'de sunulmuştur. Her iki model için de hesaplanan Wald ki-kare istatistiği istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş (ROA modeli için χ^2=77,48, p<0,001; ROE modeli için χ^2=36,47, p<0,001), bu da her iki modelin de bir bütün olarak açıklayıcı gücünün yeterli düzeyde olduğunu göstermektedir. Kesitler arası ortalama terimlerinin her iki modelde de yüksek düzeyde anlamlı çıkması (sırasıyla p<0,001 ve p=0,001), ortak faktörlerin modele dahil edilmesinin isabetli bir tercih olduğunu yani dolayısıyla CCEMG'nin öngördüğü şekilde firmaların ortak makroekonomik şoklardan önemli ölçüde etkilendiğini doğrulamaktadır.

Tablo 7. CCEMG Tahmin Sonuçları

Değişken	ROA Katsayı	p-değeri	ROE Katsayı	p-değeri
KVB	-0,213***	0,004	-0,491**	0,040
UVB	-0,299***	0,002	-0,705*	0,052
lnAKT	8,625***	0,001	20,372***	0,006
SBY	0,039*	0,100	0,087	0,156
CAR	1,702	0,176	3,556	0,390
Sabit	1,063	0,752	-4,780	0,533
Wald χ^2	**77,48**	**0,000**	**36,47**	**0,000**
Gözlem / Grup	225 / 9		225 / 9	

*Not: ***:p<0,01; **:p<0,05; *:p<0,10.*

Çalışmanın temel araştırma sorusunu oluşturan kaldıraç değişkenlerine bakıldığında, hem KVB hem de uzun vadeli borçlanmanın UVB firma kârlılığı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve negatif bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. ROA modelinde KVB katsayısı -0,213 (p=0,004), UVB katsayısı ise -0,299 (p=0,002) olarak tahmin edilmiştir. ROE modelinde de aynı yönde, KVB için -0,491 (p=0,040) ve UVB için -0,705 (p=0,052; %10 düzeyinde anlamlı) katsayıları elde edilmiştir. Katsayıların büyüklüğü karşılaştırıldığında, UVB'nin ROA

üzerindeki etkisinin KVB'ye göre görece daha güçlü olduğu (-0,299'a karşı -0,213) görülmektedir ki nitekim uzun vadeli borçlanmanın sabit faiz yüküyle firmayı daha uzun bir döneme bağlaması ve konjonktürel dalgalanmalar karşısında esneklik kaybına yol açmasıyla açıklanabilir.

Firma büyüklüğündeki değişimi temsil eden lnAKT değişkeni, her iki modelde de istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı ve pozitif bir katsayıyla öne çıkmaktadır (ROA modelinde 8,62, p=0,001; ROE modelinde 20,37, p=0,006). Bu bulgu, aktif büyüklüğünde yıldan yıla gerçekleşen artışın firma kârlılığını güçlü biçimde desteklediğini ortaya koyabilmektedir. SBY değişkeni ROA modelinde sınırda bir anlamlılık düzeyinde (p=0,100) pozitif bir katsayı sergilerken, ROE modelinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Cari orandaki değişimi temsil eden CAR değişkeni ise her iki modelde de istatistiksel olarak anlamlı çıkmamıştır. ROA ve ROE modelleri bir bütün olarak karşılaştırıldığında, tüm açıklayıcı değişkenlerin katsayı büyüklüklerinin ROE modelinde ROA modeline kıyasla yaklaşık iki ila iki buçuk kat daha yüksek olduğu görülmektedir.

Sonuç

Sermaye yapısı, doğrudan ve dolaylı olarak; firmaların finansman maliyetlerini, finansal esnekliklerini ve nihayetinde kârlılık performanslarını etkileyen temel finansal kararlardan biri olmaktadır. Bu çerçevede emek ve rekabetin yoğun olduğu tekstil, giyim ve deri sektöründe bu ilişkinin daha da belirgin biçimde ortaya çıkması beklenmektedir. Özellikle mevsimsellik, işletme sermayesi ihtiyacının yüksekliği ve düşük kâr marjlarıyla çalışma gibi sektöre özgü unsurlar borçlanma vadesi tercihinin kârlılık üzerindeki etkisinin ayrıca incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Bu teorik çerçeve doğrultusunda çalışmada, Borsa İstanbul'da 2000-2025 döneminde kesintisiz işlem gören dokuz tekstil, giyim ve deri firmasının (BOSSA, DERİM, KORDS, KRTEK, LUKSK, MNDRS, SKTAS, YATAS, YUNSA) verileri kullanılarak sermaye yapısının firma kârlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Literatürdeki mevcut çalışmaların önemli bir bölümünde sermaye yapısının tek bir toplam kaldıraç oranı üzerinden temsil edildiği görülmüştür. Bu çalışmada ise kısa vadeli borçlanma (KVB) ile uzun vadeli borçlanma (UVB) ayrı değişkenler olarak modele dâhil edilerek borçlanma vadesinin kârlılık üzerindeki etkisinin farklılaşıp farklılaşmadığı ayrıca sınanmıştır.

Analiz sürecinde yapılan panel veri testleri, değişkenlerin büyük ölçüde durağan bir yapıya sahip olduğunu, buna karşın güçlü bir yatay kesit bağımlılığının ve eğim heterojenliğinin bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu özellikler dikkate alınarak nihai tahmin yöntemi olarak Pesaran (2006) tarafından geliştirilen CCEMG tahmincisi tercih edilmiş ve model başarıyla tahmin edilmiştir. Çalışmanın bazı sınırlılıkları olduğu unutulmamalıdır. İlk olarak, örneklem 2000-2025 döneminde kesintisiz veri sağlayan dokuz firmayla sınırlı tutulmuş olup bu durum bulguların tüm sektöre genellenmesini kısıtlayabilir. İkinci olarak, CCEMG tahmincisi firma bazında hesaplanan eğim katsayılarının ortalamasını rapor ettiğinden, firma düzeyindeki heterojen etkilerin ayrıntıları çalışma kapsamında ayrıca sunulmamıştır. Ayrıca çalışmada kaldıracın kârlılık üzerindeki etkisi yalnızca doğrusal biçimde test edilmiş olup kârlılık dağılımının farklı noktalarındaki olası farklılaşması incelenmemiştir.

Nihai tahmin sonuçları hem kısa vadeli hem de uzun vadeli borçlanmanın ROA modelinde istatistiksel olarak anlamlı ve negatif bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (KVB: β=-0,213, p=0,004; UVB: β=-0,299, p=0,002). ROE modelinde de aynı yönde, KVB için β=-0,491 (p=0,040) ve UVB için β=-0,705 (p=0,052) katsayıları elde edilmiştir. Buna göre, KVB ve UVB değişkenlerinde meydana gelecek bir birimlik (puanlık) artışın ROA'yı sırasıyla ortalama %0,213 ve %0,299, ROE'yi ise sırasıyla ortalama %0,491 ve %0,705 oranında azaltmaktadır. Firma büyüklüğündeki değişim (lnAKT) her iki modelde de anlamlı ve pozitif bulunurken, net

satış büyümesi ve likiditedeki değişim değişkenlerinin etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Kısa ve uzun vadeli borcun benzer yönde ve anlamlı çıkması, bu iki borçlanma türünün kârlılık üzerinde birbirinden farklı etkiler oluşturduğunu öne süren Abor (2005) gibi çalışmaların aksine, tekstil, giyim ve deri sektöründe borçlanma vadesinden bağımsız olarak kaldıracın kârlılığı azalttığına işaret etmiştir. Burada kârlılık üzerine farklı etkiler oluşturmasındansa oluşturdukları etki derecelerinin farklılaştığını söylemek yanlış olmayacaktır. Ortaya konan bu sonuç, Acaravcı (2015) ve Özdemir ve Özel (2024) ile Uluyol vd. (2014) çalışmalarıyla örtüşmektedir. Firma büyüklüğündeki artışın kârlılığı desteklemesi ise ölçek ekonomilerinden yararlanma ve sabit maliyetlerin daha geniş bir satış hacmine yayılması gibi mekanizmalarla açıklanabilir. Bununla birlikte bahse konu ilişkilerin nedensellik yönü bu çalışma kapsamında doğrudan test edilmediğinden, kaldıraç düzeyindeki değişimin kârlılıkta doğrudan bir azalışa yol açtığı şeklinde kesin bir çıkarım yapılmaması gerekmektedir. Dolayısıyla elde edilen sonuç, daha çok borçlanma vadesinden bağımsız olarak kaldıracın firma kârlılığıyla olumsuz yönde ilişkilendirildiği şeklinde yorumlanmıştır.

Çalışmanın kapsamı ve elde edilen bulgular birlikte değerlendirildiğinde, gelecekte yapılacak çalışmalarda örneklemin BİST imalat sanayinin diğer alt sektörlerini de kapsayacak şekilde genişletilmesi, firma düzeyindeki heterojen etkilerin AMG gibi tamamlayıcı tahmincilerle ayrıca raporlanması önerilmektedir. Ayrıca panel kantil regresyon gibi yöntemlerle kaldıraç-kârlılık ilişkisinin kârlılık dağılımının farklı noktalarında nasıl değiştiğinin sınanması, elde edilen bulguların farklı açılardan test edilmesine imkân sağlayabilir. Firma yöneticileri açısından, borçlanma vadesi kararlarının alınırken sadece finansman maliyeti değil, kârlılık üzerindeki olası olumsuz etkisi de göz önünde bulundurulması önemli olabilmektedir. Yatırımcıların da kaldıraç oranlarındaki değişimleri tek başına değerlendirmek yerine, firmaların büyüme performansıyla birlikte ele almaları önerilmektedir.

Kaynakça

Abor, J. (2005). The effect of capital structure on profitability: An empirical analysis of listed firms in Ghana. *Journal of Risk Finance, 6*(5), 438–445. https://doi.org/10.1108/15265940510633505

Acaravcı, S. K. (2015). The determinants of capital structure: Evidence from the Turkish manufacturing sector. *International Journal of Economics and Financial Issues, 5*(1), 158–171. https://dergipark.org.tr/en/pub/ijefi/article/352115

Albayrak, A. S., & Akbulut, R. (2008). Karlılığı etkileyen faktörler: İMKB sanayi ve imalat sektörlerinde işlem gören işletmeler üzerine bir inceleme. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, 4*(7), 55–83.

Arslantürk Çöllü, D. (2021). Sermaye yapısının karlılık üzerindeki etkisi: TCMB sektör bilançoları üzerine bir araştırma. *Fiscaoeconomia, 5*(3), 957–977. https://doi.org/10.25295/fsecon.971460

Avcı, E. (2016). Capital structure and firm performance: An application on manufacturing industry. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 38*(1), 15–30. https://doi.org/10.14780/iibd.81334

Azhagaiah, R., & Gavoury, C. (2011). The impact of capital structure on profitability with special reference to IT industry in India. *Managing Global Transitions, 9*(4), 371–392.

Bektöre, S., Çömlekçi, F., & Sözbilir, H. (2018). *Mali Tablolar Analizi* (2 b.). Eskişehir: Nisan Kitabevi.

Chinaemerem, O. C., & Anthony, O. (2012). Impact of capital structure on the financial performance of Nigerian firms. *Oman Chapter of Arabian Journal of Business and Management Review, 34*(969), 1–19.

Düzakın, H. G. (2024). *İşletme Finansmanı* (3 b.). Ankara: Seçkin Yayıncılık.

El-Sayed Ebaid, I. (2009). The impact of capital-structure choice on firm performance: Empirical evidence from Egypt. *The Journal of Risk Finance, 10*(5), 477–487. https://doi.org/10.1108/15265940911001385

Erol, C., & Sarıaslan, H. (2008). *Finansal Yönetim Kavramlar Kurumlar ve İlkeler.* Ankara: Siyasal Kitabevi.

Frank, M. Z., & Goyal, V. K. (2008). *Profits and capital structure* [Çalışma tebliği]. Social Science Research Network. https://doi.org/10.2139/ssrn.1104886

Gill, A., Biger, N., & Mathur, N. (2011). The effect of capital structure on profitability: Evidence from the United States. *International Journal of Management, 28*(4), 3–15.

Hadri, K. (2000). Testing for stationarity in heterogeneous panel data. *The Econometrics Journal, 3*(2), 148–161. https://doi.org/10.1111/1368-423X.00043

Herciu, M., & Ogrean, C. (2017). Does capital structure influence company profitability? *Studies in Business and Economics, 12*(3), 50–62.
İskenderoğlu, Ö., Karadeniz, E., & Atioğlu, E. (2012). Türk bankacılık sektöründe büyüme, büyüklük ve sermaye yapısı kararlarının karlılığa etkisinin analizi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 7*(1), 291–311. https://dergipark.org.tr/tr/pub/oguiibf/issue/5717/76523
İçigen, F. K., & Karaş, G. (2017). İşletme sermayesi yönetiminin karlılık üzerine etkisinin araştırılması. *Kırklareli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 6*(4), 55–60.
Kabakçı, Y. (2008). Sermaye yapısı ile işletme performansı arasındaki ilişki: Gıda sektöründe bir uygulama. *Ege Akademik Bakış Dergisi, 8*(1), 167–182.
Omağ, A. (2015). Finansal kaldıraç derecesi ve seçilmiş sektörlere yönelik bir uygulama. *Maliye Finans Yazıları*, (103), 205–218.
Özdemir, B., & Özel, Ö. (2024). The effect of capital structure on profitability: Evidence from the Turkish manufacturing companies. *Verimlilik Dergisi, 58*(1), 45–60. https://doi.org/10.51551/verimlilik.1295705
Pesaran, M. H. (2004). *General diagnostic tests for cross-section dependence in panels* (CESifo Working Paper No. 1229). CESifo. https://ssrn.com/abstract=572504
Pesaran, M. H. (2006). Estimation and inference in large heterogeneous panels with a multifactor error structure. *Econometrica, 74*(4), 967–1012. https://doi.org/10.1111/j.1468-0262.2006.00692.x
Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics, 22*(2), 265–312. https://doi.org/10.1002/jae.951
Pesaran, M. H., & Yamagata, T. (2008). Testing slope homogeneity in large panels. *Journal of Econometrics, 142*(1), 50–93. https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2007.05.010
Salim, M., & Yadav, R. (2012). Capital structure and firm performance: Evidence from Malaysian listed companies. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 65*, 156–166. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.11.105
Say, S., & Doğan, M. (2022). Kısa Vadeli Borçlanmanın Aktif Karlılığı Üzerindeki Etkisi: BIST Sınai Endeksi Örneği. *İşletme Araştırmaları Dergisi, 14*(2), s. 1581-1589. doi:0.20491/isarder.2022.1458
Uluyol, O., Lebe, F., & Akbaş, Y. E. (2014). Firmaların finansal kaldıraç oranları ile öz sermaye karlılığı arasındaki ilişki: Hisseleri Borsa İstanbul (BİST)'da işlem gören şirketler üzerinde sektörler bazında bir araştırma. *İşletme Araştırmaları Dergisi, 6*(1), 70–89.
Vătavu, S. (2015). The impact of capital structure on financial performance in Romanian listed companies. *Procedia Economics and Finance*, (32), 1314–1322. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01508-7
Vuković, B., & Jaksic, D. (2019). The effect of working capital management on profitability: Evidence from southeast Europe. *Ekonomika poljoprivrede, 66*(1), s. 159-172. doi:10.5937/ekoPolj1901159V
Yerdelen Tatoğlu, F. (2021). *Panel veri ekonometrisi: Stata uygulamalı* (6. Baskı). Beta Basım Yayım.
Yerdelen Tatoğlu, F. (2023). *İleri panel veri analizi: Stata uygulamalı* (5. Baskı). Beta Basım Yayım.

TÜRKİYE-BULGARİSTAN SINIR ÖTESİ İŞBİRLİĞİ PROJELERİNİN EDİRNE VE KIRKLARELİ İLLERİNE EKONOMİK, SOSYO-KÜLTÜREL VE ÇEVRESEL KATKILARI

Prof. Dr. Emel GÖNENÇ GÜLER
Trakya University, Faculty of Apllied Sciences, Department of Tourism Management, Ayşekadın – Edirne
ORCID ID: 0000-0002-3214-0206

ÖZET

Bu çalışma, Avrupa Birliği (AB) Katılım Öncesi Yardım Aracı (IPA)-"EU Bulgaria-Türkiye IPA -Crossborder Programme" kapsamında yürütülen Türkiye-Bulgaristan Sınır Ötesi İşbirliği (SÖİ) programlarının, Türkiye'nin Avrupa'ya açılan sınır illeri olan Edirne ve Kırklareli üzerindeki ekonomik, sosyo-kültürel ve çevresel etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Coğrafik tanımlamalarda sınır bölgeleri, ülkenin merkezine uzak ve sosyoekonomik açıdan dezavantajlı alanlar olarak kabul edilse de, AB Sınırötesi İşbirliği programları bu bölgeleri uluslararası işbirliğinin ve bölgesel kalkınmanın aktif merkezleri haline getirmek için önemli desteklerde bulunmaktadır. Bu nitel çalışmada, doküman analizi yöntemi kullanılarak IPA projelerinin ilk uygulama döneminden 2007-2013, ikinci dönem 2014-2020 ve üçüncü dönem olan 2021-2027 (IPA I, II, III) dönemlerine ait proje raporları, bölgesel kalkınma planları ve akademik literatür incelenmiştir. Elde edilen bulgular, projelerin Edirne ve Kırklareli illerine üç ana boyutta derinlemesine katkı sağladığını göstermektedir. Ekonomik olarak; kentsel ve ekoturizm altyapısı güçlendirilmiş, KOBİ'ler arası sınır ötesi ticaret ağları kurulmuş ve yerel istihdama özellikle proje yönetimi alanında doğrudan katkı sağlanmıştır. Sosyokültürel boyutta; Edirne'nin zengin tarihi dokusu ile Kırklareli'nin somut olmayan kültürel mirası sınır ötesi fonlarla canlandırılmış, gençler ve sivil toplum kuruluşları arasında kurulan ağlar sayesinde iki yaka arasındaki tarihsel önyargılar kırılarak toplumsal entegrasyon desteklenmiştir. Çevresel açıdan ise; özellikle Meriç, Tunca ve Arda nehirlerindeki yıkıcı taşkın risklerine karşı kurulan ortak erken uyarı sistemleri ile Istranca (Yıldız) Dağları'ndaki olağanüstü biyoçeşitliliğin korunmasına yönelik projeler, bölgesel ekolojik sürdürülebilirlik adına önemli kazanımlar sağlamıştır. Ancak, hibe süreçlerinin tamamlanmasının ardından projelerin finansal ve kurumsal sürdürülebilirliğinin sağlanmasında çeşitli yapısal ve bürokratik zorluklar tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Türkiye-Bulgaristan SÖİ programları, Edirne ve Kırklareli illerinin bölgesel rekabet gücünü artıran, çevresel krizlere karşı direncini yükselten ve sınır komşu ülkeleriyle ilişkileri kurumsallaştıran bir moderatör işlevini üstlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sınır Ötesi İşbirliği, Edirne-Kırklareli, Bölgesel Kalkınma.

ECONOMIC, SOCIO-CULTURAL, AND ENVIRONMENTAL CONTRIBUTIONS OF TURKEY-BULGARIA CROSS-BORDER COOPERATION PROJECTS TO EDIRNE AND KIRKLARELI PROVINCES

ABSTRACT

This study aims to comprehensively examine the economic, socio-cultural, and environmental impacts of the Turkey-Bulgaria Cross-Border Cooperation (CBC) programs, executed under the European Union (EU) Instrument for Pre-accession Assistance (IPA), on Edirne and Kırklareli—Turkey's gateway provinces to Europe. Although border regions are traditionally

characterized as remote and socio-economically disadvantaged areas, EU CBC programs provide critical support to transform these territories into active hubs of international cooperation and regional development. Utilizing a qualitative document analysis methodology, this research reviews project reports, regional development plans, and academic literature spanning the three implementation periods of IPA projects: 2007-2013 (IPA I), 2014-2020 (IPA II), and 2021-2027 (IPA III).
The findings indicate that these projects have profoundly contributed to Edirne and Kırklareli across three primary dimensions:

- **Economic:** Urban and eco-tourism infrastructures have been fortified, cross-border trade networks among SMEs have been established, and direct contributions to local employment—particularly in project management—have been achieved.
- **Socio-cultural**: Edirne's rich historical fabric and Kırklareli's intangible cultural heritage have been revitalized through cross-border funding. Furthermore, networks fostered among youth and non-governmental organizations have helped dismantle historical prejudices, thereby promoting cross-border social integration.
- **Environmental:** The establishment of joint early warning systems to mitigate destructive flood risks in the Meriç, Tunca, and Arda rivers, alongside biodiversity conservation initiatives in the Strandzha (Yıldız) Mountains, has yielded significant gains for regional ecological sustainability.

Despite these advancements, the study identifies various structural and bureaucratic challenges in ensuring the financial and institutional sustainability of these projects post-funding. Ultimately, the Turkey-Bulgaria CBC programs serve as a vital moderator that enhances the regional competitiveness of Edirne and Kırklareli, bolsters their resilience against environmental crises, and institutionalizes bilateral relations with neighboring countries.
Keywords: Cross-Border Cooperation, Edirne-Kırklareli, Regional Development.

1. GİRİŞ VE KURAMSAL ÇERÇEVE

Tarihsel ve coğrafi bağlamda sınır bölgeleri, ulusal idari merkezlere olan fiziki uzaklıkları ve siyasi sınırlamalar sebebiyle genellikle "marjinal veya periferik (çevre) alanlar" olarak tanımlanmıştır (Ansell vd., 1997; Perkmann, 2003). Ancak küreselleşme dalgası ve Avrupa Birliği'nin bütünleşme politikaları doğrultusunda sınır kavramı, ayrıştıran bir çizgi olmaktan çıkarak uluslararası etkileşimin ve bölgesel kalkınmanın merkezinde yer alan bir "kalkınma koridoru" niteliği kazanmıştır (Cappellin & Batey, 1993).

Sınır Ötesi İşbirliği (SÖİ) mekanizmaları; coğrafi açıdan birbirine bitişik olan fakat idari ve siyasi sınırlarla ayrılmış yerel aktörlerin ortak sorunlara ortak çözümler üretmesini hedefler (Timothy, 2001). Türkiye'nin Avrupa kara sınırını oluşturan Edirne ve Kırklareli illeri, Bulgaristan'ın Haskova, Yambol ve Burgaz idari bölgeleriyle doğrudan komşudur. Edirne zengin Osmanlı mimari mirası ve tarihi kimliğiyle, Kırklareli ise Istranca (Yıldız) Dağları'nın zengin biyoçeşitliliği, kıyı ekosistemleri ve somut olmayan kültürel mirasıyla bölgesel kalkınmada kilit bir konuma sahiptir.

Katılım Öncesi Yardım Aracı (IPA) bünyesinde yürütülen Türkiye-Bulgaristan SÖİ Programı (IPA I: 2007-2013, IPA II: 2014-2020 ve Interreg VI-A IPA III: 2021-2027), bu iki ilin bölgesel rekabet gücünü artırmada temel finansal kaldıraç görevi üstlenmektedir (Dışişleri Bakanlığı AB Başkanlığı, 2021). Bu çalışmanın amacı; IPA fonlarının Edirne ve Kırklareli illerine sağladığı ekonomik, sosyo-kültürel ve çevresel katkıları bütüncül bir yaklaşımla analiz etmektir.

2. YÖNTEM VE VERİ KAYNAKLARI

Bu çalışmada, nitel araştırma tasarımlarından doküman analizi ve durum çalışması (*case study*) yöntemleri benimsenmiştir (Krippendorff, 2018; Yin, 2017).

Veri toplama sürecinde üç temel kaynaktan yararlanılmıştır:

1. **Resmi Belgeler ve Program Rehberleri:** AB Başkanlığı, Bulgaristan Bölgesel Kalkınma Bakanlığı ile Ortak Teknik Sekretarya tarafından yayımlanan IPA I, II ve III dönemlerine ait hibe çağrı rehberleri, proje değerlendirme ve izleme raporları (Dışişleri Bakanlığı AB Başkanlığı, 2021).
2. **Kurumsal Strateji Belgeleri:** Trakya Kalkınma Ajansı'nın TR21 Bölge Planı raporları, Edirne ve Kırklareli İl Kültür ve Turizm Müdürlükleri verileri (Edirne İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2024; Trakya Kalkınma Ajansı, 2023).
3. **Akademik Literatür:** Bölgesel kalkınma, sınır ötesi işbirliği ve çevre yönetimi odaklı ulusal ve uluslararası akademik yayınlar.

Elde edilen veriler; "Ekonomik Kazanımlar", "Sosyo-Kültürel Etkileşim" ve "Çevresel ve Ekolojik Sürdürülebilirlik" boyutları altında tematik içerik analizine tabi tutulmuştur.

3. PROGRAMLAMA DÖNEMLERİ VE SÖİ MİKTARSAL GÖSTERGELERİ

Türkiye-Bulgaristan SÖİ Programı, 2007 yılından bu yana düzenli bütçe tahsisatlarıyla sürdürülmektedir. Edirne ve Kırklareli illerindeki kamu kurumları, belediyeler, üniversiteler ve STK'lar kanalıyla hayata geçirilen projelerin mali yapısı Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Programlama Dönemlerine Göre Edirne ve Kırklareli İllerine Yönelik Fon Tahsisat Yapısı

Programlama Dönemi	Toplam Program Bütçesi (€)	Edirne ve Kırklareli Paydaşlarının Kullandığı Tahmini Hibe (€)	Temel Yatırım ve Uygulama Odakları
IPA I (2007–2013)	~31,7 Milyon	~11,2 Milyon	Küçük ölçekli turizm altyapısı, tarihi restorasyon, ortak çevre koruma.
IPA II (2014–2020)	~29,9 Milyon	~14,5 Milyon	Sürdürülebilir turizm, gençlik ağları, ekoturizm rotaları, afete hazırlık.
IPA III (2021–2027)	~34,4 Milyon	~12,0 Milyon *(Devam Ediyor)*	Döngüsel ekonomi, yeşil dönüşüm, Istranca biyoçeşitliliği, akıllı teknolojiler.

Kaynak: *Dışişleri Bakanlığı AB Başkanlığı ve Trakya Kalkınma Ajansı verilerinden derlenmiştir.*

4. BÖLGESEL KAZANIMLARIN BOYUTLARI

4.1. Ekonomik Katkılar: Turizm Altyapısı, KOBİ'ler ve İstihdam

SÖİ projeleri, Edirne ve Kırklareli'nin ekonomik dinamiklerine doğrudan katkı vermiştir.

- **Turizm ve Ekoturizm Altyapısı:** Edirne'de tarihi kentsel dokunun ihyası ve rekreasyon alanlarının düzenlenmesi; Kırklareli'de ise Demirköy Dupnisa Mağarası çevresi, İğneada longoz ormanları ekoturizm rotaları ve Vize'deki saklı kültür mirası noktaları altyapı hibeleriyle turizme kazandırılmıştır.
- **KOBİ Ağları ve Ticaret:** İki ildeki Ticaret ve Sanayi Odaları ile Bulgar KOBİ'leri arasında kurulan eşleştirme ağları, sınır ötesi fuar organizasyonları ve ticari işbirlikleriyle bölgesel ticaret hacmi yükseltilmiştir.

- **Yerel İstihdam ve Proje Kapasitesi:** Proje yönetimi, yerel zanaatkarlık ve rehberlik alanlarında yüzlerce kişiye sertifikalı eğitim verilerek nitelikli işgücü stoku artırılmıştır (Leonardi, 1995).

4.2. Sosyo-Kültürel Katkılar: Mirasın İhyası ve Toplumsal Entegrasyon

SÖİ programlarının en belirgin etkilerinden biri sınırın iki tarafındaki toplumsal yakınlaşmadır (Hall, 2005):

- **Kültürel Mirasın İhyası:** Edirne'deki anıtsal mimari eserler ve tarihi konaklar restore edilirken; Kırklareli'nin somut olmayan kültürel mirası (dokumacılık, bağcılık, yerel gastronomi ritüelleri) sınır ötesi tematik rotalara dönüştürülmüştür.
- **Önyargıların Kırılması ve Ağ Oluşturma:** Gençlik kampları, kültür festivalleri ve STK ortaklıkları vasıtasıyla iki komşu ülke halkı arasındaki tarihsel bariyerler esnetilmiş, kurumsal entegrasyon desteklenmiştir.

4.3. Çevresel Katkılar: Nehir Taşkın Erken Uyarı Sistemleri ve Istranca Biyoçeşitliliği

Çevre yönetimi, sınır ötesi işbirliğinin zorunlu olduğu en kritik boyuttur (Ioannides vd., 2006):

- **Taşkın Erken Uyarı ve Afet Yönetimi:** Edirne ve Kırklareli'de can ve mal kayıplarına yol açan Meriç, Tunca ve Arda nehir taşkınlarına karşı Bulgaristan makamlarıyla ortak debi izleme ve taşkın erken uyarı otomasyon sistemleri kurulmuştur.
- **Istranca (Yıldız) Dağları Biyoçeşitlilik Koruma:** Türkiye ve Bulgaristan tarafına yayılan Istranca Dağları ekosisteminin, endemik bitki türlerinin ve yaban hayatının korunmasına yönelik ortak haritalandırma, habitat koruma ve ekolojik farkındalık projeleri yürütülmüştür.

5. TARTIŞMA VE YAPISAL KISITLAR

Elde edilen geniş kapsamlı kazanımlara rağmen, SÖİ projelerinin uygulanmasında bir dizi kurumsal ve bürokratik kısıtla karşılaşılmaktadır (Tosun, 2000).

Tablo 2: SÖİ Proje Süreçlerinin SWOT Analizi

Güçlü Yönler (Strengths)	**Zayıf Yönler (Weaknesses)**
• Doğrudan hibe desteği. • Doğal ve kültürel mirasın korunması. • Sınır ötesi ortak afet yönetimi.	• Proje bitimi sonrası mali sürdürülebilirlik eksikliği. • KDV muafiyeti ve ihale bürokrasisi. • Kurumlarda yüksek personel devir hızı.
Fırsatlar (Opportunities)	**Tehditler (Threats)**
• AB Yeşil Mutabakatı ekolojik hibe imkanları. • Yeşil ve dijital turizm koridorları.	• Vize rejiminin turist geçişlerinde yarattığı asimetri. • Makroekonomik dalgalanmalar ve finansman riskleri.

(Kaynak: Doküman analizi bulgularından derlenmiştir)

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye-Bulgaristan Sınır Ötesi İşbirliği Programları; Edirne ve Kırklareli illerinin ekonomik canlılığını artıran, kültürel zenginliğini iade eden ve ekolojik krizlere karşı direncini yükselten stratejik bir bölgesel kalkınma aracıdır.

Gelecek programlama dönemlerinde (2021-2027 / IPA III ve sonrası) verimliliği artırmak adına şu adımlar atılmalıdır:

1. **Sürdürülebilirlik İzleme Fonu:** Tamamlanan projelerin (web portalları, rotalar, erken uyarı cihazları) bakım ve idamesi için Trakya Kalkınma Ajansı bünyesinde izleme ve devam fonları oluşturulmalıdır.
2. **KOBİ Katılımının Artırılması:** Yerel işletmelerin ve KOBİ'lerin hibe projelerindeki payı artırılarak özel sektörün bölgesel kalkınmaya entegrasyonu sağlanmalıdır.
3. **Sınır Kapılarında Lojistik ve Turizm Kolaylığı:** Vize prosedürleri ve kapı geçiş sürelerinden kaynaklanan asimetrileri giderecek idari düzenlemeler hayata geçirilmelidir.

KAYNAKÇA

1. Ansell, C. K., Parsons, C. A., & Dardanelli, P. (1997). Dual networks in European regional development policy. *Journal of Common Market Studies*, 35(3), 347-375.
2. Cappellin, R., & Batey, P. W. (Eds.). (1993). *Regional networks, border regions and European integration*. London: Pion Ltd.
3. Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). Thousand Oaks: SAGE Publications.
4. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı. (2021). *Interreg-IPA Bulgaristan - Türkiye Sınır Ötesi İşbirliği Programı dokümanları ve uygulama rehberi*. Ankara: AB Başkanlığı Yayınları.
5. Edirne İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (2024). *Edirne ili turizm istatistikleri ve sınır kapıları verileri raporu*. Edirne: Valilik Yayınları.
6. Hall, D. R. (2005). Tourism and regional development in new Europe. *International Journal of Tourism Research*, 7(5), 269-277.
7. Ioannides, D., Nielsen, P. A., & Billing, P. (2006). Transboundary collaboration in tourism: The case of the Bothnian Arc. *Tourism Geographies*, 8(2), 122-142.
8. Krippendorff, K. (2018). *Content analysis: An introduction to its methodology* (4th ed.). Thousand Oaks: SAGE Publications.
9. Leonardi, R. (1995). *Convergence, cohesion and integration in the European Union*. London: Macmillan Press.
10. Perkmann, M. (2003). Cross-border regions in Europe: Significance and drivers of regional cross-border co-operation. *European Urban and Regional Studies*, 10(2), 153-171.
11. Timothy, D. J. (2001). *Tourism and political boundaries*. London: Routledge.
12. Tosun, C. (2000). Limits to community participation in the tourism development process in developing countries. *Tourism Management*, 21(6), 613-633.
13. Trakya Kalkınma Ajansı. (2023). *TR21 Trakya Bölgesi turizm master planı ve AB hibe değerlendirme raporu*. Tekirdağ: TRAKYAKA Yayınları.
14. Yin, R. K. (2017). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). Thousand Oaks: SAGE Publications.

AVRUPA BİRLİĞİ SINIR ÖTESİ İŞBİRLİĞİ PROJELERİNİN EDİRNE TURİZM SEKTÖRÜNE KATKISI: TEKLİF ÇAĞRILARI VE PROJELER ÜZERİNDEN BİR DEĞERLENDİRME

Prof. Dr. Emel GÖNENÇ GÜLER
Trakya University, Faculty of Applied Sciences, Department of Tourism Management, Ayşekadın – Edirne
ORCID ID: 0000-0002-3214-0206

ÖZET

Bu bildirinin temel hedefi, Avrupa Topluluğu Sınır Ötesi İşbirliği (SOİ) çerçevesinde hayata geçirilen çalışmaların Edirne destinasyonundaki turizm hareketliliğine sunduğu somut ve soyut kazanımları; IPA I, IPA II ve güncel INTERREG VI-A (2021–2027) süreçlerindeki hibe duyuruları, tahsis edilen mali fonlar ile proje çıktıları üzerinden analiz etmektir. Türkiye'nin en batı noktasında Bulgaristan ve Yunanistan Avrupa sınırında yer alan Edirne, sahip olduğu zengin tarihsel, kültürel ve doğal değerlerle bölgesel turizm alanında önemli bir role sahiptir. Avrupa Birliği Katılım Öncesi Yardım Fonu (IPA) desteğiyle yürütülen Türkiye-Bulgaristan Sınır Ötesi İşbirliği süreci, Edirne'nin turist çekme kapasitesinin artırılmasında kalıcı bir finansal ve yönetimsel zemin hazırlamıştır.

Bu çalışmada karma araştırma tasarımı benimsenmiş; hibe çağrı metinleri, proje maliyet tabloları, faaliyet raporları ve resmi kurum istatistikleri veritabanı taranmıştır. Bulgular, geçmişten günümüze uzanan süreçte başta turizm olmak üzere, fiziki altyapı ve çevre temalı uygulamalara Edirne paydaşları kanalıyla 20 milyon Avro'yu aşan bir sermaye aktarıldığını doğrulamaktadır. Kente yapılan bu katkılarla, Edirne'yi ziyaret eden yabancı turist sayısında 2010-2025 döneminde belirgin bir yükseliş fırsatı sağlamıştır. Buna ek olarak, 15'i aşkın kültür varlığının yeniden ihya edildiği, 25 sınır ötesi seyahat güzergahının dizatn edildiği, akıllı destinasyon teknolojilerinin entegre edildiği ve turizm sektörüyle ilgi çok sayıda kişiye mesleki formasyon kazandırıldığı belirlenmiştir. Özetle, sağlanan bu hibeler, Edirne turizmi için yalnızca bir finansman aracı değil; turistik ürün yelpazesinin genişletilmesi, sürdürülebilir turizm ve bölgesel kalkınmanın sağlanması adına yüksek katma değerli bir dinamiktir.

Anahtar Kelimeler: Edirne Turizmi, Sınır Ötesi İşbirliği, AB Projeleri.

EUROPEAN UNION CROSS-BORDER COOPERATION PROJECTS' CONTRIBUTION TO EDIRNE'S TOURISM SECTOR: AN EVALUATION THROUGH CALLS FOR PROPOSALS AND PROJECTS

ABSTRACT

This study aims to analyze the tangible and intangible contributions of the projects executed within the framework of the European Union Cross-Border Cooperation (CBC) to tourism activity in the destination of Edirne. The evaluation is conducted through call for proposals, allocated financial funds, and project outputs across IPA I, IPA II, and the current INTERREG VI-A (2021–2027) programming periods. Situated on the European border with Bulgaria and Greece at Turkey's westernmost point, Edirne holds a strategic role in regional tourism owing to its rich historical, cultural, and natural assets. Financed under the European Union Instrument for Pre-Accession Assistance (IPA), the Bulgaria–Türkiye Cross-Border Cooperation Programme has established a sustainable financial and managerial foundation for enhancing Edirne's capacity to attract tourists. A mixed-methods research design was employed,

examining call for proposal documents, project budget tables, final evaluation reports, and official institutional statistics databases.
Findings confirm that over 20 million Euros have been channeled into the region via Edirne stakeholders for tourism, physical infrastructure, and environment-themed applications from past to present. These contributions have facilitated a significant upward trend in the number of foreign visitors arriving in Edirne between 2010 and 2025. Furthermore, the analysis reveals that over 15 cultural heritage assets have been restored, 25 cross-border travel itineraries designed, smart destination technologies integrated, and professional training provided to numerous tourism sector representatives. In summary, these provided grants serve not merely as a financing tool for Edirne's tourism, but as a high-value-added dynamic for expanding the range of tourism products, ensuring sustainable tourism, and fostering regional development.
Keywords: Edirne Tourism, Cross-Border Cooperation, EU Projects.

1. GİRİŞ VE KURAMSAL ÇERÇEVE

Sınır bölgeleri, ulusal sınırların oluşturduğu siyasi, hukuki ve idari bariyerler sebebiyle tarihsel süreçte genel ekonomik merkezlerin dışında kalarak çevre (periferik) alan kimliği kazanmış coğrafyalardır (Ansell vd., 1997; Perkmann, 2003). Bu alanlar, genellikle ulusal ekonomilerin uzağında yer almaları dolayısıyla altyapı yatırımlarından ve bütünleşik kalkınma hamlelerinden görece daha az pay almıştır. Ancak 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren hız kazanan küreselleşme eğilimleri ve Avrupa Birliği'nin (AB) kurumsal bütünleşme vizyonu, sınır kavramının anlam dünyasında radikal bir dönüşüme yol açmıştır. Sınırlar artık ayrıştıran, bölen ve katı güvenlik hatlarını ifade eden unsurlar olmaktan çıkarak; sosyo-ekonomik işbirliğinin, mekânsal uyumun ve bölgesel etkileşimin hız kazandığı "kalkınma koridorları" haline gelmiştir (Cappellin ve Batey, 1993).

Bu zihniyet dönüşümünün merkezinde yer alan Sınır Ötesi İşbirliği (SÖİ) programları, coğrafi açıdan bitişik olan fakat idari sınırlarla ayrılan yerel aktörlerin ortak sorunlara ortak çözümler üretmesini hedeflemektedir. SÖİ, bir yandan AB'nin kendi içerisindeki bölgesel gelişmişlik farklarını azaltmayı amaçlarken diğer yandan üye ülkeler ile aday veya komşu ülkeler arasındaki entegrasyonu güçlendiren stratejik bir politika aracıdır. Bu kapsamda turizm sektörü, sınır ötesi etkileşimin en hızlı gerçekleştiği, çarpan etkisi en yüksek ve yerel halk düzeyinde doğrudan hissedilebilir çıktı üreten ekonomik faaliyetlerin başında gelmektedir (Timothy, 2001; Ioannides vd., 2006). Ortak tarihsel miras, benzer ekolojik havzalar ve kültürel yakınlık, sınırın iki tarafındaki destinasyonların tekil hareket etmek yerine bütünleşik turizm ürünleri ile çoklu destinasyon ve ortak pazarlama stratejileri geliştirmesini zorunlu kılmaktadır (Hall, 2005).

Türkiye'nin Avrupa Birliği'ne kara sınırı olan Edirne ili, Bulgaristan'ın Hasköy (Haskovo), Yambol ve Burgaz bölgeleri ile Yunanistan'ın Doğu Makedonya ve Trakya bölgesiyle doğrudan komşudur. Edirne, Osmanlı İmparatorluğu'na yaklaşık bir asır boyunca başkentlik yapmış olması, UNESCO Dünya Mirası listesinde yer alan Selimiye Camii ve Külliyesi gibi anıtsal mimari Eserleri, Meriç ve Tunca nehirlerinin şekillendirdiği zengin ekosistemi ve zengin gastronomisiyle son derece yüksek bir turizm potansiyeline sahiptir. Katılım Öncesi Yardım Aracı (IPA) ve Interreg programlama çerçeveleri altında yürütülen Türkiye-Bulgaristan Sınır Ötesi İşbirliği Programları, Edirne'nin bu tarihsel ve coğrafi mirasını ekonomik değere dönüştüren en önemli dış finansman kaynağını teşkil etmektedir.

Bu araştırmanın temel amacı; IPA I (2007-2013), IPA II (2014-2020) ve güncel Interreg VI-A Bulgaristan-Türkiye (2021-2027) programlama dönemleri boyunca yayımlanan hibe çağrılarını, tahsis edilen mali kaynakları ve uygulanan Edirne merkezli turizm projelerini incelemektir. Bu doğrultuda hibe kaynaklarının Edirne'deki kentsel/tarihsel altyapıya, ürün

çeşitlendirmesine, akıllı destinasyon uygulamalarına, beşeri sermayeye ve bölgesel turizm hareketliliğine sağladığı nicel ve nitel katkılar sistematik olarak değerlendirilmektedir.

2. YÖNTEM VE VERİ KAYNAKLARI

Bu bildiri, karma araştırma tasarımı prensiplerine uygun olarak kurgulanmıştır (Creswell ve Creswell, 2018). Nicel verilerin sunduğu istatistiksel genellenebilirlik ile nitel verilerin sağladığı derinlemesine olgu analizini birleştiren bu yaklaşım, SÖİ projelerinin Edirne turizmindeki çok boyutlu etkilerini bütüncül bir şekilde ortaya koymayı mümkün kılmıştır. Araştırma süreci, durum çalışması (case study) ve doküman analizi yöntemlerinin eşzamanlı kullanımıyla yürütülmüştür (Yin, 2017).

Çalışmada kullanılan veriler dört ana kaynaktan derlenmiştir:

- **Resmi Program Dokümanları ve Çağrı Metinleri:** T.C. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı, Bulgaristan Bölgesel Kalkınma ve Bayındırlık Bakanlığı ile Ortak Teknik Sekretarya tarafından yayımlanan IPA I, IPA II ve Interreg VI-A Program Rehberleri, Hibe Duyuruları (Call for Proposals) ve Proje Seçim Raporları.
- **Proje İdari ve Mali Çıktıları:** Edirne Valiliği, Edirne Belediyesi, Trakya Üniversitesi, Edirne İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, Edirne Ticaret ve Sanayi Odası ile kentte faaliyet gösteren sivil toplum kuruluşları (STK) tarafından yürütülen nihai proje kapanış raporları, bütçe gerçekleşme tabloları ve fiziki envanter kayıtları.
- **Kurumsal ve Sektörel İstatistikler:** T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Edirne İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü verileri ile Kapıkule, Pazarkule ve Hamzabeyli Hudut Kapıları Giriş-Çıkış İstatistikleri (2010-2025 dönemi).
- **Saha Görüşmeleri ve İçerik Analizi:** Tamamlanan projelerin sürdürülebilirliğini değerlendirmek üzere yerel proje koordinatörleri ve sektör temsilcileriyle gerçekleştirilen mülakat metinleri.

Toplanan nitel ve nicel veriler, "Fiziki Altyapı ve Miras Restorasyonu", "Sınır Ötesi Rotalar ve Ürün Çeşitlendirmesi", "Akıllı Destinasyon ve Dijitalleşme" ile "Beşeri Kapasite ve Yönetişim" ana temaları altında kategorize edilerek içerik analizine tabi tutulmuştur (Krippendorff, 2018).

3. AB SINIR ÖTESİ İŞBİRLİĞİ PROGRAMLARI VE EDİRNE MALİ TABLOSU

3.1. Programlama Dönemleri ve Fon Tahsisat Yapısı

Türkiye-Bulgaristan Sınır Ötesi İşbirliği Programı, 2007 yılından bu yana kesintisiz olarak yürütülen ve üç temel bütçe dönemini kapsayan kurumsal bir hibe mekanizmasıdır. Programın kurumsal evrimi, hibe bütçeleri ve turizm odaklı öncelik alanlarının dağılımı Tablo 1'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 1: Programlama Dönemleri, Toplam Bütçe Dağılımı ve Turizm Temalı Tahsisatlar

Programlama Dönemi	Resmi Program Adı	Toplam Program Bütçesi (€)	Turizm ve Çevre Payı (%)	Edirne Paydaşlarına Aktarılan Tahmini Fon (€)	Temel Odak Alanları
2007 - 2013 (IPA I)	IPA CBC Bulgaristan - Türkiye Programı	31.725.642	%45	~6.200.000	Küçük ölçekli altyapı, tarihi miras koruma, ortak çevre izleme
2014 - 2020 (IPA II)	Interreg-IPA CBC Bulgaristan - Türkiye Programı	29.929.259	%50	~8.100.000	Sürdürülebilir turizm, kültürel rotalar, gençlik ve spor, ortak tanıtım

Programlama Dönemi	Resmi Program Adı	Toplam Program Bütçesi (€)	Turizm ve Çevre Payı (%)	Edirne Paydaşlarına Aktarılan Tahmini Fon (€)	Temel Odak Alanları
2021 - 2027 (Interreg VI-A)	Interreg VI-A IPA Bulgaristan - Türkiye Programı	34.436.162	%60	~6.500.000 (Devam Ediyor)	Döngüsel ekonomi, yeşil turizm, akıllı destinasyon, bölgesel çekicilik

Kaynak: *Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı ve Program Bütçe Raporları esas alınarak derlenmiştir.*

3.2. Edirne Turizm İstatistikleri ve Geçiş Trendleri (2010 - 2025)

SÖİ projeleri kanalıyla kente aktarılan mali kaynakların ve yürütülen uluslararası tanıtım faaliyetlerinin Edirne'deki turist hareketliliğine sunduğu katkı, tarihsel veriler üzerinden takip edilebilmektedir. 2010-2025 yılları arasındaki dönemi kapsayan temel turizm göstergeleri Tablo 2'de özetlenmektedir.

Tablo 2: Edirne İli Turizm Hareketliliği ve SÖİ Katkı Göstergeleri (2010 - 2025)

Gösterge / Yıl	2010	2015	2020	2023	2025
Gelen Yabancı Ziyaretçi Sayısı (Kişi)	1.450.000	2.850.000	1.820.000*	5.230.000	5.850.000
Bulgaristan Menşeyli Turist Payı (%)	%35	%42	%51	%64	%66
Konaklama Tesisleri Geceleme Sayısı	480.000	720.000	510.000*	1.420.000	1.650.000
Edirne Merkezli Tamamlanan SÖİ Proje Sayısı	12	48	92	118	135
Edirne Paydaşlarınca Kullanılan Toplam Hibe (€)	~2,1 Milyon	~8,3 Milyon	~14,3 Milyon	~18,2 Milyon	**> 20,8 Milyon**

Kaynak: *Edirne İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü ve Hudut Kapıları Giriş-Çıkış Verileri (2020 verileri COVID-19 pandemisi kısıtlamalarını yansıtmaktadır).*

Veriler incelendiğinde, 2010 yılında 1.450.000 seviyesinde olan kenti ziyaret eden yabancı turist sayısının, SÖİ fonlarının da yarattığı bölgesel çekim ve tanıtım ivmesiyle 2025 yılı itibarıyla 5.8 milyon sınırına dayandığı görülmektedir. Ayrıca Bulgaristan menşeli ziyaretçilerin toplam payının %35'ten %66'ya yükselmesi, sınır ötesi pazarlama ve erişilebilirlik çalışmalarının hedefine ulaştığını teyit etmektedir.

4. EDİRNE TURİZM SEKTÖRÜNE SAĞLANAN KAZANIMLARIN TEMATİK DEĞERLENDİRMESİ

4.1. Taşınır ve Taşınmaz Kültür Mirasının İhyası (Fiziki Altyapı)

Edirne, yüzyıllar boyunca farklı medeniyetlere ev sahipliği yapmış olması sebebiyle olağanüstü bir somut kültür mirası stokuna sahiptir. Ancak bu eserlerin korunması, restore edilmesi ve turizm kullanımına açılması ciddi bütçeler gerektirmektedir. SÖİ programları kapsamındaki küçük ölçekli altyapı hibeleri, kentteki 15'ten fazla tarihi yapının restore edilmesine veya çevre düzenlemesinin yapılmasına imkân tanımıştır.

Bu kapsamda Edirne Belediyesi, Edirne Valiliği ve Trakya Üniversitesi paydaşlığında yürütülen projelerle; tarihi sivil mimarlık örneği konaklar, Osmanlı dönemine ait çeşmeler, bedesten çevresindeki tarihi sokaklar ve Nehir kıyısındaki rekreasyon alanları yeniden ihya edilmiştir. Yapılan müdahaleler sadece tarihi eserleri kurtarmakla kalmamış, bu alanları turistlerin yürüyüş ve ziyaret güzergahlarına dahil ederek kentin geceleme süresini uzatıcı etki yapmıştır.

4.2. Tematik Rotalar ve Ürün Çeşitlendirmesi

Edirne turizminin en temel zafiyetlerinden biri olan "günübirlik ziyaretçi ağırlıklı yapıyı kırma" hedefi, SÖİ projeleri aracılığıyla geliştirilen tematik rotalarla desteklenmiştir (Hall, 2005). Sınırın iki tarafını kapsayacak şekilde dizayn edilen 25 sınır ötesi seyahat güzergahı, turistik ürün çeşitliliğini artırmıştır. Geliştirilen başlıca rotalar şunlardır:

- **Trak Kültür Mirası Rotası:** Trakya bölgesindeki antik Trak yerleşimlerini, dolmenleri ve arkeolojik alanları kapsayan arkeo-turizm güzergahı.
- **Geleneksel El Sanatları ve Gastronomi Koridoru:** Edirne Tava Ciğeri, Kırkpınar Yağlı Güreş ritüelleri, Edirne Kırmızısı (Turkish Red) kök boya sanatı ile Bulgaristan tarafındaki geleneksel bağcılık ve peynir üretim tesislerini birleştiren gastronomi rotası.
- **Ekoturizm ve Doğa Sporları Ağları:** Meriç, Tunca ve Arda nehir havzalarında kano, bisiklet ve kuş gözlemciliği odaklı doğa turizmi koridorları.

4.3. Akıllı Destinasyon Teknolojileri ve Dijitalleşme

Özellikle IPA II ve Interreg VI-A dönemlerinde teklif çağrılarının dijital dönüşüm odağı artırılmıştır. Edirne merkezli turizm projelerinde akıllı teknoloji entegrasyonu başarıyla uygulanmıştır. Projeler kapsamında Selimiye Camii, II. Bayezid Külliyesi Sağlık Müzesi, Yambol Bedesteni ve Haskova Müzesi gibi odak noktaları için Sanal Gerçeklik (VR) ve Artırılmış Gerçeklik (AR) uygulamaları geliştirilmiştir. Ayrıca çok dilli (Türkçe, Bulgarca, İngilizce) mobil destinasyon rehberleri hazırlanmış, tarihi destinasyon noktalarına QR kodlu bilgi panoları yerleştirilmiştir.

4.4. Beşeri Kapasite, Mesleki Formasyon ve Yönetişim

Projelerin soyut çıktıları arasında yer alan beşeri sermaye gelişimi, Edirne turizmindeki hizmet kalitesinin yükseltilmesinde belirleyici olmuştur (Leonardi, 1995). Yürütülen projeler vasıtasıyla 1.200'den fazla turizm sektörü çalışanına, yerel zanaatkâra, esnafa ve tur rehberine; yabancı dil (Bulgarca/İngilizce), dijital pazarlama, kültürel miras rehberliği ve hijyen/servis standartları konularında sertifikalı mesleki formasyon eğitimleri verilmiştir. Ayrıca kurulan Sınır Ötesi Turizm Ağları, Edirne ve Bulgaristan'daki KOBİ'ler ile STK'lar arasında sürdürülebilir kurumsal işbirliği bağları kurmuştur.

5. TARTIŞMA VE SEKTÖREL BÜROKRATİK KISITLAR

Edirne turizminin SÖİ projeleri kanalıyla 20 milyon Avro'yu aşan nihai bir finansman kaynağına erişmiş olması büyük bir başarı olarak değerlendirilse de, uygulamada sektörel girdi verimliliğini kısıtlayan bir takım yapısal ve idari sorunlar tespit edilmiştir (Tosun, 2000). Proje süreçlerinin SWOT analizi perspektifinden görünümü Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3: SÖİ Turizm Projelerinin SWOT Analizi Çerçevesinde Değerlendirilmesi

Güçlü Yönler (Strengths)	Zayıf Yönler (Weaknesses)
• Doğrudan karşılıksız hibe imkanı. • Somut kültür varlıklarının restorasyonu. • Uluslararası kurumsal ağ kurma kapasitesi. • Bölgesel marka değerinin yükselmesi.	• Proje bitimi sonrası sürdürülebilirlik eksikliği (fon bağımlılığı). • Ağır vergi, KDV muafiyeti (son dönem hariç) ve bürokratik raporlama süreçleri. • Yüksek personel devir hızı sebebiyle kurumsal hafıza kaybı.

Güçlü Yönler (Strengths)	Zayıf Yönler (Weaknesses)
	• Özel sektör (KOBİ) katılımının kısıtlı kalması.
Fırsatlar (Opportunities)	Tehditler (Threats)
• AB Yeşil Mutabakatı ile ekoturizm fonlarının artması. • Akıllı turizm ve dijital destinasyon trendleri. • Sınır ötesi ortak tur paketi pazarlama potansiyeli.	• Vize rejimindeki sıkıntılar sebebiyle turist geçiş asimetrisi. • Sınır kapılarındaki uzun bekleme süreleri. • Makroekonomik dalgalanmaların proje özkaynak bütçelerine etkisi.

Sürdürülebilirlik sorunu, projelerin en kritik zafiyet alanıdır. Örneğin, IPA II döneminde hibeyle geliştirilen bazı mobil uygulamalar ve web portalları, proje süresi (12-24 ay) bittikten sonra sürdürülebilir bütçesi ayrılmadığı için erişime kapanmıştır. Benzer şekilde, vize prosedürlerindeki zorluklar Bulgar turistlerin Edirne'ye akın etmesini sağlarken, Türk vatandaşlarının Bulgaristan tarafına geçişinde yarattığı asimetri sebebiyle sınır ötesi rotaların çift yönlü işleyişini aksatmaktadır.

6. SONUÇ VE STRATEJİK ÖNERİLER

Avrupa Birliği Sınır Ötesi İşbirliği Projeleri, Edirne turizm sektörünün altyapısını modernize eden, ürün çeşitliliğini artıran ve kenti uluslararası destinasyon ağlarına entegre eden katma değeri yüksek bir dinamiktir. 2010-2025 döneminde Edirne paydaşlarına aktarılan 20 milyon Avro'yu aşkın hibe, 15'i aşkın kültür varlığının ihyasını sağlamış, 25 tematik rota oluşturmuş ve turist sayısının 5.8 milyona ulaşmasında ivme yaratmıştır.

2021-2027 (Interreg VI-A) ve sonraki gelecekteki programlama dönemlerinde elde edilen verimliliği en üst seviyeye çıkarmak adına şu stratejik adımlar atılmalıdır:

1. **Sürdürülebilirlik ve Devam Fonları (Post-Project Matching):** Tamamlanan projelerin dijital altyapılarını ve fiziki rotalarını yaşatmak amacıyla Edirne Valiliği ve Trakya Kalkınma Ajansı koordinasyonunda bir "Proje Sürdürülebilirlik Fonu" kurulmalıdır.
2. **KOBİ ve Özel Sektör Entegrasyonu:** Hibe çağrılarında sadece kamu ve STK'ların değil, turizm acentelerinin, otellerin ve esnaf odalarının (KOBİ) proje ortağı veya yararlanıcısı olmasını sağlayacak esnek finansman modelleri geliştirilmelidir.
3. **Sınır Geçişlerinin Dijitalleştirilmesi:** Sınır ötesi turizm rotalarının akıcılığını sağlamak amacıyla Kapıkule ve Pazarkule sınır kapılarında turizm otobüsleri ve turlar için "Yeşil Kanal / Hızlı Geçiş" uygulamaları hayata geçirilmelidir.
4. **AB Proje Kuluçka Merkezi:** Edirne kent merkezinde kurulacak uzmanlaşmış bir proje ofisi ile yerel paydaşlara teknik şartname hazırlama, KDV muafiyeti takibi ve uluslararası ortak bulma konularında kesintisiz danışmanlık verilmelidir.

KAYNAKÇA

1. Ansell, C. K., Parsons, C. A., & Dardanelli, P. (1997). Dual networks in European regional development policy. *Journal of Common Market Studies*, 35(3), 347-375.
2. Cappellin, R., & Batey, P. W. (Eds.). (1993). *Regional networks, border regions and European integration*. London: Pion Ltd.
3. Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). Thousand Oaks: SAGE Publications.

4. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı. (2021). *Interreg-IPA Bulgaristan - Türkiye Sınır Ötesi İşbirliği Programı Dokümanları ve Uygulama Rehberi*. Ankara: AB Başkanlığı Yayınları.
5. Edirne İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (2024). *Edirne ili turizm istatistikleri ve sınır kapıları verileri raporu*. Edirne: Valilik Yayınları.
6. Hall, D. R. (2005). Tourism and regional development in new Europe. *International Journal of Tourism Research*, 7(5), 269-277.
7. Ioannides, D., Nielsen, P. A., & Billing, P. (2006). Transboundary collaboration in tourism: The case of the Bothnian Arc. *Tourism Geographies*, 8(2), 122-142.
8. Krippendorff, K. (2018). *Content analysis: An introduction to its methodology* (4th ed.). Thousand Oaks: SAGE Publications.
9. Leonardi, R. (1995). *Convergence, cohesion and integration in the European Union*. London: Macmillan Press.
10. Perkmann, M. (2003). Cross-border regions in Europe: Significance and drivers of regional cross-border co-operation. *European Urban and Regional Studies*, 10(2), 153-171.
11. Timothy, D. J. (2001). *Tourism and political boundaries*. London: Routledge.
12. Tosun, C. (2000). Limits to community participation in the tourism development process in developing countries. *Tourism Management*, 21(6), 613-633.
13. Trakya Kalkınma Ajansı. (2023). *TR21 Trakya Bölgesi turizm master planı ve AB hibe değerlendirme raporu*. Tekirdağ: TRAKYAKA Yayınları.
14. Yin, R. K. (2017). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). Thousand Oaks: SAGE Publication

VAKUMLU TAŞIMA SİSTEMİNE ENTEGRE PNÖMATİK MANİPÜLATÖRDE KRİTİK BİR TAŞIYICI PARÇANIN STATİK ANALİZİ

Müh. Ömer ARAT
Erha Mühendislik, 34885 Sancaktepe/İstanbul
ORCID ID: 0009-0008-9894-9631
Müh. Ahmet DURAN
Erha Mühendislik, 34885 Sancaktepe/İstanbul
ORCID ID: 0009-0005-4094-9514
Müh. Barış ERMAN
Erha Mühendislik, 34885 Sancaktepe/İstanbul
ORCID ID: 0009-0009-2127-8259
Prof. Dr. Ali KİBAR
Kocaeli Üniversitesi, Uzunçiftlik Nuh Çimento Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 41180 Kocaeli
ORCID ID: 0000-0002-2310-1088

ÖZET

Endüstriyel üretim hatlarında büyük, ağır veya yüzey hassasiyeti yüksek parçaların güvenli biçimde taşınması; iş güvenliği, ergonomi, üretim sürekliliği ve proses verimliliği açısından önemli bir mühendislik problemidir. Bu çalışmada, çoklu vakum vantuzuyla çalışan ve pnömatik manipülatörle entegre edilmiş bir vakumlu taşıma sisteminde yük aktarımında kritik rol oynayan taşıyıcı bağlantı parçası yapısal açıdan incelenmiştir. Tasarımın prototip öncesinde doğrulanması amacıyla SolidWorks Simulation ortamında doğrusal elastik statik analiz gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelde malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik tanımlanmış; gerçek çalışma koşullarını temsil etmek amacıyla sabit fikstürler, bağlantı bölgeleri ve eksantrik etkiye sahip uzak yük kullanılmıştır. Analizde, taşıma yükünün yalnızca düşey doğrultuda değil, bağlantı ve destek bölgeleri üzerinden üç boyutlu olarak aktarıldığı dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre maksimum eşdeğer von Mises gerilmesi 103,8 MPa, maksimum toplam yer değiştirme 0,151 mm ve minimum emniyet katsayısı 1,992 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, incelenen taşıyıcı parçanın tanımlanan statik yükleme koşulları altında elastik bölgede çalıştığını, yeterli rijitlik sergilediğini ve ilk tasarım doğrulaması açısından güvenli sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Ayrıca gerilme yığılmalarının özellikle pim, rulman ve bağlantı bölgelerinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Gerilme yığılmaları, ilerleyen tasarım iyileştirmeleri açısından bu bölgeleri öne çıkarmaktadır. Çalışma, vakumlu taşıma sistemlerindeki kritik taşıyıcı parçaların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak prototip öncesinde doğrulanmasına yönelik uygulanabilir bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Pnömatik manipülatör, vakumlu taşıma sistemi, statik yapısal analiz, sonlu elemanlar yöntemi

STATIC ANALYSIS OF A CRITICAL LOAD-BEARING COMPONENT IN A PNEUMATIC MANIPULATOR INTEGRATED WITH A VACUUM HANDLING SYSTEM

ABSTRACT

The safe handling of large, heavy, or surface-sensitive components in industrial production lines represents a significant engineering challenge in terms of occupational safety, ergonomics, production continuity, and process efficiency. In this study, a load-bearing connection component that plays a critical role in load transfer within a vacuum handling system equipped with multiple suction cups and integrated with a pneumatic manipulator was structurally investigated. To validate the design prior to prototyping, a linear elastic static analysis was performed using SolidWorks Simulation. AISI 304 stainless steel was assigned as the material in the numerical model, while fixed constraints, connection regions, and a remote load with an eccentric effect were defined to represent actual operating conditions. The analysis considered that the handling load was transferred three-dimensionally through the connection and support regions rather than acting solely in the vertical direction. The results showed that the maximum equivalent von Mises stress was 103.8 MPa, the maximum total displacement was 0.151 mm, and the minimum factor of safety was 1.992. These values indicate that the investigated load-bearing component operates within the elastic range under the defined static loading conditions, exhibits sufficient stiffness, and remains within safe limits for initial design validation. Furthermore, stress concentrations were found to occur particularly around the pin, bearing, and connection regions. Therefore, these regions should be prioritized in future design improvements. This study presents a practical engineering approach for the pre-prototype validation of critical load-bearing components in vacuum handling systems using the finite element method.

Keywords: Pneumatic manipulator, vacuum handling system, static structural analysis, finite element method

1. GİRİŞ

Günümüz endüstriyel üretim sistemlerinde parça taşıma, konumlandırma ve istifleme operasyonları yalnızca üretim hızı ve verimliliği açısından değil, aynı zamanda iş güvenliği, ergonomi ve proses güvenilirliği açısından da büyük önem taşımaktadır (Li, 2024). Özellikle malzeme taşıma robotları ve manipülatörler üzerine yapılan çalışmalar, taşıyıcı sistemin yapısal güvenliğinin ve kütle/rijitlik dengesinin tasarım sürecinde belirleyici olduğunu göstermektedir (Zhu & Tian, 2024). Sac, panel ve benzeri geniş yüzeyli parçaların taşınmasında vakum tabanlı sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde tutma kapasitesi; vakum düzeyi, vantuz geometrisi, yüzeyle sızdırmazlık ve yükün vantuzlar arasındaki dağılımına bağlıdır (Gabriel et al., 2020; Hudoklin et al., 2022). Güncel çalışmalar, çoklu vantuz kullanılan vakumlu gripper yapılarının geniş yüzeyli nesnelerin daha kararlı tutulmasını sağladığını ve tutma güvenilirliğini artırdığını ortaya koymaktadır (Dontu et al., 2024).

Vakumlu taşıma sistemlerinin başarısı yalnızca vantuzların tutma kapasitesine veya vakum seviyesine değil, aynı zamanda sistemi taşıyan manipülatör yapısının yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olmasına da bağlıdır. Büyük ve esnek bileşenlerin taşınmasında, tutucu sayısının ve tutma noktalarının uygun seçilmemesi durumunda taşınan bileşende gerilme ve sehim artışları meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, gripper yerleşimi ile taşıyıcı yapının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Römer et al., 2024).

Pnömatik manipülatörler, operatör destekli malzeme taşıma uygulamalarında yükün daha düşük kuvvetle yönlendirilmesini sağlayarak yarı otomatik üretim hatlarında önemli avantajlar sunmaktadır (Dsilva et al., 2025). Ancak bu sistemlerin güvenli ve sürdürülebilir biçimde

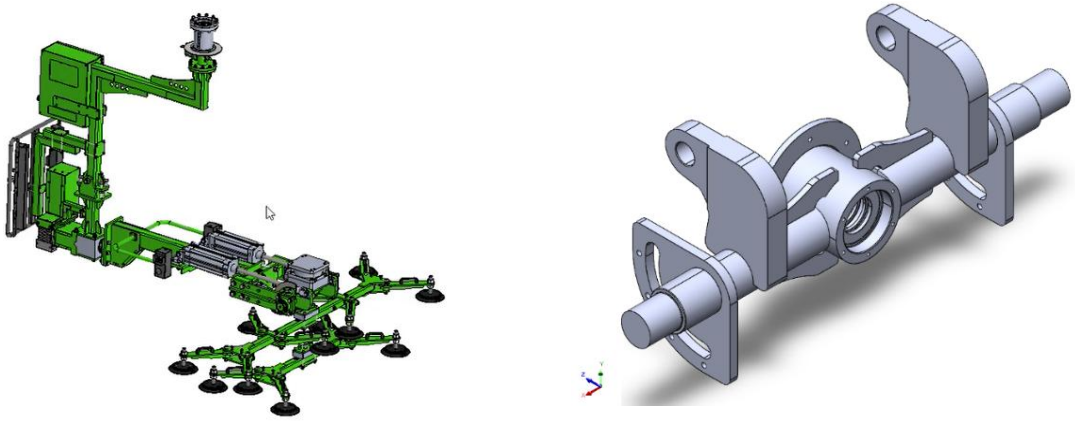
çalışabilmesi için, yük aktarımının yoğunlaştığı taşıyıcı parçalar, bağlantı aparatları, pim bölgeleri ve rulman çevreleri gibi kritik alanların servis koşulları altında yapısal olarak doğrulanması gerekmektedir. Bu nedenle manipülatör sistemlerinde yük aktarımının yoğunlaştığı bağlantı parçalarının ve ara taşıyıcı elemanların sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmesi, prototip öncesi tasarım doğrulamasının önemli bir parçası hâline gelmiştir (O. Arat et al., 2025; Zhu & Tian, 2024). Nitekim malzeme taşıma manipülatörleri ve pnömatik gripper sistemleri üzerine yapılan sonlu elemanlar temelli çalışmalarda, kritik taşıyıcı elemanların dayanımı doğrulanmakta ve yapısal optimizasyon ile önemli kütle azaltımları sağlanabilmektedir (Ö. Arat et al., 2024; Li, 2024).

Bu bağlamda bilgisayar destekli mühendislik analizleri, pnömatik manipülatörler ve vakumlu vantuz sistemlerinin prototip öncesi doğrulanmasında etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Sonlu elemanlar analizi, yük altında oluşan gerilme, deformasyon ve güvenlik katsayısı dağılımlarının önceden değerlendirilmesine imkân vererek, üretim öncesi kritik tasarım kararlarının daha güvenilir biçimde alınmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, vakumlu taşıma mekanizmasını pnömatik manipülatör ile entegre eden sistemin kritik bir bileşeni, SolidWorks Simulation ortamında statik analiz ile incelenmiş ve yapısal yeterliliği değerlendirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, vakumlu sac/panel taşıma sistemlerinde kritik taşıyıcı parçaların statik davranışının değerlendirilmesine ve prototip öncesi tasarım doğrulamasına yönelik güncel mühendislik yaklaşımlarıyla uyumlu bir çerçeve sunmaktadır.

2. SİSTEM TANIMI VE TASARIM YAKLAŞIMI

Şekil 1a'da görüldüğü üzere pnömatik manipülatör sistemi genel olarak; taşıyıcı manipülatör gövdesi, pnömatik aktüasyon ve yönlendirme mekanizması ile vakumlu kavrama ve yük alma modülü olmak üzere üç temel fonksiyonel bölümden oluşmaktadır. Vakum vantuzlarının çok noktadan yüzeye temas etmesi, taşınacak parçanın ağırlığının ve temas kuvvetlerinin daha dengeli biçimde dağıtılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle ince sac, panel veya yüzey deformasyonuna duyarlı parçaların taşınmasında önemli bir avantaj sunmaktadır.

Tasarımdaki kritik alt sistemlerden biri, Şekil 1b'de gösterilen ve vakumlu başlığın yükünü manipülatör gövdesine aktaran ara taşıyıcı ve bağlantı yapısıdır. Bu yapı, operasyon sırasında yalnızca düşey yükleri değil, aynı zamanda merkezden uzak uygulanan yükten kaynaklanabilecek eğilme ve kesme etkilerini de karşılamak zorundadır. Bu nedenle sayısal analiz için seçilen parça, sistem davranışını temsil eden kritik bir bölge olarak belirlenmiştir. İncelenen bu parça, vakumlu başlıkta oluşan yüklerin manipülatör ana gövdesine aktarılmasında temel rol oynadığından, yapısal emniyet açısından sistemin en kritik bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmiştir.



a) b)

Şekil 1. (a) Vakumlu pnömatik manipülatör sisteminin genel görünüşü, (b) statik analize konu olan taşıyıcı parça.

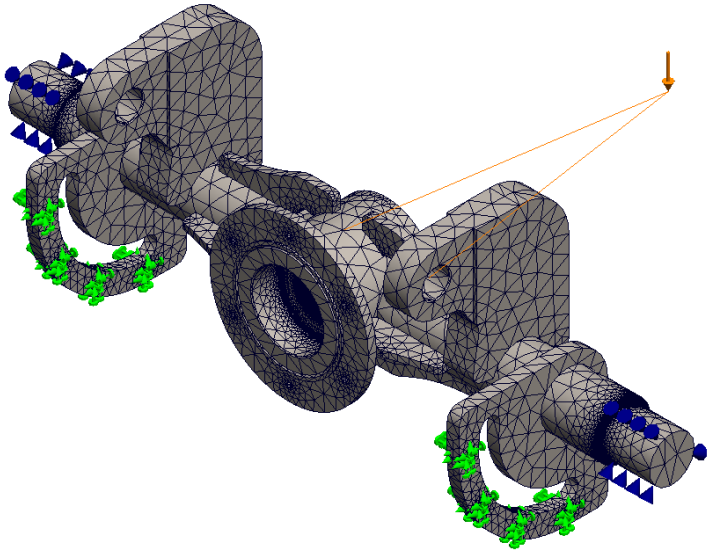
2.1. Analiz metodolojisi

Bu çalışmada analiz, doğrusal elastik statik yaklaşım esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Malzemenin izotrop ve homojen davrandığı kabul edilmiştir. Büyük yer değiştirme etkisi ihmal edilerek çözüm, daha çok yapının ilk tasarım doğrulamasına yönelik statik dayanım ve rijitlik değerlendirmesi amacıyla yürütülmüştür. Vakum kupalarının elastomer davranışı ve gerçek temas dağılımı doğrudan modellenmemiş, bu etkiler uzak yük yaklaşımı ile temsil edilmiştir.
Analiz, SolidWorks Simulation programı kullanılarak üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözüm ağı için Şekil 2'de gösterilen yüksek kaliteli eğrilik tabanlı mesh kullanılmıştır. Model için tanımlanan mesh detayları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Sayısal çözüm ağı detayları.

Detay	Oran
Maksimum eleman boyutu	17,8938 mm
Minimum eleman boyutu	0,8947 mm
Toplam düğüm sayısı	468171
Toplam eleman sayısı	305479
Şekli bozulmuş eleman oranı	%0

Tablo 1'de verilen veriler, çözümün özellikle geometrik geçişlerin ve yük aktarım bölgelerinin yeterli hassasiyetle modellenmesi amacıyla nispeten ince bir ağ yapısıyla oluşturulduğunu göstermektedir. Özellikle kesit geçişleri, delik çevreleri ve bağlantı bölgeleri gibi gerilme yığılmalarının beklenebileceği alanlarda çözüm hassasiyetini artırmak amacıyla ince ağ yapısı tercih edilmiştir. Sonlu eleman modelinde temas yaklaşımı birleşmiş (bonded) olarak tanımlanmış, büyük yer değiştirme etkisi kapalı tutulmuş ve çözüm klasik doğrusal elastik statik yaklaşım temelinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Sayısal çözüm ağı.

2.2. Malzeme Özellikleri

Analizde tüm katı gövdeler için malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik atanmıştır. Kullanılan temel mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

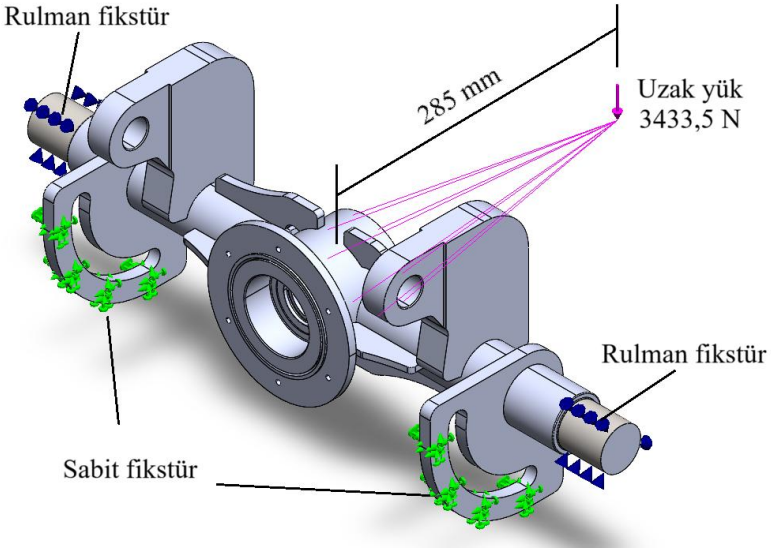
Tablo 2: Analizi yapılan parçanın özellikleri.

Özellik	Değer
Akma mukavemeti	206,807 MPa
Çekme dayanımı	517,017 MPa
Elastik modül	190000 MPa
Poisson oranı	0,29
Yoğunluk	8 g/cm³
Kayma modülü	75000 MPa

2.3. Sınır Şartları ve Yükleme Durumu

Modelin gerçek çalışma koşullarını temsil etmesi amacıyla yük ve fikstür tanımları Şekil 3'te gösterildiği şekilde yapılmıştır. Analizde sistemin vidalarla sabitlendiği bağlantı yüzeyleri sabit geometri olarak sınırlandırılmış ve toplam sekiz yüzey fikstür ile tutulmuştur. Böylece, analizi yapılan parçanın rijit bir ana taşıyıcı yapı olan gövdeye bağlı olduğu çalışma durumu temsil edilmiştir.

Yükleme durumunda ise bağlantı bölgesine dağıtılmış uzak yük uygulanmıştır (Şekil 3). Bu yük tek bir yüzey üzerinden tanımlanmış olup, yükün referans koordinatı (0, 0, -285 mm) olarak belirtilmiştir. Uygulanan uzak yük tanımında kuvvet bileşeni, yerçekimi doğrultusunu temsil edecek şekilde -y yönünde -3433,5 N olarak tanımlanmıştır. Böylece taşıma sistemine ait yük, bağlantı yüzeyinden belirli bir eksantriklik ile aktarılmış; dolayısıyla yalnızca basit basma/çekme değil, eğilme ve kesme kuvvetlerinin etkisi de incelenmiştir. Uzak yükün bağlantı düzlemine eksantrik biçimde tanımlanması nedeniyle modelde sabit fikstür ve rulman bölgelerinde yalnızca yük doğrultusunda değil, üç eksenli reaksiyon kuvvetlerinin oluşması beklenmektedir.



Şekil 3. Sınır şartları.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Statik analiz sonucunda, modelde tanımlanan sabit fikstür bölgelerinde oluşan tepki kuvvetleri Tablo 3'te verilmiştir. Sabitlenen bölgedeki toplam tepki kuvvetleri incelendiğinde, X, Y ve Z doğrultularında sırasıyla -0,777 N, 5065,410 N ve -994,438 N değerleri elde edilmiştir. Bu kuvvet bileşenlerinin vektörel bileşkesi ise 5162,100 N olarak hesaplanmıştır. Sabit fikstürlerde elde edilen tepki kuvveti bileşkesinin uygulanan düşey yükten farklı olması, yükün bağlantı düzlemine eksantrik olarak tanımlanması nedeniyle oluşan moment etkisi ve modelde tanımlanan diğer bağlantı/rulman reaksiyonlarının dengeye katkısı ile ilişkilidir. Bu nedenle

değerlendirme yalnızca sabit fikstürlerdeki bileşke tepki kuvveti üzerinden değil, sistemdeki tüm destek ve bağlantı bölgelerinde oluşan reaksiyonlar birlikte dikkate alınarak yapılmıştır. Bu sonuçlar, yapının esas olarak düşey doğrultuda uygulanan taşıma yükü altında çalışmasına rağmen, yükün bağlantı ve destek bölgeleri üzerinden üç boyutlu olarak aktarıldığını göstermektedir. Yükleme tek eksenli tanımlanmış olsa dahi, taşıyıcı sistemin geometrisi ve destek koşulları nedeniyle destek bölgelerinde çok eksenli reaksiyon kuvvetleri oluşmaktadır. Sabit fikstür ve rulman bölgelerinde meydana gelen reaksiyon kuvvetleri birlikte değerlendirildiğinde, dış yükleme altında sistemin statik dengesinin sağlandığı anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Sabit fikstür bölgesinde elde edilen tepki kuvvetleri.

Bileşen	Değer (N)
X yönü	-0,777
Y yönü	5065,410
Z yönü	-994,438
Bileşik sonuç	5162,100

Modelde sabit fikstürlere ek olarak iki ayrı rulman/bağlantı elemanı da tanımlanmıştır. Bu bağlantı elemanlarında oluşan eksenel ve kesme tipi kuvvetler, sistemin yük aktarım karakteristiğinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Analiz sonuçlarına göre, Tablo 4'te gösterildiği üzere her iki rulman grubunda da eksenel kuvvetlerin yaklaşık ±212 N mertebesinde olduğu, buna karşılık kesme tipi yüklerin yaklaşık 955 N seviyesinde gerçekleştiği görülmüştür. Bu bulgular, bağlantı bölgelerinin yalnızca taşıyıcı eleman olarak değil, aynı zamanda yataklama ve kesme yüklerini karşılayan kritik bölgeler olarak da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 4. Rulman/bağlantı elemanlarında elde edilen kuvvetler

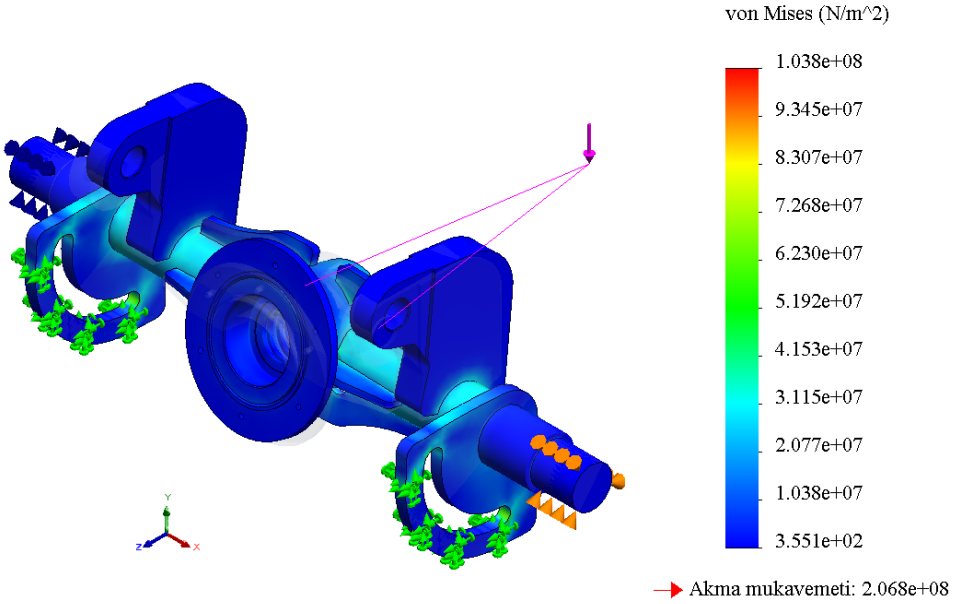
Bağlantı elemanı	Eksenel kuvvet (N)	Kesme kuvveti sonucu (N)
Rulman Grubu-1	-211,89	954,61
Rulman Grubu-2	212,76	955,84

Rulman gruplarında oluşan kesme kuvvetlerinin, bağlantı bölgelerinde dikkate değer seviyelere ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle yalnızca ana taşıyıcı gövdenin değil; pim, yataklama ve rulman temas bölgelerinin de mühendislik tasarımında ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle tekrarlı yükleme durumlarında bu bölgeler, yorulma ve lokal gerilme yığılması açısından kritik hâle gelebilmektedir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar, bağlantı tasarımının mevcut yükleme durumu için güvenli ve servis şartlarına uygun olduğunu göstermekle birlikte, tasarım doğrulama sürecinde bağlantı elemanlarının ayrıca incelenmesinin önemini de ortaya koymaktadır. Özellikle rulman bölgelerinde oluşan yaklaşık 955 N seviyesindeki kesme kuvvetleri, bağlantı detaylarının yalnızca genel taşıyıcı sistemle birlikte değil, aynı zamanda lokal yataklama ve temas davranışı açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.1. Eşdeğer Gerilme (von Mises) Dağılımı

Statik analiz sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre model üzerindeki minimum gerilme değeri ihmal edilebilir düzeyde kalırken, maksimum von Mises gerilmesi yaklaşık 103,8 MPa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen gerilme dağılımı incelendiğinde, maksimum gerilmenin özellikle yük aktarımının gerçekleştiği bağlantı bölgelerinde, kesit geçişlerinin bulunduğu alanlarda ve geometrik süreksizliklerin çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, yükün sistem içerisinde doğrudan ve homojen biçimde değil, belirli taşıyıcı bölgeler üzerinden aktarıldığını ve bu nedenle yerel gerilme yığılmalarının oluştuğunu göstermektedir. Söz konusu bölgeler, klasik anlamda gerilme yığılması görülen kritik geometrik geçiş alanları olarak değerlendirilebilir.

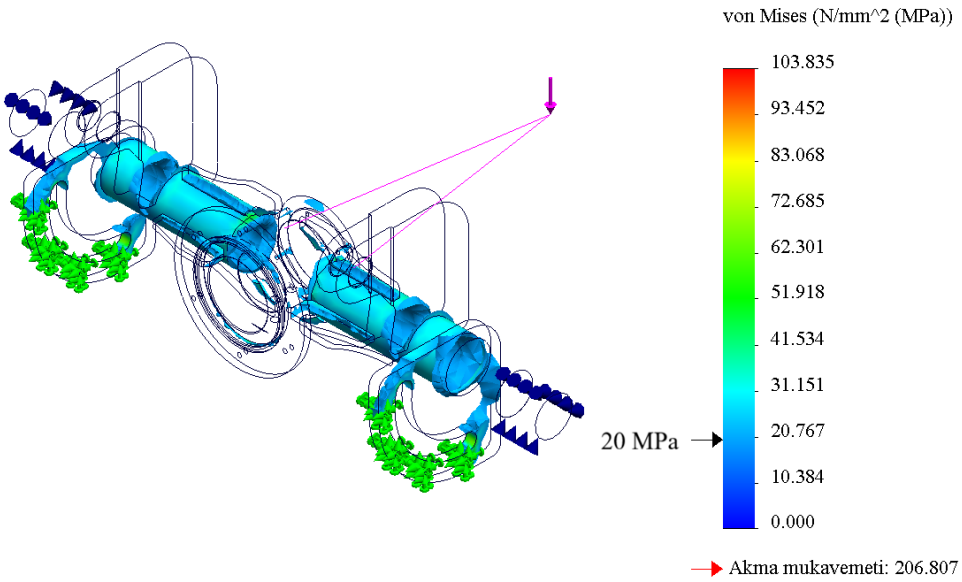
Malzeme olarak kullanılan AISI 304 paslanmaz çeliğin akma dayanımı 206,807 MPa olduğundan, elde edilen maksimum gerilme değeri bu sınırın belirgin biçimde altında kalmaktadır. Buna göre, incelenen yükleme koşulu altında yapının elastik bölgede çalıştığı ve plastik deformasyona ulaşmadığı söylenebilir. Başka bir ifadeyle, analiz edilen taşıyıcı parça mevcut yükleme durumunda kalıcı şekil değiştirme oluşturmadan güvenli biçimde görev yapabilecek durumdadır.



Şekil 4. Von Mises gerilme dağılımı.

Gerilme dağılımının daha net değerlendirilebilmesi amacıyla, 20 MPa'dan büyük gerilme bölgeleri ayrıca Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu görselleştirme, kritik gerilme alanlarının modelin tamamına yayılmadığını; aksine yük aktarımının gerçekleştiği belirli bağlantı ve kesit geçiş bölgelerinde yerel olarak yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Özellikle yük uygulama bölgesinden başlayarak pim, rulman ve bağlantı kulağı çevresine doğru gerilme seviyelerinin arttığı görülmektedir. Bu durum, yükün sistem içerisinde belirli taşıyıcı yollar üzerinden aktarıldığını ve geometrik süreksizliklerin bulunduğu bölgelerde gerilme yığılmalarının oluştuğunu göstermektedir. Bu bölgeler, ileride gerçekleştirilecek tasarım iyileştirme çalışmalarında et kalınlığının artırılması, geçiş radyüslerinin optimize edilmesi veya yerel takviye elemanlarının eklenmesi açısından öncelikli değerlendirme alanları olarak öne çıkmaktadır.

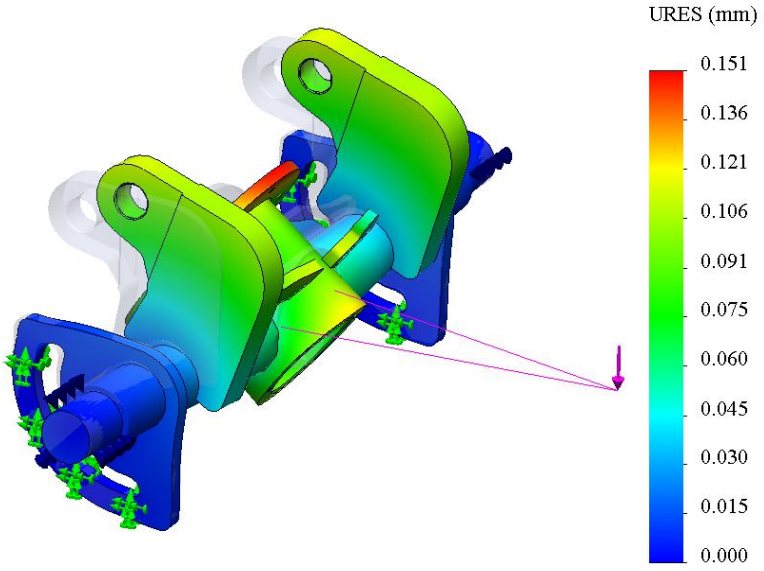
Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, yapının genel gerilme seviyesi bakımından güvenli sınırlar içerisinde çalıştığı; ancak yük aktarımının gerçekleştiği lokal bölgelerde gerilme yığılmalarının oluştuğu görülmektedir. Dolayısıyla mevcut tasarım statik dayanım açısından yeterli olmaktadır.



Şekil 5. 20 MPa'dan büyük eşdeğer von Mises gerilme bölgelerinin gösterimi.

3.2. Yer Değiştirme Dağılımı

Statik analiz sonucunda elde edilen toplam yer değiştirme dağılımı Şekil 6'da verilmiştir. Modeldeki maksimum toplam yer değiştirme değeri 0,151 mm olarak hesaplanmıştır. Minimum yer değiştirme değeri ise, sabit fikstür bölgelerinde beklendiği üzere sıfıra yakın olup sınır şartlarının uygun şekilde tanımlandığını göstermektedir. Maksimum deplasmanın, yük uygulama hattına yakın ve yapının nispeten serbest davranış gösteren ucunda ortaya çıkması, taşıyıcı sistemin mekanik davranışı açısından beklenen bir sonuçtur. Elde edilen 0,151 mm seviyesindeki maksimum yer değiştirme, endüstriyel taşıma sistemleri açısından düşük bir değer olarak değerlendirilebilir. Bu sonuç, sistemin yeterli rijitliğe sahip olduğunu ve çalışma sırasında geometrik kararlılığını büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. Özellikle manipülatör ucunda konum hassasiyetinin korunması, vakum yüzeylerinin iş parçasına düzgün temas etmesi ve taşıma sırasında yükün kontrollü biçimde yönlendirilmesi bakımından bu düşük yer değiştirme seviyesi önemli bir avantaj sağlamaktadır.

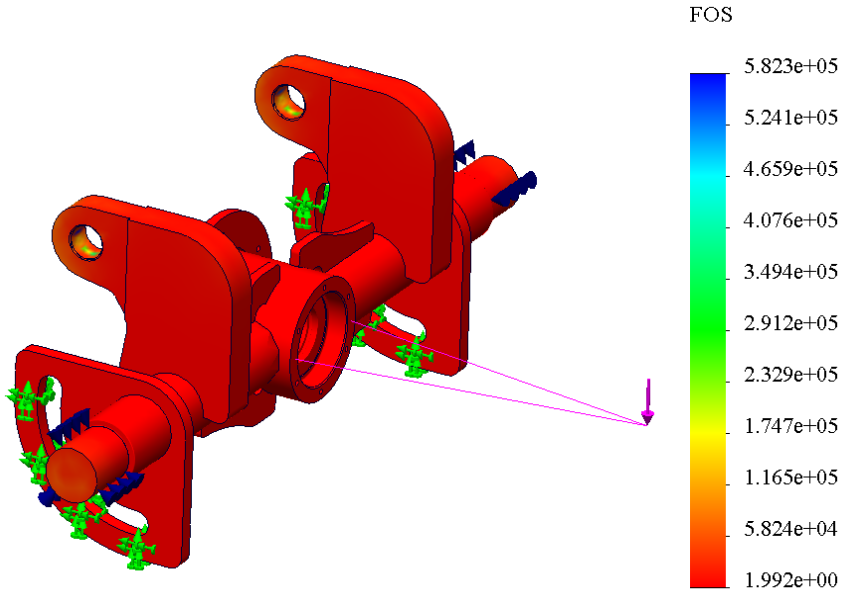


Şekil 6. Statik analiz sonucunda elde edilen toplam yer değiştirme dağılımı.

3.3. Güvenlik Katsayısı

Statik analiz sonucunda elde edilen güvenlik katsayısı dağılımı Şekil 7'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre model üzerindeki minimum güvenlik katsayısı 1,992 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, belirlenen statik yükleme ve sınır şartları altında yapının güvenli sınırlar içerisinde çalıştığını göstermektedir. Tanımlanan statik yükleme, malzeme modeli ve sınır şartları dikkate alındığında, yaklaşık 2 seviyesindeki güvenlik katsayısı ilk tasarım doğrulaması açısından yeterli bir emniyet payı sunmaktadır.

Güvenlik katsayısı dağılımı incelendiğinde, bu değerin gerilme dağılımı ile uyumlu biçimde değiştiği ve yük aktarımının yoğunlaştığı bölgelerin tasarım açısından kritik olduğunu gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte, minimum güvenlik katsayısının 1'in üzerinde olması, mevcut yükleme koşulu altında yapının akma sınırına ulaşmadığını ve güvenli çalışma bölgesinde kaldığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, incelenen taşıyıcı parçanın statik yükleme altında yeterli yapısal emniyet sunduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Statik analiz sonucunda elde edilen güvenlik katsayısı dağılımı.

3.4. Sonuçların Değerlendirilmesi

Elde edilen analiz bulguları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, tasarlanan vakumlu taşıma sistemine ait kritik alt parçanın seçilen yükleme koşulları altında yeterli yapısal dayanım sergilediği görülmektedir. Analiz sonucunda hesaplanan yaklaşık 103,8 MPa seviyesindeki maksimum eşdeğer gerilme değeri, malzeme olarak tanımlanan AISI 304 paslanmaz çeliğin 206,807 MPa akma dayanımının belirgin biçimde altında kalmaktadır. Bu bulgu, yapının incelenen statik yükleme koşulları altında elastik bölgede çalıştığını ve servis sırasında plastik deformasyona uğrama olasılığının düşük olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, modelde elde edilen 0,151 mm düzeyindeki maksimum yer değiştirme değeri, yapının yalnızca dayanım açısından değil, aynı zamanda rijitlik bakımından da uygun bir performans sunduğunu ortaya koymaktadır. Taşıma sistemlerinde rijitlik önemli bir tasarım kriteridir; çünkü kaldırılan parçanın konum doğruluğu, vakum kupalarının yüzeye düzgün biçimde oturması ve operatörün sistemi kontrollü bir şekilde yönlendirebilmesi doğrudan yapısal esneme miktarı ile ilişkilidir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, düşük deplasman seviyesi tasarımın işlevsel gereksinimleri karşıladığını ve operasyon sırasında istenmeyen hizalama hataları veya salınım risklerinin sınırlı olacağını göstermektedir.

Analiz sonucunda elde edilen yaklaşık 2 seviyesindeki minimum güvenlik katsayısı, tasarımın

malzeme kullanımı ile yapısal güvenlik arasında dengeli bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Mühendislik uygulamalarında, yüklerin ve sınır şartlarının makul ölçüde iyi tanımlandığı durumlarda bu seviyedeki güvenlik katsayısı birçok makine elemanı için kabul edilebilir bir emniyet aralığı sağlamaktadır.

Gerilme dağılımı incelendiğinde, kritik bölgelerin özellikle yük aktarımının gerçekleştiği pim, rulman ve bağlantı bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, tasarımın genel olarak güvenli olmasına rağmen bazı lokal bölgelerin mühendislik açısından daha hassas değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Daha yüksek bir güvenlik katsayısı hedeflenmesi veya daha zorlu çalışma koşullarına uyum sağlanması durumunda, kritik bölgelerde lokal et kalınlığı artırılabilir, keskin geçişler daha büyük radyüslerle yumuşatılarak gerilme yığılmaları azaltılabilir, gerekli görülen alanlara rijitlik artırıcı takviye elemanları eklenebilir ve bağlantı bölgelerindeki yataklama yüzeyleri büyütülerek yük dağılımı iyileştirilebilir.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular tasarımın ilk mühendislik doğrulaması açısından olumlu bir seviyede bulunduğunu göstermektedir. Mevcut haliyle sistem, tanımlanan statik yükleme koşulları altında hem dayanım hem de rijitlik bakımından yeterli görünmektedir. Bu nedenle analiz edilen parçanın, vakumlu taşıma sisteminin genel performansını destekleyecek uygun bir yapısal davranış sergilediği söylenebilir.

3.5. Çalışmanın Sınırlamaları ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada gerçekleştirilen analiz, doğrusal elastik statik yaklaşım ile sınırlıdır. Bu nedenle sistemin gerçek kullanım koşullarında karşılaşabileceği bazı etkiler kapsam dışında kalmıştır. Özellikle manipülatörün ani başlatma ve durdurma hareketleri sırasında oluşabilecek dinamik yükler ve ivmelenme etkileri, tekrarlı kaldırma-indirme çevrimlerine bağlı yorulma davranışı, bağlantı ve pim bölgelerinde ortaya çıkabilecek lokal temas gerilmeleri ile yataklama basınçları ve vakum kupalarının gerçek temas/yük dağılımı bu çalışmada ayrıntılı olarak modellenmemiştir.

Daha ince ve uzun taşıyıcı elemanlarda burkulma ve titreşim etkileri de ileri çalışmaların kapsamındadır. Bu kapsamda, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek dinamik analizler, yorulma değerlendirmeleri ve detaylı temas modelleri ile tasarımın servis koşulları altındaki davranışı daha kapsamlı biçimde ortaya konulabilir. Bu tür ek çalışmalar, mevcut tasarımın mühendislik doğrulamasını daha ileri düzeye taşıyacak ve sistemin uzun dönem güvenilirliğinin değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, vakumlu taşıma mekanizmasını pnömatik manipülatör ile entegre eden sistemin kritik taşıyıcı parçası için SolidWorks Simulation ortamında doğrusal elastik statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda maksimum eşdeğer von Mises gerilmesi 103,8 MPa, maksimum toplam yer değiştirme 0,151 mm ve minimum güvenlik katsayısı 1,992 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, AISI 304 paslanmaz çelikten üretilmesi öngörülen taşıyıcı parçanın tanımlanan statik yükleme koşulları altında elastik bölgede çalıştığını, rijitlik bakımından yeterli davranış sergilediğini ve ilk tasarım doğrulaması açısından güvenli sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir. Gerilme yığılmaları özellikle pim, rulman ve bağlantı bölgelerinde yoğunlaşmıştır.

Gelecek çalışmalar; dinamik yükleme, yorulma davranışı, darbe etkileri ve bağlantı bölgelerindeki temas koşullarını kapsamaktadır. Bu analizler, sistemin gerçek servis koşulları altındaki uzun dönem yapısal güvenilirliğinin daha kapsamlı biçimde doğrulanmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Arat, O., Duran, A., Erman, B., & Kibar, A. (2025). Structural Investigation of Pneumatic Grippers for Handling Automotive Parts using Finite Element Analysis and Topology Optimization. *Kahramanmaras Sutcu Imam University Journal of Engineering*, *28*(1), 380–390. https://doi.org/10.17780/ksujes.1569349

Arat, Ö., Erman, B., & Kibar, A. (2024). Pnömatik manipülatörlerin iş gücü azaltma ve güvenliği artırmadaki rolü. In B. KILIÇ GÜLDEN (Ed.), *Makine mühendisliği Alanında Güncel Çalışmalar* (pp. 61–90). Platanus.

Dontu, S., Kanhere, E., Stalin, T., Dharmawan, A. G., Hegde, C., Su, J., Chen, X., Magdassi, S., Soh, G. S., & Valdivia Y. Alvarado, P. (2024). Applications of a vacuum-actuated multi-material hybrid soft gripper: lessons learnt from RoboSoft manipulation challenge. *Frontiers in Robotics and AI*, *11*, 1356692. https://doi.org/10.3389/FROBT.2024.1356692/FULL

Dsilva, D. W., Mathias, K. A., & Hiremath, S. (2025). Evaluating the performance of soft pneumatic gripper mechanism through FE analysis. *AIP Conference Proceedings*, *3299*(1). https://doi.org/10.1063/5.0279419/3350557

Gabriel, F., Fahning, M., Meiners, J., Dietrich, F., & Dröder, K. (2020). Modeling of vacuum grippers for the design of energy efficient vacuum-based handling processes. *Production Engineering 2020 14:5*, *14*(5), 545–554. https://doi.org/10.1007/S11740-020-00990-9

Hudoklin, J., Seo, S., Kang, M., Seong, H., Luong, A. T., & Moon, H. (2022). Vacuum Suction Cup Modeling for Evaluation of Sealing and Real-Time Simulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *7*(2), 3616–3623. https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3145509

Li, G. (2024). Analysis and optimization of key structural components of handling manipulator based on fatigue simulation and finite element simulation. *Https://Doi.Org/10.1117/12.3036687*, *13219*, 1034. https://doi.org/10.1117/12.3036687

Römer, M., Demircan, F., Hürkamp, A., & Dröder, K. (2024). Combining finite element analysis and reinforcement learning for optimal grip point planning of flexible components. *Production Engineering 2024 19:3*, *19*(3), 391–405. https://doi.org/10.1007/S11740-024-01316-9

Zhu, L., & Tian, Y. (2024). Structural design and finite element analysis of material handling robots. *ACM International Conference Proceeding Series*, *1*, 8–13. https://doi.org/10.1145/3687488.3687490

ABD TİCARİ KAMYON KAZALARINDA KAYIP SONUÇLARININ MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE SINIFLANDIRILMASINDA ZAMANSAL DOĞRULAMA VE BİLGİ BLOKLARININ KATKILARI

Öğr. Gör. Dr. Seçil KULAÇ
Bursa Technical University, Quality Coordination Office, 16000, Bursa, Türkiye
ORCID ID: 0000-0003-3432-0099

ÖZET

Ticari kamyon kazalarına ilişkin kayıtlar; yol, çevre, araç, operasyonel ve coğrafi bilgilerin kayıplı kaza sonuçlarına nasıl katkıda bulunduğunun incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, iki makine öğrenmesi modelinin zamansal genellenebilirliği değerlendirilmiş ve önceden tanımlanmış bilgi bloklarının artımlı tahmin katkısı nicel olarak incelenmiştir. Analizde, Federal Motor Carrier Safety Administration tarafından yürütülen Motor Carrier Management Information System kapsamında 2010–2025 dönemini kapsayan, kimlik bilgileri çıkarılmış 249.458 kaza kaydı kullanılmıştır. Kayıplı kaza sonucu, en az bir yaralanma veya ölüm içeren kaza olarak tanımlanmıştır. Elastic Net lojistik regresyon ve CatBoost modelleri 2010–2022 dönemine ait kayıtlar kullanılarak eğitilmiş, karar eşikleri 2023 verileri üzerinden belirlenmiş ve nihai performans daha önce model geliştirme sürecinde kullanılmamış 2024–2025 test kümesinde değerlendirilmiştir. CatBoost modeli, ROC eğrisi altında kalan alan için 0,614, kesinlik–duyarlılık eğrisi altında kalan alan için 0,497 ve Brier skoru için 0,228 değerine ulaşmıştır. Elastic Net modelinde karşılık gelen değerler sırasıyla 0,611, 0,492 ve 0,230 olarak elde edilmiştir. Model performansı 2024 ve 2025 yıllarında benzer düzeyde gerçekleşmiş ve CatBoost kalibrasyon tahminleri ideal değerlere yakın bulunmuştur. Kümülatif Elastic Net analizinde, araç bilgileri kesinlik–duyarlılık eğrisi altında kalan alan değerini 0,415'ten 0,452'ye yükseltmiş, operasyonel bilgilerin ek katkısı sınırlı kalmış ve raporlama eyaleti bilgisinin eklenmesiyle bu değer 0,492'ye ulaşmıştır. Bulgular, sınıflandırma performansının iki test yılı boyunca orta düzeyde ve benzer olduğunu, ayrıca model tahminlerinin coğrafi özellikler ile raporlama eyaletine ilişkin bilgilere önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: CatBoost; ticari kamyon güvenliği; Elastic Net; makine öğrenmesi; zamansal doğrulama; ulaştırma riski

TEMPORAL VALIDATION AND INFORMATION-BLOCK CONTRIBUTIONS IN MACHINE LEARNING CLASSIFICATION OF CASUALTY OUTCOMES IN UNITED STATES COMMERCIAL TRUCK CRASHES

ABSTRACT

Commercial truck crash records provide a basis for examining how roadway, environmental, vehicle, operational and geographic information contributes to casualty outcomes. This study evaluated the temporal generalisability of two machine learning models and quantified the incremental predictive contribution of predefined information blocks. The analysis used 249,458 de-identified crash records from the Federal Motor Carrier Safety Administration Motor Carrier Management Information System covering 2010–2025. A casualty outcome was defined as a crash involving at least one injury or fatality. Elastic Net logistic regression and CatBoost were trained on records from 2010–2022, decision thresholds were selected using 2023 data, and final performance was evaluated on an untouched 2024–2025 test set. CatBoost achieved an area under the receiver operating characteristic curve of 0.614, an area under the precision–recall curve of 0.497 and a Brier score of 0.228. Elastic Net produced corresponding

values of 0.611, 0.492 and 0.230. Performance was similar in 2024 and 2025, and CatBoost calibration estimates were close to their ideal values. In the cumulative Elastic Net analysis, vehicle information increased the area under the precision–recall curve from 0.415 to 0.452, operational information added little further improvement, and reporting state increased it to 0.492. The findings indicate that classification performance remained moderate and comparable across the two test years, while model predictions were substantially dependent on geographic characteristics and reporting-state information.
Keywords: CatBoost; commercial truck safety; Elastic Net; machine learning; temporal validation; transportation risk

1. INTRODUCTION

Road freight is a central component of production and distribution systems, and the operational consequences of commercial truck crashes extend beyond the immediate traffic event. Casualty crashes can disrupt freight flows, reduce network reliability and generate costs for carriers, public agencies and other road users. The size, mass and operating characteristics of large trucks also distinguish these events from crashes involving only passenger vehicles. Examining the conditions associated with casualty outcomes is therefore relevant to transportation safety management, fleet risk assessment and the prioritisation of preventive resources.

Large-truck crash severity has traditionally been analysed using ordered-response, multinomial and random-parameter models. Zhu and Srinivasan (2011) examined a nationally representative sample from the Large Truck Crash Causation Study and identified associations involving driver behaviour, vehicle and crash characteristics. Their analysis also showed that the selected definition of severity and the treatment of incomplete information can influence empirical conclusions. In a New York City application, Zou et al. (2017) reported differences between single- and multi-vehicle crashes and identified spatial, truck-weight and time-of-day heterogeneity. These studies established that truck-crash outcomes reflect interacting characteristics of drivers, vehicles, road environments and crash contexts rather than a single risk domain.

Machine learning has subsequently been used to represent nonlinearities and interactions without imposing a fixed functional relationship. Zheng et al. (2018) applied gradient boosting to Federal Motor Carrier Safety Administration data from North Dakota and Colorado for 2010–2016. Company, driver, vehicle and crash characteristics contributed to four injury-severity levels, although a relatively small subset of variables accounted for most of the reported importance. Mohammadpour et al. (2023) later compared five classifiers using Trucks Involved in Fatal Accidents data and showed that missing-data treatment, class balancing and feature selection materially affected classification results. Ensemble methods have also been evaluated for vulnerable road users involved in truck crashes (Wei et al., 2024), while recent comparisons have included logistic regression, random forest, extreme gradient boosting and neural networks (Se et al., 2025; Irawati et al., 2026). The evidence does not identify one algorithm that is consistently preferable across datasets and outcome definitions.

Temporal and contextual transferability constitute a separate methodological concern. Behnood and Mannering (2019) found that factors associated with large-truck injury severity varied across time-of-day periods and years. Faisal Habib et al. (2024) similarly identified overall temporal instability alongside a subset of comparatively stable factors, while Biglari et al. (2024) showed that several associations changed when earlier Alabama models were re-estimated using more recent observations. Crash-type-specific research has also reported different factor structures for object collisions, run-off-road events and overturns (Abdi &

O'Hern, 2024). Collectively, this literature supports explicit evaluation on later observations rather than reliance only on randomly mixed training and test samples.

Geographic information requires equally careful interpretation. State indicators can capture variation in road systems, weather, enforcement, vehicle composition and regional operating environments. Rural–urban analyses have likewise reported different severity relationships across location types (Islam et al., 2014). However, state is also part of the administrative reporting process. The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2017) documented variation in the completeness of qualifying crash reports submitted to the Motor Carrier Management Information System, and the Federal Motor Carrier Safety Administration evaluates state crash-data completeness as a separate data-quality dimension (Federal Motor Carrier Safety Administration, 2025). Predictive gains associated with state should therefore be interpreted as combined geographic and reporting-system information rather than as causal differences in safety performance.

The present study conducts a secondary analysis of the publicly available, de-identified dataset released by Honeycutt (2026). The dataset comprises a national, standardised extract of commercial truck crash records derived from the Federal Motor Carrier Safety Administration's Motor Carrier Management Information System. Within this scope, the study makes three contributions. First, it evaluates the temporal generalisability of Elastic Net and CatBoost by training the models on 2010–2022 data, selecting decision thresholds using 2023 validation data and testing them on previously unseen 2024–2025 records. Second, it quantifies the incremental predictive contribution of roadway–environmental, vehicle, operational and reporting-state information blocks using cumulative Elastic Net specifications. Third, it examines the dependence of predictive performance on reporting-state information through a state-excluded CatBoost analysis and held-out permutation importance. This design combines temporal validation with a structured assessment of the predictive information represented in the released dataset.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Data source and analytical sample

The analysis used the De-identified U.S. Truck Crash Events with Standardized Operational and Environmental Classifications dataset published by Honeycutt (2026). The records were derived from the Motor Carrier Management Information System maintained by the Federal Motor Carrier Safety Administration. The source is intended to cover qualifying commercial trucks and buses involved in fatal, injury or tow-away crashes, although reporting completeness and eligibility practices can differ among states (Federal Motor Carrier Safety Administration, 2025). The released dataset was produced through documented structural filtering, deterministic category mapping and approximately 9.1% controlled sampling of the source records.

The primary analysis was restricted to 2010–2025 to reduce the influence of older coding and reporting structures. The incomplete 2026 period was excluded. After preparation, 249,458 records remained. No observations had missing values in the model-ready fields, and each crash identifier was unique. The chronological partition contained 199,757 training records from 2010–2022, 17,056 validation records from 2023 and 32,645 test records from 2024–2025.

The distribution of records across the training, validation and temporal test partitions, together with the corresponding casualty outcome prevalence, is summarised in Table 1.

Table 1. Analytical sample and casualty outcome distribution

Partition	Period	N	Casualty outcomes	Prevalence
Training	2010–2022	199,757	78,472	0.393
Validation	2023	17,056	6,584	0.386
Temporal test	2024–2025	32,645	12,579	0.385

2.2. Outcome and predictors

The binary outcome equalled one when INJURIES was greater than zero or FATALITIES was greater than zero and equalled zero otherwise. The predictors comprised reporting state, cargo body type, vehicle configuration, access control, interstate carrier status, gross vehicle weight class, road surface condition, environmental condition, trafficway classification, month and year. Unknown source categories were retained as explicit categories. Crash identifiers and report numbers were excluded. INJURIES and FATALITIES were used only to construct the outcome. TOW_AWAY and the hazardous-material release flag were excluded because they describe post-crash consequences and could introduce outcome leakage.

2.3. Models and information blocks

Elastic Net logistic regression was selected as the interpretable model (Zou & Hastie, 2005). Categorical variables were one-hot encoded, year was standardised, and the logistic model used an equal mixture of L1 and L2 penalties with C = 1.0. CatBoost was included as a nonlinear comparator because it can represent interactions among categorical characteristics without extensive feature expansion (Prokhorenkova et al., 2018). The CatBoost model used 300 trees, depth 6 and a learning rate of 0.05. The restricted design avoided extensive hyperparameter searching and kept the model comparison aligned with the study objective.

Four cumulative Elastic Net specifications were estimated. Block 1 included roadway, environmental and temporal information. Block 2 added cargo body type, vehicle configuration and gross vehicle weight. Block 3 added interstate carrier status. Block 4 added reporting state and constituted the full Elastic Net specification. A CatBoost model excluding reporting state was also fitted as a sensitivity analysis. This sequence separated the additional predictive contribution of each information group from general differences between algorithms.

2.4. Model Validation and Performance Evaluation

Both full models were fitted using 2010–2022 records. The classification threshold for each model was selected on the 2023 validation set by maximising balanced accuracy and was then applied without modification to the 2024–2025 test set. The test set was not used for model fitting or threshold selection. Discrimination was assessed using the area under the receiver operating characteristic curve (AUROC) and the area under the precision–recall curve (AUPRC). Probability accuracy was evaluated using the Brier score and log loss. Calibration intercept, calibration slope and expected calibration error were also calculated. Threshold-based measures included sensitivity, specificity, balanced accuracy, precision and F1 score. Stratified bootstrap sampling with 300 repetitions was used to obtain 95% confidence intervals for AUROC, AUPRC and the Brier score.

2.5. Model Interpretation

Elastic Net coefficients were extracted to describe conditional prediction directions. Their magnitudes were treated as regularised predictive coefficients rather than causal effects. Held-out CatBoost permutation importance was calculated from a fixed random sample of 10,000 test observations with three repetitions per feature. Importance was expressed as the mean reduction in test AUPRC after shuffling a feature.

3. Results

3.1. Primary temporal test performance

CatBoost provided slightly higher discrimination and probability accuracy than Elastic Net in the 2024–2025 temporal test period. As summarised in Table 2, CatBoost achieved an AUROC of 0.614 (95% CI 0.608–0.620), an AUPRC of 0.497 (95% CI 0.491–0.505) and a Brier score of 0.228 (95% CI 0.227–0.229). Elastic Net achieved corresponding values of 0.611 (95% CI 0.606–0.617), 0.492 (95% CI 0.485–0.500) and 0.230 (95% CI 0.229–0.230), respectively.

The differences between the point estimates were small, and the bootstrap confidence intervals showed substantial overlap. The test-set prevalence of 0.385 provided the no-skill reference for AUPRC. The receiver operating characteristic and precision–recall curves for both models are presented in Figure 1.

Table 2. Primary model performance on the 2024–2025 temporal test set

Measure	Elastic Net	CatBoost
AUROC	0.611 (0.606–0.617)	0.614 (0.608–0.620)
AUPRC	0.492 (0.485–0.500)	0.497 (0.491–0.505)
Brier score	0.230 (0.229–0.230)	0.228 (0.227–0.229)
Log loss	0.652	0.648
Calibration intercept	0.094	0.085
Calibration slope	0.906	1.025
Expected calibration error	0.034	0.019
Sensitivity	0.556	0.665
Specificity	0.598	0.492
Balanced accuracy	0.577	0.578
Precision	0.464	0.450
F1 score	0.506	0.537

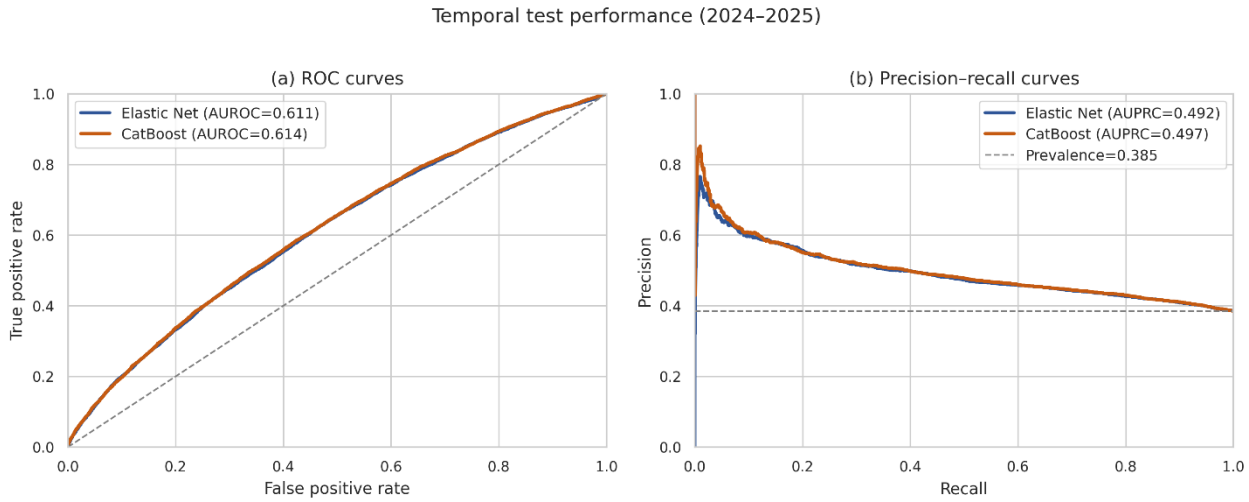


Figure 1. Receiver operating characteristic and precision–recall curves for the 2024–2025 temporal test set.

The threshold-specific operating characteristics differed despite similar balanced accuracy values. CatBoost had higher sensitivity (0.665) and lower specificity (0.492), whereas Elastic Net had a sensitivity of 0.556 and a specificity of 0.598 (Table 2). CatBoost also produced a higher F1 score (0.537 versus 0.506). Its calibration slope was 1.025 and expected calibration error was 0.019, indicating close agreement between predicted and observed probabilities over the represented probability range.

3.2. Temporal stability across test years

Performance remained similar across the two individual test years. Elastic Net AUROC was 0.613 in 2024 and 0.609 in 2025, while its AUPRC was 0.494 and 0.491, respectively. CatBoost AUROC was 0.615 in 2024 and 0.613 in 2025, and its AUPRC was 0.497 in both years. CatBoost Brier scores were 0.228 in each year. These results indicate that the aggregate 2024–2025 performance estimates reported in Table 2 were not driven by a single test year.

3.3. Incremental contribution of information blocks

The cumulative Elastic Net results are presented in Table 3. The roadway–environmental and temporal block produced an AUROC of 0.549 and an AUPRC of 0.415. Adding vehicle characteristics increased AUROC by 0.024 and AUPRC by 0.037 and reduced the Brier score by 0.002. Interstate carrier status contributed little additional performance, increasing AUPRC by only 0.001. The addition of reporting state generated the largest subsequent improvement, increasing AUROC from 0.574 to 0.611 and AUPRC from 0.453 to 0.492 while reducing the Brier score from 0.233 to 0.230.

Table 3. Cumulative Elastic Net information block performance on the temporal test set

Cumulative information	AUROC	AUPRC	Brier	ΔAUROC	ΔAUPRC
Roadway, environment and time	0.549	0.415	0.236	–	–
Add vehicle characteristics	0.573	0.452	0.234	+0.024	+0.037
Add operational status	0.574	0.453	0.233	+0.001	+0.001
Add reporting state	0.611	0.492	0.230	+0.037	+0.039

The incremental changes in AUPRC across the cumulative information blocks are illustrated in Figure 2. The pattern shows that vehicle characteristics provided the main improvement beyond roadway, environmental and temporal information, whereas operational status added little additional predictive information. Reporting state produced the largest subsequent increase and brought the full Elastic Net specification to an AUPRC of 0.492.

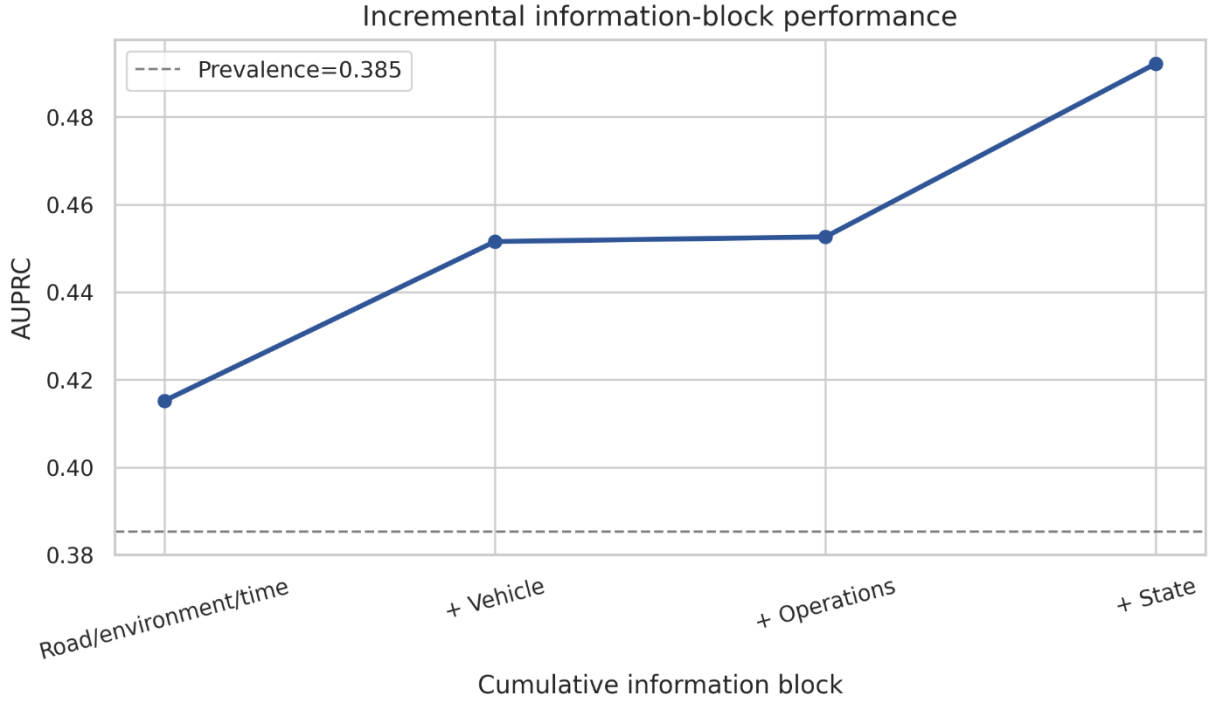


Figure 2. Incremental AUPRC across cumulative Elastic Net information blocks. The dashed line represents test-set prevalence.

3.4 Geographic sensitivity and model interpretation

The sensitivity analysis showed a similar dependence on reporting-state information. Removing reporting state from CatBoost reduced AUROC from 0.614 to 0.576 and AUPRC from 0.497 to 0.454, while the Brier score increased from 0.228 to 0.232. Held-out permutation importance results, presented in Figure 3, also identified reporting state as the most influential predictive feature, with a mean AUPRC decrease of 0.068 after permutation.

Vehicle configuration ranked second, with an AUPRC decrease of 0.012, followed by cargo body type, trafficway classification and road surface condition. Interstate carrier status, environmental condition and year showed comparatively small permutation importance in the fitted model. These results were consistent with the cumulative information-block analysis in Table 3, in which reporting state provided the largest additional predictive gain after vehicle-related information.

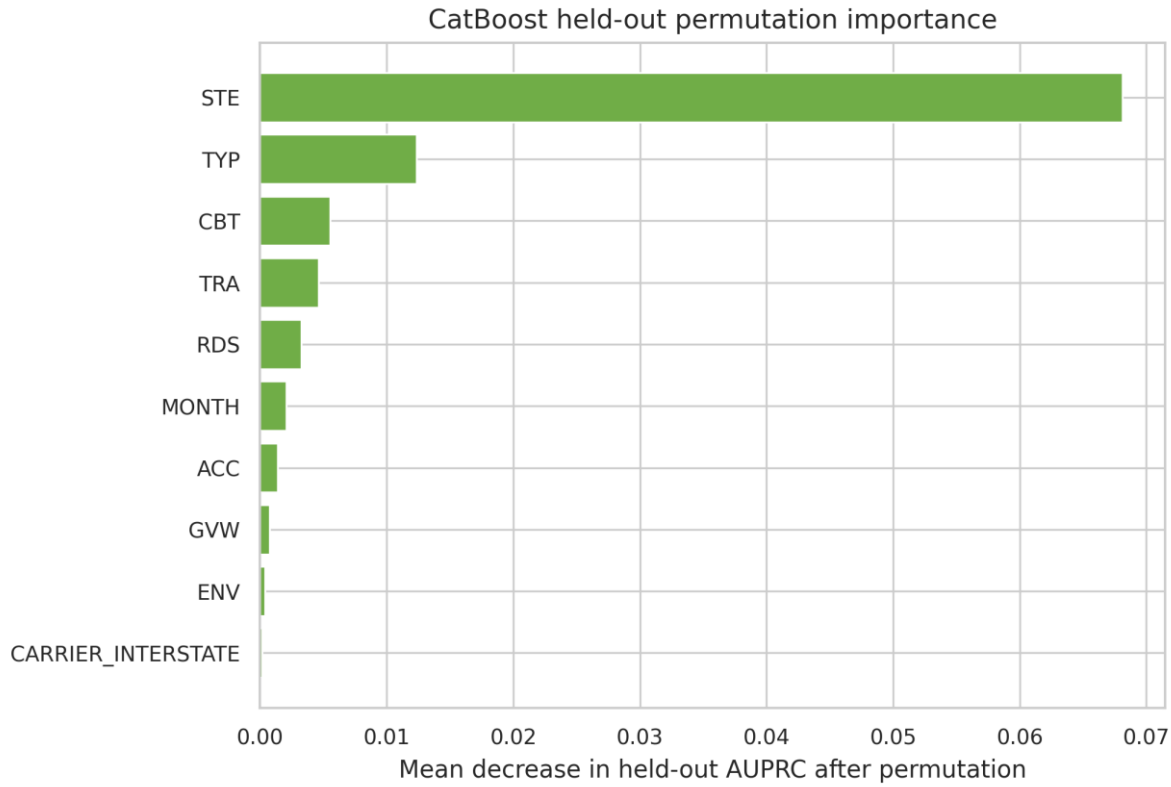


Figure 3. Held-out CatBoost permutation importance measured by the mean reduction in AUPRC after feature permutation.

4. DISCUSSION

The two modelling approaches yielded closely aligned results on the independent 2024–2025 period. Their AUROC values indicated modest discrimination, while AUPRC values remained above the casualty prevalence. The limited difference between Elastic Net and CatBoost suggests that the available fields contain a restricted amount of nonlinear predictive structure. CatBoost nevertheless produced slightly better probability accuracy and calibration and can therefore be retained as the primary predictive model, with Elastic Net providing a transparent reference specification.

Temporal stability was more informative than the small difference between algorithms. Similar AUROC, AUPRC and Brier estimates in 2024 and 2025 indicate that the models retained their aggregate performance after the training and validation periods. This contrasts with studies reporting year-to-year instability in individual severity determinants (Abdi and O'Hern, 2024;

Behnood and Mannering, 2019; Biglari et al., 2024). The findings are not directly contradictory because the present analysis evaluated overall predictive performance rather than testing whether each parameter remained statistically unchanged. Stable aggregate performance can coexist with changes in the contribution of individual predictors.

The cumulative analysis provides a clearer operational interpretation of the available data. Vehicle characteristics contributed appreciably beyond roadway, environmental and temporal conditions. Vehicle configuration was also the leading non-geographic variable in CatBoost permutation importance. This supports the inclusion of fleet and vehicle composition in commercial transport safety assessment. In contrast, interstate carrier status contributed little after the preceding fields were considered. A single administrative operating-status indicator therefore did not substitute for more detailed carrier or operational measures.

Reporting state provided the largest additional gain after vehicle information. This result should not be interpreted as a causal ranking of state safety. State can represent roadway systems, enforcement, fleet composition and regional operating environments, but it can also capture administrative coding and reporting differences. The Federal Motor Carrier Safety Administration has noted that state reporting completeness and eligibility practices can vary (Federal Motor Carrier Safety Administration, 2025). The lower performance of the state-excluded model therefore indicates that geographic and reporting-system heterogeneity is an important part of the classification signal. For decision support, national models should report their dependence on state information rather than treating geography as an ordinary risk factor.

The results have implications for industrial engineering and transportation operations. The models support portfolio-level screening and the prioritisation of safety analysis using information available in the curated administrative records. Their moderate discrimination is consistent with the restricted predictor set, which does not include several factors frequently examined in the literature, such as collision mechanism, speed, driver behaviour, time of day and carrier safety history. Within this information structure, the analysis provides temporally evaluated probability estimates and a transparent comparison of the contribution made by different data domains.

The temporal findings align with studies showing that large-truck severity relationships can change across years, time-of-day periods and weekday–weekend segments (Behnood and Mannering, 2019; Biglari et al., 2024; Faisal Habib et al., 2024). Those studies primarily tested the transferability of econometric parameters. The current results extend the same concern to predictive performance: the close 2024 and 2025 estimates suggest short-horizon stability for this model–dataset combination, although they do not establish long-term invariance. The chronological design is therefore more informative than a randomly mixed split for the stated future-year use case.

The information-block analysis also clarifies why the available performance is moderate. Vehicle characteristics raised the area under the precision–recall curve from 0.415 to 0.452, whereas operational status added only 0.001. Adding reporting state produced the largest subsequent gain, to 0.492. Prior research documents rural–urban, terrain and jurisdictional heterogeneity in truck crashes (Abdi and O'Hern, 2024; Islam et al., 2014; Zou et al., 2017), while official reviews document state differences in MCMIS completeness (Federal Motor Carrier Safety Administration, 2025; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017). The state contribution should therefore be read as contextual dependence. It supports state-aware validation and monitoring, but it does not show that residence in a particular state causes a casualty outcome.

5. CONCLUSION

This study evaluated casualty-outcome classification in 249,458 U.S. commercial truck crash records using a chronological development and testing framework. Elastic Net and CatBoost were trained on 2010–2022 observations, their decision thresholds were selected using the 2023 validation sample, and final performance was assessed on 32,645 records from 2024–2025. This separation ensured that the reported test estimates and operating thresholds were not derived from the final evaluation period.

The two models produced closely aligned discrimination and probability-accuracy results. CatBoost achieved an area under the receiver operating characteristic curve of 0.614, an area under the precision–recall curve of 0.497 and a Brier score of 0.228; the corresponding Elastic Net values were 0.611, 0.492 and 0.230. The bootstrap confidence intervals overlapped, indicating that the differences between the models were limited relative to sampling uncertainty. CatBoost offered higher sensitivity and F1 score at its validation-selected threshold, whereas Elastic Net provided higher specificity. Performance estimates were also similar in 2024 and 2025, supporting short-horizon consistency across the two test years.

The information-block analysis provided the clearest substantive result. Adding vehicle characteristics to roadway, environmental and temporal information increased the Elastic Net area under the precision–recall curve from 0.415 to 0.452. Interstate carrier status produced only a small additional change, while the inclusion of reporting state increased the value to 0.492. The state-excluded CatBoost analysis and held-out permutation results showed the same general pattern. Accordingly, a substantial part of the available classification signal was associated with geographic and reporting-state information, while vehicle configuration represented the most informative non-geographic domain.

These findings support the use of chronological evaluation and information-block analysis when administrative crash data are considered for transportation safety assessment. The results also show that a compact nonlinear model did not provide a large performance advantage over a regularised logistic specification for the available predictors. CatBoost can be retained for probability-based classification, while Elastic Net supplies a transparent reference for examining cumulative information contribution. Future extensions could evaluate transfer across individual states, longer test periods and additional driver, exposure and crash-mechanism variables while preserving the same time-ordered validation structure.

Data Availability

The dataset is publicly available from Mendeley Data at https://doi.org/10.17632/7rwjnhkz8d.1 under a CC BY 4.0 licence (Honeycutt, 2026). The present study constitutes a secondary analysis of this released dataset. The temporal restriction, casualty-outcome construction, predictor selection and model-validation procedures were defined for the present study and are described in the manuscript.

REFERENCES

Abdi, A., & O'Hern, S. (2024). Investigating the severity of single-vehicle truck crashes under different crash types using mixed logit models. *Journal of Safety Research, 88*. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.12.001

Behnood, A., & Mannering, F. (2019). Time-of-day variations and temporal instability of factors affecting injury severities in large-truck crashes. *Analytic Methods in Accident Research, 23*. https://doi.org/10.1016/j.amar.2019.100102

Biglari, S., Kofi Adanu, E., & Jones, S. (2024). A sequel to "Comprehensive analysis of single- and multi-vehicle large truck at-fault crashes on rural and urban roadways in Alabama": Accounting for temporal instability in crash factors. *Accident Analysis and Prevention, 206*. https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107723

Federal Motor Carrier Safety Administration. (2025). Large truck and bus crash facts 2022.

U.S. Department of Transportation. https://www.fmcsa.dot.gov/safety/data-and-statistics/large-truck-and-bus-crash-facts-2022-1

Faisal Habib, M., Motuba, D., & Huang, Y. (2024). Beyond the surface: Exploring the temporally stable factors influencing injury severities in large-truck crashes using mixed logit models. *Accident Analysis and Prevention*, *205*. https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107650

Honeycutt, John (2026), "De-identified U.S. Truck Crash Events with Standardized Operational and Environmental Classifications", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/7rwjnhkz8d.1

Irawati, N., Rosyidi, M., Fitri, H. A., Subaryata, Kurniawan, I., Mardiana, T. S., Bowo, L. P., Lestari, M. S., Mutharuddin, Handoyo, T., Harjono, M. S., Daulay, H., & Bismantoko, S. (2026). Predicting injury severity in truck-involved crashes using machine learning classifiers and cross-validation techniques. *IATSS Research*, *50*(2). https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2026.03.004

Islam, S., Jones, S. L., & Dye, D. (2014). Comprehensive analysis of single- and multi-vehicle large truck at-fault crashes on rural and urban roadways in Alabama. *Accident Analysis and Prevention*, *67*. https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.02.014

Mohammadpour, S. I., Khedmati, M., & Zada, M. J. H. (2023). Classification of truck-involved crash severity: Dealing with missing, imbalanced, and high dimensional safety data. *PLoS ONE*, *18*(3 March). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281901

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2017). Improving Motor Carrier Safety Measurement. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/24818

Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). Catboost: Unbiased boosting with categorical features. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *2018-December*.

Se, C., Champahom, T., Jomnonkwao, S., Boonyoo, T., Karoonsoontawong, A., & Ratanavaraha, V. (2025). Pickup truck crash severity analysis via machine learning: policy insights for developing countries. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, *32*(2). https://doi.org/10.1080/17457300.2025.2504975

Wei, F., Xu, P., Guo, Y., & Wang, Z. (2024). Exploring the injury severity of vulnerable road users to truck crashes by ensemble learning. *Journal of Transportation Safety and Security*, *16*(11). https://doi.org/10.1080/19439962.2024.2311408

Zheng, Z., Lu, P., & Lantz, B. (2018). Commercial truck crash injury severity analysis using gradient boosting data mining model. *Journal of Safety Research*, *65*. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.03.002

Zhu, X., & Srinivasan, S. (2011). A comprehensive analysis of factors influencing the injury severity of large-truck crashes. *Accident Analysis and Prevention*, *43*(1). https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.07.007

Zou, H., & Hastie, T. (2005). Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Statistical Methodology*, *67*(2). https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x

Zou, W., Wang, X., & Zhang, D. (2017). Truck crash severity in New York city: An investigation of the spatial and the time of day effects. *Accident Analysis and Prevention*, *99*. https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.11.024

İNSAN-ROBOT İŞ BİRLİĞİ (HRC) HÜCRELERİNDE ERGONOMİK GÜVENLİK KISITLI DİNAMİK ÇİZELGELEME VE MALİYET-FAYDA ANALİZİ

Öğr. Gör. Dr. Ömer Faruk ALACAHAN
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Rektörlük, İş Sağlığı ve Güvenliği Koordinatörlüğü, Sivas
ORCID ID: 0000-0001-9662-0324

Özet
Sanayi devrimlerinin evriminde Endüstri 5.0 paradigması, üretkenlik ile insan refahını bütünleştiren insan merkezli, sürdürülebilir ve esnek imalat sistemlerini ön plana çıkarmaktadır. İnsan-Robot İş Birliği (HRC) hücreleri, robotların fiziksel güç ve hassasiyetini insan operatörlerin bilişsel esnekliğiyle birleştirme potansiyeli taşımakla birlikte; geleneksel çizelgeleme yaklaşımlarının çoğunlukla yalnızca çevrim süresi (C_{max}) veya makine kullanım oranı gibi operasyonel metriklere odaklandığı, insan faktörünü ve birikimli kas-iskelet sistemi maruziyetlerini ise ikincil planda bırakabildiği görülmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, HRC montaj hücrelerinde operatörlerin biyomekanik yüklerini ve uluslararası iş sağlığı ve güvenliği (İSG) standartlarını (ISO/TS 15066, EN ISO 10218) dikkate alan Ergonomik Güvenlik Kısıtlı Dinamik Çizelgeleme ilkelerine dair literatür bulgularını ve bu hücrelerin finansal sürdürülebilirliğini değerlendiren Maliyet-Fayda Analizi yöntemlerini bütünsel bir çerçevede sentezlemektir. İncelemeler; dijital insan modelleme (DHM), çok amaçlı hedef programlama, çevrimiçi reaktif kontrol mimarileri ve ekonomik başabaş noktası analizlerini kapsayan güncel araştırmalar ışığında yürütülmüştür. Elde edilen sentez bulguları; ergonomik risklerin (spinal sıkışma, bel momenti, eklem yorulması vb.) birincil kısıt olarak sisteme dâhil edilmesinin operasyonel verimliliği engellemediği, aksine uzun vadeli üretim sürdürülebilirliğini destekleme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışma kapsamında, sanayi sahalarında HRC hücrelerinin güvenli ve kademeli kurulumuna rehberlik edebileceği değerlendirilen 6 aşamalı bir entegrasyon metodolojisi sunulmuştur. Sonuç olarak, ergonomik kısıtların ve maliyet dengelerinin eş zamanlı yönetildiği dinamik çizelgeleme yaklaşımlarının, Endüstri 5.0 vizyonu doğrultusunda hem çalışan sağlığını korumaya hem de üretim esnekliğini artırmaya katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.
Anahtar Kelimeler: İnsan-Robot İş Birliği (HRC), Dinamik Çizelgeleme, Ergonomik Risk, İş Güvenliği, Maliyet-Fayda Analizi, Endüstri 5.0.

ERGONOMIC SAFETY, CONSTRAINED DYNAMIC SCHEDULING, AND COST-BENEFIT ANALYSIS IN HUMAN-ROBOT COLLABORATION (HRC) CELLS

Abstract
In the evolution of industrial paradigms, Industry 5.0 highlights human-centric, sustainable, and resilient manufacturing systems that harmonize technological productivity with worker well-being. Although Human-Robot Collaboration (HRC) cells possess significant potential to combine robotic strength and precision with human cognitive flexibility, traditional scheduling models tend to focus primarily on operational metrics such as cycle time (C_{max}) or machine utilization, often leaving human factors and cumulative musculoskeletal exposure secondary. The primary objective of this study is to synthesize literature findings regarding Ergonomically Constrained Dynamic Scheduling principles—which account for operators' biomechanical loads and international occupational health and safety (OHS) standards (ISO/TS 15066, EN ISO 10218)—alongside Cost-Benefit Analysis methodologies that evaluate the financial viability of HRC assembly cells. The analysis examines recent research encompassing

digital human modeling (DHM), multi-objective goal programming, online reactive control architectures, and economic breakeven evaluations. The synthesized findings suggest that embedding ergonomic risks (e.g., spinal compression, low back moment, joint wear) as primary constraints into scheduling frameworks does not appear to impair operational continuity; rather, it tends to enhance long-term manufacturing sustainability. Furthermore, a 6-stage integration methodology is proposed as a managerial framework to guide the safe and structured implementation of HRC cells in industrial environments. Overall, dynamic scheduling approaches that concurrently manage ergonomic constraints and financial parameters are anticipated to foster both worker health protection and operational flexibility in alignment with the Industry 5.0 vision.
Keywords: Human-Robot Collaboration (HRC), Dynamic Scheduling, Ergonomic Risk, Occupational Safety, Cost-Benefit Analysis, Industry 5.0.

GİRİŞ

Sanayi devrimlerinin kronolojik gelişimi göz önüne alındığında, Endüstri 4.0'ın sunmuş olduğu dijitalleşme ve otomasyon odaklı sisteminin sonrasında gelen Endüstri 5.0 imalat paradigması, üretim süreçlerinde teknolojiyle birlikte insanı merkeze alan, sürdürülebilirlik temelinde çalışan refahını ve dayanıklılık prensiplerini yerleştirmeyi hedeflemektedir. Bu yeni dönemde robotlar, geleneksel fiziksel kafeslerin ve güvenlik bariyerlerinin arkasından çıkarılarak, insan operatörlerle aynı fiziksel çalışma alanını paylaşabilen ve onlarla doğrudan işbirliği içinde çalışan yardımcılar (kobot – cobot) haline getirilmiştir (Engin vd., 2025; Kurtay, 2026; Pearce vd., 2018). İnsan – Robot İşbirliği (Human – Robot Collaboration – HRC) sistemleri, insan operatörlerin bilişsel adaptasyon, karar verme ve esneklik gibi kabiliyetlerini, robotik sistemlerin hassasiyet, hız, güç ve yüksek tekrar edilebilirlik özellikleri ile harmanlayarak sinerji yaratmaktadır (Engin vd., 2025; Taji vd., 2022). Bu hibrit sistem sayesinde kişiselleştirilmiş ürün talepleri ve esnek imalat gereksinimleri başarıyla karşılanabilmektedir (Kurtay, 2026; Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).

Robotların imalat hatlarına entegrasyonu, belirtilen faydaların yanında insan ve makinenin yakın fiziksel etkileşimi nedeniyle ciddi güvenlik ve ergonomik riskler gibi olumsuz durumları da beraberinde getirmektedir (Engin vd., 2025; Kulaç & Kiraz, 2026; Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026). Geleneksel çizelgeleme ve imalat planlama modelleri, yalnızca çevrim süresinin (Cmax) en düşük seviyeye veya makine kullanım oranlarının en üst seviyeye getirilmesi gibi operasyonel metriklere odaklandığı (Kurtay, 2026; Pearce vd., 2018), buna karşılık insan faktörünü, fiziksel yorgunluğunu ve birikimli (kümülatif) kas – iskelet sistemi maruziyetlerini büyük oranda ihmal ettiği veya ikinci planda bıraktığı görülmektedir (Kulaç & Kiraz, 2026; Taji vd., 2022; Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026). İşçilerin sıralı olarak atandığı işler arasında uygun dinlenme sürelerinin verilmemesi, imalat kalitesinde düşüşe ve işyeri kazalarında artışa neden olabilirken (Kurtay, 2026); sürekli olarak yüksek fiziksel güç gerektiren işlere maruz bırakılmaları uzun vadede meslek hastalıklarından olan kas – iskelet sistemi bozukluklarına yol açabilmektedir. (Kulaç & Kiraz, 2026; Pearce vd., 2018; Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026). Bu tür hem fiziksel hem ergonomik düzensizlikler beraberinde tükenmişlik, yüksek işgücü (çalışan) devir hızı ve motivasyon kaybıyla (Kurtay, 2026) sonuçlanarak üretimin verimliliğinde düşüşe neden olabilmektedir (Kulaç & Kiraz, 2026).

Bu kapsamda üretim mühendisleri ve diğer paydaşlar, robotların operasyonel verimliliği ile çalışan sağlığı arasında keskin bir dengeleme (trade – off) ve uzlaşma (compromise) ikilemiyle karşı karşıyadır (Kulaç & Kiraz, 2026; Pearce vd., 2018)

Bu çalışmanın amacı, İnsan – Robot İşbirliği (HRC) montaj hücrelerinde, operatörün anlık fiziksel – biyomekanik durumunu ve uluslararası İSG kurallarını göz önünde bulundurarak

'Ergonomik Kısıtlı Dinamik Çizelgeleme' modelleme ilkelerini ve bu hücrelerin maliyetlerinin operasyonel faydalarla dengelendiği 'Maliyet – Fayda Analizi' yöntemlerini literatürden seçilen araştırmalar ışığında sentezlemeye çalışmaktır. Çalışma, teorik yaklaşımları pratik endüstriyel tavsiyelerle harmanlayarak bütünsel bir karar destek yapısı sunmayı hedeflemektedir.

TEORİK ÇERÇEVE VE LİTERATÜR TARAMASI

HRC etkileşimli imalat sahalarında çalışan refahının ve güvenliğin sağlanabilmesi adına yasal standartlar ve teknik şartnameler temel çerçeveyi oluşturmaktadır (Engin vd., 2025). Literatürde Tip A genel makine güvenlik standardı olan ISO 12100 risk değerlendirmesi aşamaları, endüstriyel robotlara özgü güvenlik ihtiyaçları ise EN ISO 10218 (Bölüm 1 – 2) standardıyla verilmiştir (Engin vd., 2025; Wadekar vd., 2018). Kobot operasyonlarına yönelik en önemli imalat şartnamesi ise Uluslararası Standardizasyon Örgütü'nün Şubat 2016 yılında yayımladığı ISO/TS 15066 teknik şartnamesidir (Engin vd., 2025; Pupa & Secchi, 2021). Bu şartname, insan bedenin kafa, göğüs, eller vb. farklı bölgelerine olası temas senaryolarında, bedenin emebileceği en yüksek kuvvet, basınç ve kinetik enerji sınırlarını hassas bir şekilde tanımlamaktadır. Ayrıca robotların operatöre olan mesafesine göre hızını azaltması veya tamamen durmasını zorunlu kılan 'Hız ve Ayrım İzleme' (Speed and Separation Monitoring – SSM) ve 'Güç ve Kuvvet Sınırlama' (Power and Force Limiting – PFL) gibi 4 (dört) ana işbirlikçi çalışma yöntemini dikkate almaktadır (Engin vd., 2025; Michalos vd., 2018).

İmalat alanlarındaki HRC hücrelerinde insan ve robot etkileşim dereceleri ile insan operatörlere düşen görev ve sorumluluklar literatürde sistematik şekilde 5 aşamada sınıflandırılmıştır (Engin vd., 2025; Kulaç & Kiraz, 2026):

1- Hücre seviyesi (Cell): Robot tamamen bariyerler arasında sınırlandırılmıştır, doğrudan insan etkileşimi yoktur (Engin vd., 2025).
2- Birlikte Çalışma (Coexistence): İnsan ve robot aynı ortamda yan yana çalışır ancak çalışma alanlarını paylaşmazlar (Engin vd., 2025; Kulaç & Kiraz, 2026).
3- Eş Güdüm (Synchronization): İnsan ve robot çalışma alanını paylaşır ancak sırasıyla imalat yaparlar (Engin vd., 2025; Kulaç & Kiraz, 2026).
4- İşbirliği (Cooperation): İnsan ve robot aynı çalışma alanında aynı anda farklı imalat bileşeni üzerinde çalışırlar (Engin vd., 2025).
5- Tam İşbirliği (Collaboration): İnsan ve robot, aynı imalat bileşeni üzerinde aynı anda ve dinamik uyum içinde çalışırlar (Engin vd., 2025; Kulaç & Kiraz, 2026).

Bu etkileşim seviyelerinde insanın üstlendiği 5 temel görev şu şekilde tanımlanmıştır:

1- Denetim Görevi: İnsan, robotun hareketlerini uzaktan seyreder ve denetler fakat doğrudan kontrol etmez (Engin vd., 2025; Taji vd., 2022).
2- Operatör Görevi: Robot programını değiştirerek robota yüksek düzeyde etkileşim sağlar (Engin vd., 2025).
3- Ekip Arkadaşı Görevi: İnsan ve robot arasında görevlerin bölüşüldüğü imalat grup çalışması yürütür (Engin vd., 2025; Taji vd., 2022).
4- Teknisyen Görevi: Robotun donanım değişimi veya programlanması insan tarafından yapılır (Engin vd., 2025).
5- Gözlemci Görevi: Robotla doğrudan etkileşimi olmasa da insan, robotun imalat davranışlarını çözümleyerek ortak çalışma alanında kendi bağımsız görevini yürütür (Engin vd., 2025).

Dinamik çizelgeleme alanındaki araştırmalar, teorik imalat standartlarının gerçek zamanlı imalat süreçleriyle bütünleşmesini incelemektedir (Pupa & Secchi, 2021). Modern reaktif çizelgeleyiciler geleneksel yaklaşımlardan farklı olarak insan davranışlarındaki değişken (stokastik) imalat belirsizliklerini (görev tamamlama zamanındaki gecikmeler veya bir imalat

görevi verilen çalışanın görevi reddetmesi vb.) eş zamanlı olarak yönetebilmektedir (Ionova & Behrens, 2024).

Pupa ve Secchi (2021) tarafından geliştirilen çift katmanlı kontrol mimarisinde, ilk katmanda dinamik çizelgeleme işlemi yapılırken, alt katmanda sensörler vasıtasıyla insan operatör izleme stratejisi (human tracking strategy) ile gözlemlenmekte ve robot imalat yörüngeleri uluslararası standartlara göre gerçek zamanlı bir şekilde ölçeklenmektedir. Bununla birlikte, literatürde statik postüral değerlendirme yöntemlerinin (RULA, REBA, OWAS vb.) yanı sıra, insan eklemlerindeki birikimli yorulmayı tahmin edebilmek için dinamik Kinematik Yıpranma 'Kinematic Wear' (K-Wear) indeksi (Merlo vd., 2023) ve görev tekrarlılığına, vardiya saatine ve insan operatör tercihlerine göre zaman performansını ölçekleyen deneysel yorgunluk formülasyonları da önerilmiştir (Taji vd., 2022).

Tablo 1'de HRC çizelgeleme ve ergonomi ile ilgili bazı çalışmaların kıyaslanması verilmiştir.

Tablo 1. HRC Çizelgeleme ve Ergonomi Çalışmalarının Metodolojik Kıyaslaması

Kaynak	Ele Alınan Yöntem / Model	Ergonomik Metrikler	Çizelgeleme Türü	Temel Sektörel Bulgular
Kurtay (2026)	Çok Amaçlı Karma Tam Sayılı Hedef Programlama	Yorgunluk limiti, Çalışan Memnuniyeti	Statik / Vardiyalık Planlama	Ağırlık analizi ile hedef belirleme (Memnuniyet: 0.36, Beceri: 0.31). 24 çalışan ve 96 iş için optimum sonuçlar.
Yetkin & Haktanırlar Ulutaş (2026)	DHM Simülasyonu ve Deney Tasarımı (2^6)	Spinal sıkışma, L4/L5 momenti, Enerji tüketimi	Çok Yanıtlı İstenirlik Optimizasyonu	Erişim alanı imalat optimizasyonuyla risklerde %50'ye varan azalma, maliyet-refah dengesi.
Stecke & Mokhtarzadeh (2022)	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama & Benders Ayrışımı	Enerji Tüketimi (Metabolik Hız)	Mobil ve İmmobil Robot Çizelgeleme	Robot/istasyon oranı 0.7 ve mobil robot oranı %37 olduğunda imalat verimliliği en üst seviyededir.
Pupa & Secchi (2021)	Çift Katmanlı Reaktif Çizelgeleme Mimarisi	İnsan izleme tabanlı dinamik mesafe	Gerçek Zamanlı Çevrimiçi Çizelgeleme	İnsanın anlık imalat gecikmelerine göre görevlerin robota reaktif devri, hız ölçekleme.
Merlo vd. (2023)	AND/OR Grafikleri (AOG) & AO* Arama Algoritması	Kinematic Wear (KWear) eklem yorulması	Dinamik Rol Dağıtımı	Eklemlerin kümülatif kullanımı izlenerek sınır değer aşımında imalat görevleri robota dinamik devredilir.
Kulaç & Kiraz (2026)	Bulanık Mantık Sentezi ve Ergo-MMALBP-HRC	REBA, OCRA, QEC, COPSOQ (Çok boyutlu)	Karışık Model Hat Dengeleme	Fiziksel, çevresel ve psikososyal risklerin imalat minimizasyonu. Risklerde %48 azalma.

ERGONOMİK GÜVENLİK KISITLI DİNAMİK ÇİZELGELEME MODELLEME İLKELERİ

HRC hücrelerinde imalat sağlığı ve verimliliği en uygun şekle getirmeyi amaçlayan matematiksel modelleme ilkeleri, Endüstri 5.0'ın paradigması olan insan ve çevre odaklı imalat

anlayışını temel almaktadır. Kurtay (2026) tarafından önerilen 'Çok Amaçlı Karma Tam Sayılı Hedef Programlama' modeli, hedeflenen dört temel performans kıstaslarından sapmaları (sapma miktarları: d^- ve d^+) en aza indirmeye odaklanmıştır. Bu hedefler şu şekilde sıralanabilir:

1. Hedef 1 (H1) – Çevrim Süresi (Cmax) Optimizasyonu: İmalat döngüsü zamanının fabrikanın nominal kapasitesiyle uyumluluğunu eşitlemek ve fazla mesaiyi kısıtlamak (Kurtay, 2026).
2. Hedef 2 (H2) – Çalışan Memnuniyeti: Çalışanların kendilerine verilen işlerden memnuniyet ortalamasını istenen hedefin üzerinde kalmasını sağlamak (Kurtay, 2026).
3. Hedef 3 (H3) – Beceri Uyumluluğu: Her çalışanın verilen işin gerekliliğiyle bireysel yetenek seviyesini %70 ve üzerinde uyumlu hale getirerek doğru iş ile doğru çalışanın eşleşmesini sağlamak (Kurtay, 2026).
4. Hedef 4 (H4) – İş Yükü Dengelenmesi: En az ve en çok iş yüklenen çalışanlar arasındaki iş yükü dengesizliğini en aza indirerek iş adaletini ve çalışan tükenmişliğinin önlenmesini teşvik etmek (Kurtay, 2026).

Modelin operasyonel kısıtları ise bütçe sınırlarını (BS), sıralı işler arasındaki önceliklendirme ve robot kullanım oranını (RKO) kontrol etmektir. HRC sistemlerinin en önemli unsurlarından biri olan çalışan – robot koordinasyonu kapsamında işlerin en az %25'inin robotlar tarafından yapılmasını RKO kısıtı ile garanti altına alınmaktadır. Fakat H2, H3 ve RKO kısıtlarının asıl formları birbirleriyle bağlantılı doğrusal olmayan paydalar içermektedir. Çözüm sürecinin hızlandırılması ve matematiksel çözücü programlar aracılığıyla en uygun sonuçların elde edilmesi için, bu kısıtlar payda eşitleme yöntemleriyle matematiksel anlamda doğrusallaştırılmıştır. Bununla birlikte çalışanların fiziksel sınırlarını korumak için sıralı imalat görevleri arasında 1 saatlik zorunlu dinlenme süreleri eklenmiştir. Bir çalışana verilen sıralı işlerin başlama zamanlarının, bir önceki işin tamamlanma zamanı ve dinlenme süresinin toplamından daha az olamayacağı Gantt şeması analizi ile garanti altına alınmıştır (Kurtay, 2026). İstasyon seviyesi gibi küçük ölçekte, robotların anlık hareketlerinin planlanmasında kısıt tabanlı reaktif çevrimiçi çizelgeleyiciler kullanılmaktadır. Bu çizelgeleyici, davranış ağaçları (behavior trees) ile insan operatörün anlık imalat aşamalarını ve gecikmelerini izleyerek robotun bir sonraki görevini dinamik olarak yeniden planlamaktadır (Ionova & Behrens, 2024). Bu sürece benzer şekilde Konstant vd. (2025) sunmuş olduğu modelde, simülasyon tabanlı takviyeli öğrenme (reinforcement learning) entegreli Petri – net çizelgeleyicileri, imalat montaj aşamalarında insan – robot arasında görev dağılımını otomatik olarak koordine ederek ergonomik maliyeti optimize etmektedir (Konstant vd., 2025).

MALİYET-FAYDA ANALİZİ VE EKONOMİK SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Güvenlik ve ergonomi odaklı HRC hücrelerinin kurulum maliyeti başlangıç aşamasında yüksek bir sermaye yatırımı gerektirmektedir. Navas – Reascos vd. (2023), Engin vd. (2025) ve Yetkin ve Haktanırlar Ulutaş (2026) tarafından belirtilen finansal analizlere göre bahsedilen yatırımlar şu kalemlerden oluşmaktadır:

1- Kobot (Cobot) Tedariki: Çeşitli imalat yük sınıflarına (faydalı yük taşıma kapasitelerine sahip) göre kobot donanım yatırımı (Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).
2- Entegrasyon ve Kurulum: Hücre/Hücrelerin montajı, pnömatik ve elektrik bağlantıları (Navas-Reascos vd., 2023; Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).
3- Güvenlik Ekipmanları: Güvenlik bariyerleri, emniyet röleleri, 3 boyutlu kameralar, lazer alan tarayıcılar vb. (Engin vd., 2025; Navas-Reascos vd., 2023)
4- Yazılım ve Yazılım Lisansları: Ergonomik analizler ve süreç simülasyonları için endüstriyel yazılım lisans maliyetleri (Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).
5- Personel Eğitimi: Operatörlerin ve bakım ekiplerinin kobot güvenliği ve programlanması hakkında eğitim alması (Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).

Bahsedilen yüksek başlangıç kurulum maliyetlerine rağmen, HRC sistemlerinin operasyonel süreçte sağladığı insani ve maddi faydalar, yatırımın finansal açıdan sürdürülebilirliğini kanıtlamaktadır. En belirgin faydalarından biri tekrarlayan zorlayıcı işlerin kobota verilmesiyle iş kazaları ve meslek hastalıklarının önüne geçileceği ve buna bağlı olarak iş gücü kaybı, tazminat ödemeleri ve sağlık sigortası gibi maddi yükümlülüklerin önemli oranda azalacağı öngörülmektedir (Kurtay, 2026; Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026). Ayrıca reaktif çizelgeleme yöntemiyle insan operatörün anlık gecikmelerinde işlerin robota devredilmesi, robotun atıl sürelerini en aza düşürerek toplam imalat süresini optimize etmektedir (Pupa & Secchi, 2021). Ekonomik imalat açısından, kobot yatırımının başabaş noktası (breakeven point) ve yatırım geri dönüş süresi, ülkelerin işçilik ücretleriyle doğrudan ilişkilidir. İşçilik ücretlerinin yüksek olduğu ülkelerde montaj maliyetlerinin de yüksek olması sebebiyle kobot yatırımı çok daha kısa sürede kendini amorti ederken, işçilik ücretlerinin düşük olduğu ülkelerde amortisman süresinin uzayabileceği belirtilmektedir (Navas-Reascos vd., 2023).

Yetkin ve Haktanırlar Ulutaş (2026) yaptıkları çalışmada, imalat optimizasyonu temelli maliyet analizinde, sadece maliyet minimizasyonu amaçlandığında kobot kullanılmayan senaryoda yıllık maliyeti (sadece çalışan maliyeti) 82.125 Euro (€) olarak, hem çevrim süresinin hem de ergonomik risklerin aynı anda en fazla azaltıldığı (2 kobotlu çalışma) senaryonun maliyetini 216.192,4 € olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte bu iki alt ve üst senaryonun ortasında kalan çalışan ergonomisini, imalat verimliliğini ve maliyeti dengeleyen senaryoda (1 kobotlu çalışma) maliyeti 150.793,7 € olarak hesaplamışlardır. Tablo 2'de çalışan ve kobot ile ilgili maliyet kalemleri yıllık olarak verilmiştir (Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).

Elde edilen bu bulgunun, Endüstri 5.0'ın öngördüğü insan – makine hücre dengesinin, ekonomik sınırlar göz önünde bulundurulduğunda da rasyonel ve sürdürülebilir çözümlerden biri olduğu düşünülmektedir.

Tablo 2. Çalışan ve Kobot ile İlgili Yıllık Maliyet Kalemleri (Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026)

Maliyet Kalemleri	0 Kobot (Manuel)	1 Kobotlu Hücre	2 Kobotlu Hücre
İşbirliğine dayalı çalışma hücresi satın alma ve uygulama maliyeti	-	50.000,00 €	100.000,00 €
Operatör eğitim masrafı	-	3.000,00 €	3.000,00 €
Yıllık robot hücresi bakım maliyeti (€/yıl)	-	2.500,00 €	5.000,00 €
Yıllık robot hücresi enerji tüketimi maliyeti (€/yıl)	-	50,69 €	101,38 €
Yıllık robot programlama, kurulum ve entegrasyon maliyeti	-	13.118,01 €	25.966,02 €
Çalışan yıllık çalışma maliyeti	82.125,00 €	82.125,00 €	82.125,00 €
TOPLAM YILLIK MALİYETLER	**82.125,00 €**	**150.793,70 €**	**216.192,40 €**

SEKTÖREL UYGULAMA TAVSİYELERİ VE GELECEK YÖNELİMLER

HRC hücre teknolojilerinin imalat hatlarına başarılı bir şekilde entegrasyonu için 6 aşamalı bir metodoloji önerilmektedir. Literatürdeki çalışmalardan derlenen metodoloji şu şekildedir (Engin vd., 2025; Michalos vd., 2018; Wadekar vd., 2018; Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026):

Aşama 1 – Ön Risk Değerlendirmesi (Michalos vd., 2018): Hücrede gerçekleştirilecek imalat montaj adımlarının (örn: parça alma, yerleştirme vb.) kapsamlı analizi yapılarak, her bir adımla alakalı olası tehlike ve riskler tanımlanır ve risk dereceleri değerlendirilir (Wadekar vd., 2018).

Aşama 2 – Sanal Ortamda Modelleme (Digital Twin): Üç boyutlu tasarım ve simülasyon programları aracılığıyla imalat montaj hücresinde yer alan kobotun, konveyörlerin, kutuların vb. konumları modellenir (Wadekar vd., 2018; Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).

Aşama 3 – Ergonomik Risk ve Zaman Analizi: Görev süreleri önceden belirlenmiş hareket zaman sistemlerine bağlı olarak dijital ortamdaki insan mankenler üzerinde RULA, spinal sıkışma kuvvetleri ve enerji tüketimleri tahmin edilerek analiz gerçekleştirilir (Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).

Aşama 4 – Çok Amaçlı Optimizasyon ve Deney Tasarımı: En uygun kobot sayısı, parça ağırlığı ve imalat yerleşim mesafeleri, çok yanıtlı istenirlik fonksiyonları ve deney tasarımı (DoE) kullanılarak optimize edilir (Yetkin & Haktanırlar Ulutaş, 2026).

Aşama 5 – Güvenlik Bölgelerinin Tasarımı: Lazer alan tarayıcılar aracılığıyla dinamik uyarı ve durdurma imalat bölgeleri (Warning – Danger zones), ISO/TS 15066 ve ISO 13855 standartlarına göre belirlenir (Engin vd., 2025; Michalos vd., 2018).

Aşama 6 – Fiziksel Entegrasyon ve Doğrulama: Prototip kurulumu yapılarak gerçek zamanlı optik iskelet takip (tracking) sensörleri entegre edilir. Bu kurulum sayesinde uluslararası İSG standartlarına göre emniyet sistemi doğrulaması tamamlanmış olur (Engin vd., 2025; Michalos vd., 2018; Pupa & Secchi, 2021).

Gelecekteki çalışmalar açısından, HRC modellerinin öğrenme-unutma etkilerini de içeren dinamik operatör performansı, görev karmaşıklığına göre bilişsel yorgunluk ve gerçek zamanlı insan-robot müzakere protokolleri ile genişletilmesi, bu çalışmada incelenen literatürde ilerleme sağlanabilecek en önemli alanlar arasında yer alabileceği değerlendirilmektedir (Ionova & Behrens, 2024; Kulaç & Kiraz, 2026; Merlo vd., 2023; Taji vd., 2022). Özellikle, yapay zeka ve büyük veri analizleri ile zenginleştirilmiş reaktif çizelgeleme metotlarının, insan davranışlarının olasılıksal davranış (stokastik) doğasını daha yüksek bir hassasiyetle tahmin ederek sistemin esnekliğini artırma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir (Engin vd., 2025; Ionova & Behrens, 2024).

SONUÇ

Bu çalışmada, Endüstri 5.0'ın getirdiği insan-teknoloji imalat iş birliği geleceği çerçevesinde, HRC hücrelerinde ergonomik güvenlik kısıtlı dinamik çizelgeleme modelleri ve maliyet-fayda hesabı koşullarına bağlı olarak kapsamlı bir şekilde sentezlenmeye çalışılmıştır. Literatürden seçilen belirli güncel çalışmalar üzerinde yapılan detaylı incelemeler sonucunda, insan operatörlerin sağlığını ve ergonomisini (spinal sıkışma, bel momenti, eklem yorulması ve Strain Index vb.) birincil öncelik olarak alan imalat çizelgeleme metotlarının, üretim hatlarının operasyonel sürekliliğini ve verimliliğini baltalamadığı anlaşılmaktadır. Aksine uzun vadeli sürdürülebilirliğin önemli adımlarından biri olduğu gözükmektedir. Matematiksel modellerde payda eşitleme yoluyla yapılan doğrusallaştırma basamakları, çözücü sistemlerin etkinliğini artırırken, çevrimiçi reaktif imalat çizelgeleyicilerin insan belirsizliği faktörünü başarıyla yönettiği görülmektedir.

Finansal açıdan ele alındığında ise, kobot ve güvenlik sensörü entegrasyonu yüksek başlangıç yatırımı gerektirse de ülkelerin işçilik ücretlerine bağlı olarak başabaş noktasına (breakeven point) kısa sürede ulaşılabildiğini ve imalata/üretime bağlı meslek hastalıklarının önlenmesiyle

de elde edilen operasyonel faydaların yatırımı imalat açısından rasyonel kıldığı görülmektedir. Sonuç olarak bu çalışma üretim yöneticileri için somut bir entegrasyon yol haritası sunabilmesiyle birlikte gelecekteki deneysel ve antropometrik imalat çalışmaları için akademik bir temel oluşturabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Engin, O., Gökmen, G., Anlıaçık, M. Y., & Turgut, D. (2025). İnsan ile Küçük Endüstriyel Robot İşbirliğinde Güvenlik Sistemleri Analizi: ISO/TS 15066 Spesifikasyonu. *ALKU Journal of Science*, *2*(7), 94-110.

Ionova, M., & Behrens, J. K. (2024). CoBOS: Constraint-Based Online Scheduler for Human-Robot Collaboration. *2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 7131-7137. https://doi.org/10.1109/IROS58592.2024.10801885

Konstant, A., White, N., Mutlu, B., & Radwin, R. G. (2025). Ergonomics Analysis for a Simulation Approach to Human-Robot Collaborative Task Allocation. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, *13*(4). https://doi.org/10.1080/24725838.2025.2562469

Kulaç, S., & Kiraz, A. (2026). Collaborative robot integration in mixed-model assembly line balancing with ergonomic risk considerations. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. https://doi.org/10.1007/s10696-026-09662-9

Kurtay, K. G. (2026). Endüstri 5.0'da insan-robot iş birliği: İş gücü planlama optimizasyon modeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *41*(1), 413-426. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1778548

Merlo, E., Lamon, E., Fusaro, F., Lorenzini, M., Carfì, A., Mastrogiovanni, F., & Ajoudani, A. (2023). An Ergonomic Role Allocation Framework for Dynamic Human-Robot Collaborative Tasks. *Journal of Manufacturing Systems*, *67*, 111-121. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.011

Michalos, G., Kousi, N., Karagiannis, P., Gkournelos, C., Dimoulas, K., Koukas, S., Mparis, K., Papavasileiou, A., & Makris, S. (2018). Seamless human robot collaborative assembly – An automotive case study. *Mechatronics*, *55*, 194-211. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.08.006

Navas-Reascos, G. E., Romero, D., Rodriguez, C. A., Guedea, F., Stahre, J., & Salunkhe, O. (2023). A cost-benefit analysis for a wire harness assembly workstation: Manual vs. collaborative workstation. *Manufacturing Letters*, *38*, 65-68. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.09.011

Pearce, M., Mutlu, B., Shah, J., & Radwin, R. (2018). Optimizing Makespan and Ergonomics in Integrating Collaborative Robots Into Manufacturing Processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *15*(4), 1772-1784. https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2789820

Pupa, A., & Secchi, C. (2021). A Safety-Aware Architecture for Task Scheduling and Execution for Human-Robot Collaboration. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1895-1902. https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636855

Stecke, K. E., & Mokhtarzadeh, M. (2022). Balancing collaborative human–robot assembly lines to optimise cycle time and ergonomic risk. *International Journal of Production Research*, *60*(1), 25-47. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1989077

Taji, H., Ayad, G., & Zaki, A. (2022). Optimal scheduling in a Collaborative robot environment and evaluating workforce dynamic performance. *ITM Web of Conferences*, *46*, 01004. https://doi.org/10.1051/itmconf/20224601004

Wadekar, P., Gopinath, V., & Johansen, K. (2018). Safe Layout Design and Evaluation of a Human-Robot Collaborative Application Cell through Risk Assessment – A Computer Aided Approach. *Procedia Manufacturing*, *25*, 602-611. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.095

Yetkin, B. N., & Haktanırlar Ulutaş, B. (2026). İnsan-robot işbirliği içeren bir istasyonda ergonomik risk optimizasyonu için dijital insan modellemesi ve deney tasarımının uygulanması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *41*(1), 1-15. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1544644

ANKARA'DA KAMU YÖNETİMİ ARAŞTIRMALARININ AMPİRİK YÖNELİMİ: LİSANSÜSTÜ TEZLER ÜZERİNDEN BİBLİYOMETRİK BİR İNCELEME

Prof. Dr. Selma KARATEPE
İstanbul Nişantaşı University, Faculty of Economics, Administrative and Social Sciences, Department of Business Administration, 34000 Sarıyer, İstanbul
ORCID ID: 0009-0004-7119-7717
Doç. Dr. A. Muhammet BANAZILI
Tarsus University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Political Science and Public Administration, 33000 Tarsus, Mersin
ORCID ID: 0000-0002-5088-9587

ÖZET
Bu tebliğin amacı Ankara'daki üniversitelerde kamu yönetimi alanında ampirik yöntemlerle hazırlanan lisansüstü tezlerin gelişimini ve temel araştırma eğilimlerini bibliyometrik açıdan incelemektir. Araştırma, 2019-2024 yılları arasında tamamlanan lisansüstü tezleri kapsamaktadır. Ankara özelindeki görünümü daha geniş bir çerçevede değerlendirebilmek amacıyla aynı dönemde Türkiye genelinde kamu yönetimi alanında hazırlanan tezler de incelemeye alınmıştır. Araştırmada bibliyometrik analiz yöntemi benimsenmiş, veriler Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edilmiştir. Bu kapsamda "Kamu Yönetimi" anahtar kelimesiyle ulaşılan 5.377 lisansüstü tez incelenmiş; deney, anket veya mülakat tekniklerinden en az birine dayanan 1.249 tez ampirik araştırma kapsamında değerlendirilmiştir. Ankara'daki üniversitelerde ise bu ölçütleri karşılayan 145 lisansüstü tez tespit edilmiştir. Bulgular, Ankara'daki ampirik tez üretiminin yıllar itibarıyla doğrusal bir seyir izlemediğini ve 2019 yılında belirgin biçimde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. İncelenen 145 tezin 110'u yüksek lisans, 35'i doktora tezidir. Üniversiteler bazında Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi 51 tezle ilk sırada yer alırken, Hacettepe Üniversitesi 26, Ankara Üniversitesi 21 ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi 15 tezle öne çıkmaktadır. Ayrıca tezlerin yaklaşık üçte ikisinin profesör ünvanına sahip akademisyenlerin danışmanlığında yürütüldüğü belirlenmiştir. Bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde Ankara'daki kamu yönetimi araştırmalarında ampirik yaklaşımın ağırlıklı olarak yüksek lisans düzeyinde karşılık bulduğu ve tez üretiminin belirli üniversitelerde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır.
Anahtar kelimeler: Kamu yönetimi, ampirik yöntem, lisansüstü tez çalışmaları, Ankara üniversiteleri, bibliyometrik analiz

EMPIRICAL TRENDS IN PUBLIC ADMINISTRATION RESEARCH IN ANKARA: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF POSTGRADUATE THESES

ABSTRACT
This conference paper aims to examine, from a bibliometric perspective, the development and major research trends of postgraduate theses employing empirical methods in the field of public administration at universities in Ankara. The study covers postgraduate theses completed between 2019 and 2024. To situate the Ankara-specific findings within a broader context, theses produced in the field of public administration across Türkiye during the same period were also included in the analysis. A bibliometric analysis was conducted using data retrieved from the Council of Higher Education (YÖK) National Thesis Center. A total of 5,377 postgraduate theses identified using the keyword "Public Administration" were reviewed, of which 1,249 were classified as empirical studies based on their use of at least one of the following data

collection techniques: experiments, surveys, or interviews. Among these, 145 theses were completed at universities in Ankara. The findings reveal that empirical thesis production in Ankara did not follow a linear trend over the study period, with a marked concentration in 2019. Of the 145 theses examined, 110 were master's theses and 35 were doctoral dissertations. Ankara Hacı Bayram Veli University ranked first with 51 theses, followed by Hacettepe University with 26, Ankara University with 21, and Middle East Technical University with 15. In addition, approximately two-thirds of the theses were supervised by academics holding the rank of professor. Overall, the findings suggest that empirical research in public administration in Ankara has been concentrated primarily at the master's level and within a relatively limited number of universities.
Keywords: Public administration, empirical method, post-graduate thesis studies, Ankara university's, bibliometric analysis

1. GİRİŞ

Rönesans döneminde Orta Çağ Biliminin ortaya çıkmasına zemin hazırlayan; günümüzde modern bilimin temellerini atan, antik deneyciler tarafından geliştirilen ve "empeirikos" kelimesinden türeyen ampirizm deneyim ya da gözlem yoluyla veya bilimsel araçlar seti kullanarak bilgiye erişilmesi anlamına gelmektedir (Fırıncı-Orman, 2015, s. 242). Dolayısıyla ampirik kelimesinin verilere ulaşabilmek için deney ve gözleme dayanılması gerekmektedir (Sönmez, 2024: 86-87). Bilhassa Orta Çağ'da Kilise'nin bilgiyi üretme ve üretilen bilgileri yayma misyonunu ifade eden skolastik düşüncenin güç kaybetmesiyle birlikte (Güven vd., 2023, s. 117) bireyler/düşünürler rasyonel düşünme, deney ve gözlem yapma biçiminde bilimsel bir tavır takınmaya başlamışlardır (Cengiz, 2024, s. 243). Deney, gözlem ve rasyonel sorgulamanın başlamasıyla bilimin ilerlemesi gerek Avrupa'da gerek İslam Uygarlığında Modern Çağın kapılarını açılmasına oradan da modern bilimin doğuşuna katkı sağlamıştır (Başaran, 2021, s. 171-173).

Bilgiye doğrudan ulaşabilmek için başvurulan ampirik yöntemin çalışmaları daha özgün ve yetkin kıldığı düşülmektedir. Bunun sebebi ampirik çalışmaların bilgiyi daha nesnel kıldığı ve bilginin konusunu oluşturan olay veya olguların gözlemlenebilir olmasından kaynaklanmaktadır (Karaca, 2021, s. 1-2). Yani bilginin doğru bilginin kaynağının dış dünyadan gelen deney, gözlem ve faaliyetlerle başladığının altı çizilmektedir (Öktem & Karagöz, 2015, s. 40). Bununla birlikte içerisinde bir takım avantaj ve dezavantajları da barındırmaktadır (Yavuz, 2022; Tutar, 2022): Avantajları arasında çeşitli deneyler ve gözlemler aracılığıyla geleneksel araştırmaları doğrulaması, araştırmacının meydana gelebilecek dinamik değişiklikleri kavrayabilmesini ve stratejisini buna göre uyarlayabilmesini, araştırmacının birden çok değişkeni kontrol edebilmesini ve çalışmanın geçerliliğini artırabilmesi ampirik çalışmaların avantajları arasında yer almaktadır. Dezavantajları arasında ise zaman alıcı olabileceğinden dolayı sabır gerektirmektedir. Ayrıca araştırmacının farklı yerlerde ya da ortamlarda araştırma yapması gerektiği durumlarda bu yöntem maliyetli olabilmektedir. Verilerin farklı yöntemlerle çeşitli kaynaklardan toplanması gerektiğinden, verilerin toplanması için ilgili kurum veya kuruluşlardan belirli izinlerin alınması sorun olabilmektedir.

Ampirik araştırmalarda araştırma sorusunu çözümleyebilmek için uygun verilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu verilerin elde edilebilmesi için çeşitli araçlardan istifade edilmektedir. Ampirik araştırmalar açısından bakıldığında bu araçlar arasında daha ziyade olarak birincil veriyi elde etmeye yönelik anket, deney, görüşme (mülakat) ve gözlem karakteristikleri yer almaktadır (Usta, 2011, s. 191). Dolayısıyla bu tür araştırmalarda daha çok bir girişim söz konusu olup araştırmacı kendi bilgisini kendi üretmeye çalışmaktadır. Akademideki birçok disiplin içerisindeki araştırmaların incelenmesinde ve genel yapının ortaya konulmasında fırsat

sunabilen bibliyometri aracılığıyla (Aslancı, 2022, s. 165); kamu yönetiminin değişen, dönüşen ve gelişen epistemolojisi ve metodolojisinin kavranabilmesi noktasında da disiplinler arası veriler sunabilmektedir (Tabak vd., 2015, s. 86-87). Fakat buna karşılık Türk Kamu Yönetimi alanında metodoloji kullanımının Batı ülkelerine kıyasla oldukça geri kalması (Önder vd, 2019, s. 105) ve bunun yanında birincil veri elde edilmesi için başvurulan ampirik yöntem çalışmalarının yine yurt dışı menşeli çalışmalara kıyasla bir hayli geri kalması (Ayhan vd., 2022, s. 7) Türkiye'deki kamu yönetimi alanında hazırlanmış olan ampirik çalışmaların niceliksel değerlerinin durumunun nasıl olduğu konusunda merak uyandırmaktadır. Kamu yönetimi çalışmalarında empirist araştırma yaklaşımlarını benimseyen araştırmacıların ortaya koyacakları niceliksel ve niteliksel modellemelerin gerçeğe daha yakın olabileceği iddiası ise (Luton, 2007, s. 528-529) bu merak hissini canlı tutmaktadır. Çalışmada söz konusu ampirik çalışma araçları tanımına uygun olarak kamu yönetimi alanındaki çalışmalar irdelenerek deney, anket veya görüşme (mülakat) araçlarından bir tanesi ya da birden fazlasını içeren tezler ele alınmıştır. Bu veriler elde edilirken YÖK Tez arşivindeki 2019-2024 yılları arasındaki tezler bibliyometri analiz yöntemiyle incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak ampirik çalışma ve bibliyometri kavramlarına değinilerek ardından çalışmanın yöntemi ve bulguları izah edilerek sonuç kısmıyla tamamlanmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE: AMPİRİK ÇALIŞMA VE BİBLİYOMETRİ

Ampirizm kavramı bilginin kaynağını deneye dayandıran akıma karşılık gelen bir kavramdır. Bu kavrama göre deneyden bağımsız bir bilgi söz konusu olamaz. İdealler, kavramlar ya da tümeller ampirizme göre deneyden türetilmiştir (Cevizci, 2016, s. 180). Dolayısı ile ampirizm pozitivist bakış açısının bir ürünüdür. Ampirik çalışma ve pozitivizm arasında sıkı bir ilişki vardır. Pozitivizm, bilginin sadece gözlemlenebilir gerçeklerden türetilebileceğini ve bilimdeki başarının gözleme dayanan ampirik kanıtların titiz bir şekilde analizine dayandığını savunur.

Pozitivizm insan etkinliğinin genel kalıplarını kestirmek için gözleme dayanan, nesnel yasalar bulma ve bunları tümdengelimci yaklaşımla doğrulama amacını taşıyan bir felsefi yaklaşımdır. Başka bir deyişle, pozitivizm, bilginin sadece gözlemlenebilir gerçeklerden türetilebileceğini ve bu gerçeklerin nesnel bir şekilde analiz edilmesi gerektiğini savunur. Bu nedenle, pozitivist bir yaklaşım, insan davranışlarındaki genel kalıpları kestirmek ve anlamak için sistematik bir yöntem sağlar. Bu yöntem bireysel gözlemlerden genel yasalar çıkarma ve bu yasaları doğrulama sürecini içerir. Ampirik gözlemler, bu genel yasaların temelini oluşturur ve tümden gelimci mantık bireysel gözlemlerden genellemeler yapmayı sağlar. Bu şekilde, pozitivizm insan etkinliğini anlamak için sistematik bir çerçeve sunar (Neuman, 2006, s. 122). Bu bağlamda, ampirik çalışma pozitivist bir bakış açısını yansıtır çünkü bu tür çalışmalar gözlem ve deneylere dayanır. Ampirik araştırmalar hipotezlerin deneysel olarak test edilmesi ve gözlemlenebilir verilerin analiz edilmesi yoluyla bilgi üretmeye odaklanır. Bu, pozitivist felsefeye uygun bir yaklaşımdır, çünkü pozitivizm, bilginin doğruluğunun gözlem ve deneysel kanıtlara dayanması gerektiğini vurgular.

Comte'nin (2015) belirttiği üzere pozitivizmin dar tanımına göre teorik çalışmalar genellikle bilimsel olarak kabul edilmez. Ancak, bazı bilim insanları ve felsefeciler bilimin sadece gözleme dayanan doğrulanabilir iddiaları içermediğini ve teorik çalışmaların da bilimsel ilerlemeye katkı sağlayabileceğini savunurlar. Bu bağlamda bazı durumlarda teorik çalışmalar bilimsel olarak değerli kabul edilebilir. Ancak bu değerlendirme pozitivist bir çerçeveden ziyade daha geniş bir bilim felsefesi perspektifinden yapılabilir. Ampirik ve teorik çalışmalar genellikle birbirini tamamlar. Teorik çalışma ise genellikle soyut kavramları, teorileri veya modelleri inceleyen ve geliştiren çalışmalardır. Bu tür çalışmalar, mevcut bilgiye dayalı olarak yeni hipotezler ortaya koymayı, var olan teorileri test etmeyi veya genel bir çerçeve oluşturmayı amaçlar. Ampirik çalışmaların verileri teorik çalışmalarda kullanılabilir ve teorik çalışmaların

sonuçları ampirik çalışmalara yol gösterebilir. Bu nedenle, bilimsel araştırmalarda genellikle hem ampirik hem de teorik çalışmalara yer verilir (Junjie & Yingxin, 2022).
Ölçme bir objenin bir olayın veya bireyin belirli bir niteliğini niceliksel bir ifadeye dönüştürme sürecidir. Bu süreç ölçülen özelliğin sayısal veya sembolik bir değere atanmasını içerir. Bu değerlendirme, bir ölçek kullanılarak yapılabilir ve bu ölçek, özelliğin ölçülme yöntemine ve hassasiyetine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Ölçme, bilimsel araştırmalarda önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü verilerin standardize edilmesine ve analiz edilmesine olanak tanıyarak bu da bilimsel sonuçların doğruluğunu ve geçerliliğini artırır (Gürsakal, 2001, s. 12). Nitel verileri nicel yöntemlere dönüştüren bibliyometrik analiz ise sayısal ve görsel veri oluşturmada önemli bir ölçme yöntemidir. Bir ölçe biçimi olarak bu yöntem, metinlerin içeriği, dağılımı ve etkisi gibi özelliklerini nicel olarak ölçen bir disiplin olarak tanımlamıştır. Bu disiplin, yazılı materyallerin analizi ve niceliksel ölçümler üzerine odaklanır. Bibliyometri, bilimsel araştırmalarda, akademik yayınlarda ve diğer yazılı belgelerde yer alan metinlerin içeriğini, yaygınlığını ve etkisini inceleyerek bilginin ölçülmesine yönelik bir yöntemdir (Norton, 2001). Bibliyometrik analizler tanımlayıcı ve değerlendirici nitelikte olmak üzere iki farklı şekilde kullanılabilir. Tanımlayıcı analizler belirli bir özellik veya durumu betimlemek için kullanılır. Örneğin, belirli bir zamanda yayımlanan bilimsel çalışmaların sayısal olarak belirlenmesi gibi. Diğer yandan, değerlendirici analizler bir fenomenin etkisini, ilişkileri veya sonuçlarını değerlendirmek için kullanılır. Örneğin bilimsel bir çalışmanın sonraki çalışmalara etkisini ortaya koymak için atıf analizi yapılması gibi (McBurney & Novak, 2002, s. 108). Bibliyometrik analiz araştırma literatüründeki eğilimleri, yayın performansını, atıf ilişkilerini ve araştırma alanlarının etkileşimlerini inceleyerek bilimsel bilgi üretimini ve yayılmasını anlamak için önemli bir araçtır. Bu analizler belirli bir konunun popülerliğini, hangi alanlarda daha fazla araştırma yapıldığını ve hangi konuların daha az incelendiğini belirler. Bu nedenle, bibliyometrik analizler araştırmacılar, akademisyenler ve kurumlar için stratejik kararlar almak için önemli bir kaynak sağlar.

3. YÖNTEM

Bu araştırma Ankara'daki üniversitelerde kamu yönetimi alanında ampirik yöntemlere dayalı lisansüstü tez üretiminin gelişimini ve temel eğilimlerini incelemek amacıyla tasarlanmıştır. Araştırmada belirli bir bilim alanındaki akademik üretimin dönemsel, kurumsal ve tematik özelliklerinin nicel göstergeler üzerinden incelenmesine imkân veren bibliyometrik analiz yöntemi benimsenmiştir. Bibliyometrik analiz, bilimsel üretimin yalnızca sayısal büyüklüğünü ortaya koymakla sınırlı kalmayıp yayınların zaman içindeki dağılımını, kurumsal yoğunlaşmaları ve araştırma alanları arasındaki ilişkileri de görünür kılmaktadır (Norton, 2001; McBurney & Novak, 2002). Bu doğrultuda çalışma tanımlayıcı bir bibliyometrik analiz olarak yapılandırılmış; tezlerin yıllara, türlerine, üniversitelere, danışman ünvanlarına ve ilişkili konu alanlarına göre dağılımları incelenmiştir.
Araştırmanın temel sorunsalı kamu yönetimi literatüründeki başlıca eğilimleri ve araştırma boşluklarını belirleyerek alandaki akademik üretimin yönünü ve seyrini anlamaktır. Bu sorunsaldan hareketle çalışma "2019-2024 döneminde Ankara'daki üniversitelerde kamu yönetimi alanındaki ampirik lisansüstü tez üretimi nasıl bir gelişim ve kurumsal dağılım göstermektedir?" temel sorusu etrafında şekillenmekte ve bu çerçevede aşağıdaki sorulara yanıt aramaktadır:
•Kamu Yönetimi alanında raporlanan lisansüstü tezlerin yıllara göre dağılımı nasıldır?
•Kamu Yönetimi alanında ampirik yöntemle hazırlanan tezlerin yıllara göre dağılımı nasıldır?
•Lisansüstü tezlerin hazırlandığı üniversiteler ve danışman ünvanları nelerdir?

•Ankara'daki üniversitelerde kamu yönetimi alanında raporlanan lisansüstü tezlerin yıllara göre dağılımı nasıldır?
•Ankara'daki üniversitelerde kamu yönetimi alanında ampirik yöntemle hazırlanan tezlerin yıllara göre dağılımı nasıldır?
•Ankara'daki üniversitelerde lisansüstü tezlerin hazırlandığı üniversiteler ve danışman ünvanları nelerdir?

Bu sorulara verilecek yanıtlar aracılığıyla Türkiye genelindeki kamu yönetimi tezleri içinde ampirik araştırmaların payının ve yıllara göre değişiminin, Ankara'daki ampirik tezlerin yıllara, tez türlerine ve üniversitelere göre dağılımının, tez türlerinin üniversitelere göre farklılaşmasının ve danışmanların akademik ünvanlarına göre oluşan dağılımın ortaya konması hedeflenmiştir. Böylece Ankara'daki ampirik kamu yönetimi araştırmalarının dönemsel ve kurumsal özelliklerine ilişkin bütüncül bir bibliyometrik görünüm elde edilmesi amaçlanmıştır. Araştırmanın veri kaynağını Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Ulusal Tez Merkezi'nde erişime açık biçimde yayımlanan lisansüstü tezler oluşturmaktadır. İnceleme dönemi 2019-2024 yıllarıyla sınırlandırılmıştır. Altı yıllık bu dönemin seçilmesinde güncel araştırma eğilimlerini yansıtabilecek kesintisiz bir zaman aralığı sunması ve yıllar arasındaki değişimin karşılaştırmalı biçimde izlenmesine imkân tanıması belirleyici olmuştur. Araştırmanın odağını Ankara'daki üniversitelerde üretilen tezler oluşturmakla birlikte Ankara'nın kamu yönetimi alanındaki ampirik tez üretimindeki konumunu daha geniş bir akademik üretim yapısı içinde değerlendirebilmek amacıyla aynı dönemde Türkiye genelinde hazırlanan tezler de analize dâhil edilmiştir.

Verilerin elde edilmesinde sistematik bir tarama ve eleme süreci izlenmiştir. YÖK Ulusal Tez Merkezi'nin gelişmiş tarama ekranında "Kamu Yönetimi" ifadesi arama terimi olarak kullanılmış, "aranacak alan" seçeneği ise "Tümü" olarak belirlenmiştir. Bu tercih sadece doğrudan kamu yönetimi alanında sınıflandırılmış tezlere değil, kamu yönetimiyle ilişkili diğer disiplinlerde hazırlanan çalışmalara da ulaşılmasını amaçlamıştır. Tarama sonucunda 2019-2024 döneminde yayımlanan toplam 5.377 lisansüstü tez tespit edilmiştir. Çalışmanın odağı ampirik araştırmalar olduğundan bu tezlerin tamamı doğrudan analiz birimi olarak kabul edilmemiş, ikinci aşamada ampirik araştırma ölçütleri doğrultusunda bir eleme gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada "ampirik araştırma" kavramının sınırları veri toplama sürecinden önce netleştirilmiştir. Buna göre araştırmacının birincil veriye ulaşmak amacıyla deney, anket veya görüşme (mülakat) tekniklerinden en az birini kullandığı ve bu teknikler aracılığıyla alan verisi ürettiği tezler ampirik araştırma kapsamında değerlendirilmiştir. Bu ölçüt çalışmanın kavramsal çerçevesinde benimsenen ampirik araştırma tanımıyla örtüşmektedir. Tarama sonucunda ulaşılan tezlerin yöntem bölümleri bu ölçüt doğrultusunda tek tek incelenmiştir. Yalnızca kuramsal tartışmaya, literatür incelemesine veya ikincil verilere dayanan ve belirlenen birincil veri toplama tekniklerinden herhangi birini içermeyen çalışmalar analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu eleme sonucunda 5.377 tez içinden 1.249 lisansüstü tez araştırmada benimsenen ampirik çalışma ölçütlerini karşılamıştır. Böylece Türkiye geneline ilişkin karşılaştırma çerçevesini oluşturan veri seti meydana getirilmiştir. Ampirik araştırmanın bu şekilde operasyonelleştirilmesi kavramın bütün olası biçimlerini kapsama iddiası taşımamaktadır. Araştırmanın karşılaştırılabilir ve açık biçimde uygulanabilir bir dahil edilme ölçütünü ortaya koymaktadır.

Araştırmanın ikinci analiz düzeyinde Ankara özelinde bir alt veri seti oluşturulmuştur. Türkiye genelindeki 1.249 ampirik tez arasından Ankara'daki üniversitelerde tamamlanan çalışmalar ayrıştırılmış ve belirlenen ölçütleri karşılayan 145 lisansüstü tez Ankara veri setine dâhil edilmiştir. Böylece araştırmada iki aşamalı bir yapı izlenmiştir. İlk aşamada Türkiye

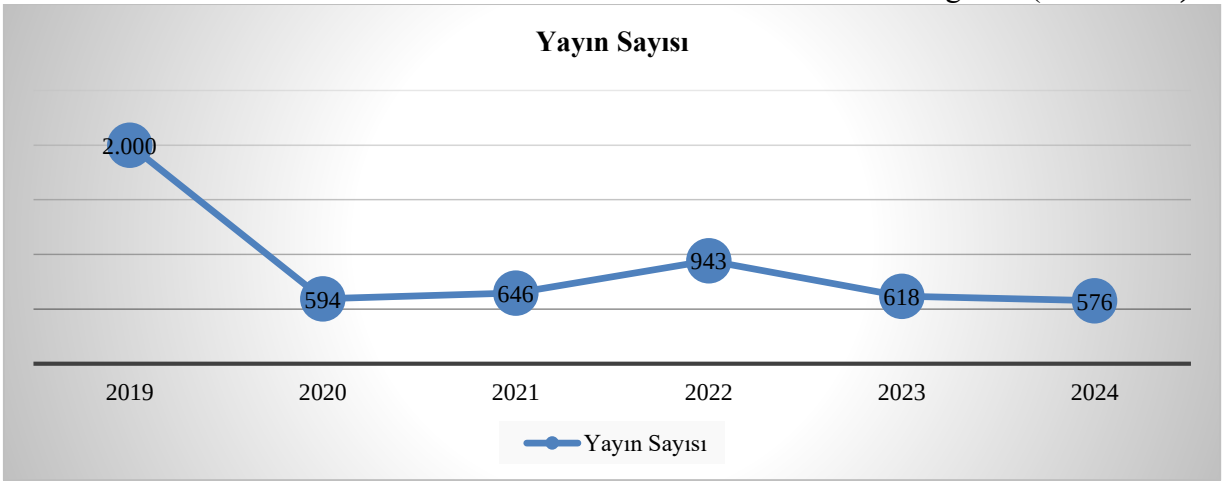
genelindeki ampirik kamu yönetimi tezlerinin dağılımı incelenerek genel eğilim belirlenmiş, ikinci aşamada ise Ankara'daki üniversiteler bu genel görünüm içerisinden ayrıştırılarak daha ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Bu yaklaşım, Ankara'daki akademik üretimi yalnızca kendi içindeki sayısal dağılımlarla değerlendirmek yerine Türkiye genelindeki ampirik kamu yönetimi araştırmaları içinde konumlandırmayı mümkün kılmıştır.

Verilerin çözümlenebilmesi amacıyla her tez için standartlaştırılmış bir kodlama çerçevesi oluşturulmuştur. Tezler yayın yılı, tez türü (yüksek lisans/doktora), üniversite, danışmanın akademik ünvanı ve kamu yönetimiyle ilişkili konu alanı bakımından manuel olarak excel dosyası içerisine kodlanmıştır. Ankara alt veri setinde ise yıllara ve üniversitelere göre dağılımın yanı sıra tez türü ile üniversite ve danışman ünvanı arasındaki dağılımlar da ayrıca incelenmiştir. Kodlama sürecinde aynı ölçütlerin tüm tezlere tutarlı biçimde uygulanmasına özen gösterilmiştir. Böylece kategoriler arasındaki karşılaştırılabilirliğin korunması amaçlanmıştır. Elde edilen veriler frekans ve yüzde dağılımları üzerinden betimsel olarak analiz edilmiş olup bulgular tablo ve grafikler aracılığıyla sunulmuştur.

4. BULGULAR

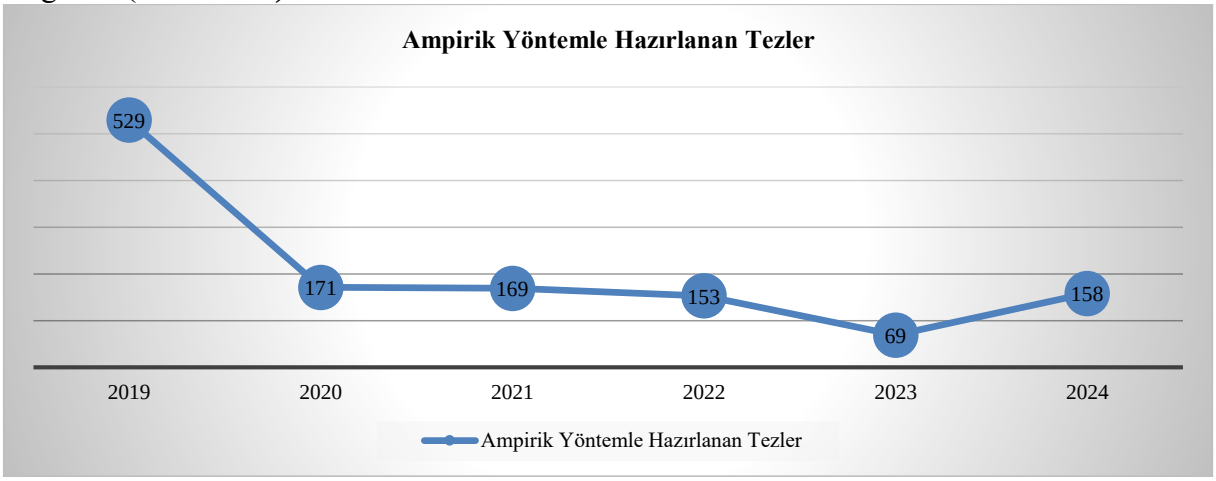
Araştırmanın bu bölümünde analize tabi tutulan tez çalışmalarına ilişkin verilerin değerlendirilmesine yer verilmiştir. YÖK Tez platformu üzerinden "Kamu Yönetimi" anahtar kelimesi girilerek 5,377 adet yayımlanmış teze ulaşılmıştır. Ulaşılan tezler içerisinde "ampirik yöntemle" (deney, anket veya mülakat tekniklerinden en az birisinin kullanılarak alan araştırmasının yürütüldüğü yani bir girişimin olduğu) hazırlanmış olanların; yayın yılı, türü, danışman ünvanı, tez türündeki danışmanlık, üniversitelere göre dağılımı, konu alanları ile konu alanı ve tez türleri olmak üzere sekiz kategori halinde ele alınmıştır.

Grafik 1. Kamu Yönetimi Alanında Hazırlanan Tezlerin Yıllara Göre Dağılımı (2019-2024)



Başvurulan yöntem fark etmeksizin (nicel, nitel veya karma) kamu yönetimi alanında hazırlanmış olan yüksek lisans ve doktora düzeyindeki bütün tez çalışmalarına yıllar itibariyle bakıldığında 2019'da 2.000; 2020'de 594; 2021'de 646; 2022'de 943; 2023'de 618 ve 2024 senesinde 576 olmak üzere toplam 5,377 adet tez çalışması yayınlanmıştır (Grafik 1). Grafiğe bakıldığında kamu yönetimi alanında hazırlanan tez çalışmalarının 2019 senesinden 2020'ye %250 oranında ciddi bir düşüş yaşandığı görülmektedir.

Grafik 2. Kamu Yönetimi Alanında Ampirik Yöntemle Hazırlanan Tezlerin Yıllara Göre Dağılımı (2019-2024)



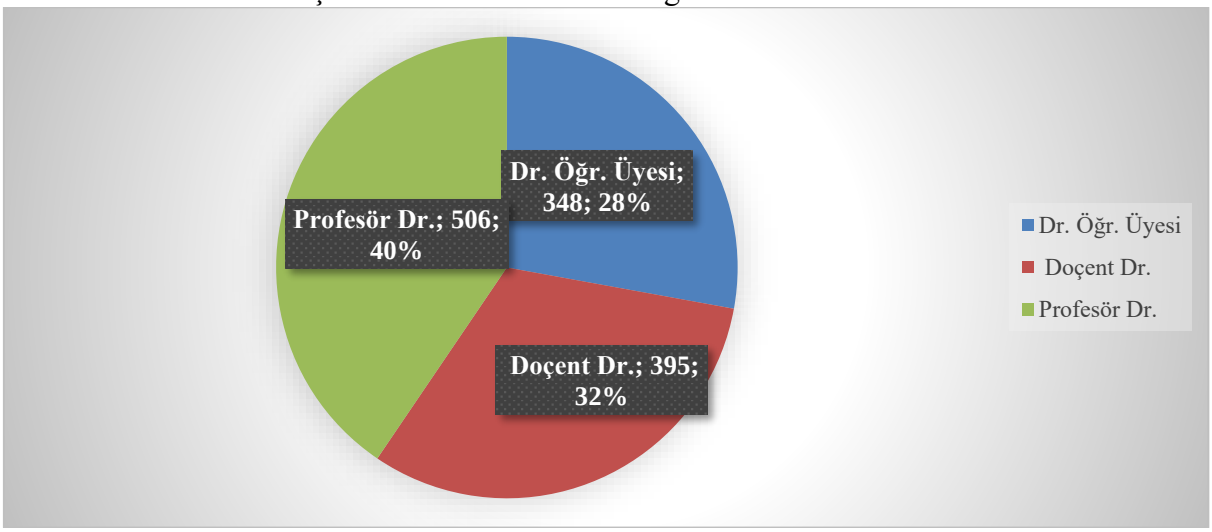
Kamu Yönetiminde ampirik yöntemler vasıtasıyla politikalar, yönetim uygulamaları, kamu hizmetleri ve birey-toplum arasındaki ilişkiler gibi konularda veri toplanarak analiz edilebilmekte ve politika değerlendirmeleri yapılabilmektedir (Furat & Uzun, 2022, s. 115). Bu yöntemler teorik açıklamaların yanı sıra gerçek dünyadaki olgulara dayalı bulgular elde etmek için kullanılmaktadır (Erdoğan, 2001, s. 119-123). Kamu yönetimi alanında ampirik yöntemle hazırlanmış olan yüksek lisans ve doktora türündeki tüm tez çalışmalarına bakıldığında; 2019'da 529; 2020'de 171; 2021'de 169; 2022'de 153; 2023'de 69 ve 2024 senesinde ise toplam 158 olmak üzere altı sene içerisinde toplam 1,249 tezin ampirik yöntemle hazırlanarak yayımlandığı anlaşılmıştır. Bu sayı tüm lisansüstü tezler içerisinde yaklaşık olarak %23'üne karşılık gelmektedir (Grafik 2). Grafik 1'de de gösterildiği üzere 2019-2020 yılları arasındaki yaşanan aşırı tez azalışından ampirik yöntemle hazırlanan tezler de niceliksel olarak önemli oranda azalmıştır.

Tablo 1. Ampirik Yöntemle Hazırlanmış Tez Türlerinin Yıllar İtibariyle Dağılımı (2019-2024)

YILLAR	YÜKSEK LİSANS	DOKTORA	TOPLAM
2019	481	48	529
2020	126	45	171
2021	134	35	169
2022	100	53	153
2023	40	29	69
2024	107	51	158
TOPLAM	988	261	1.249

Ampirik yöntemle hazırlanmış olan toplam tez türleri yıllar itibariyle sürekli olarak azılmıştır. Yüksek lisans türünde en fazla ampirik çalışmanın hazırlandığı yıl 2019, en az olan 2023 senesi iken; doktora türünde ise 2022 senesi en yüksek en az 2023 senesi olmuştur. Her iki derecede de 2024'te bir önceki seneye göre yaklaşık olarak iki buçuk katlık bir artış yaşanmıştır (Tablo 1).

Grafik 3. Tezlerin Danışman Ünvanlarına Göre Dağılımı



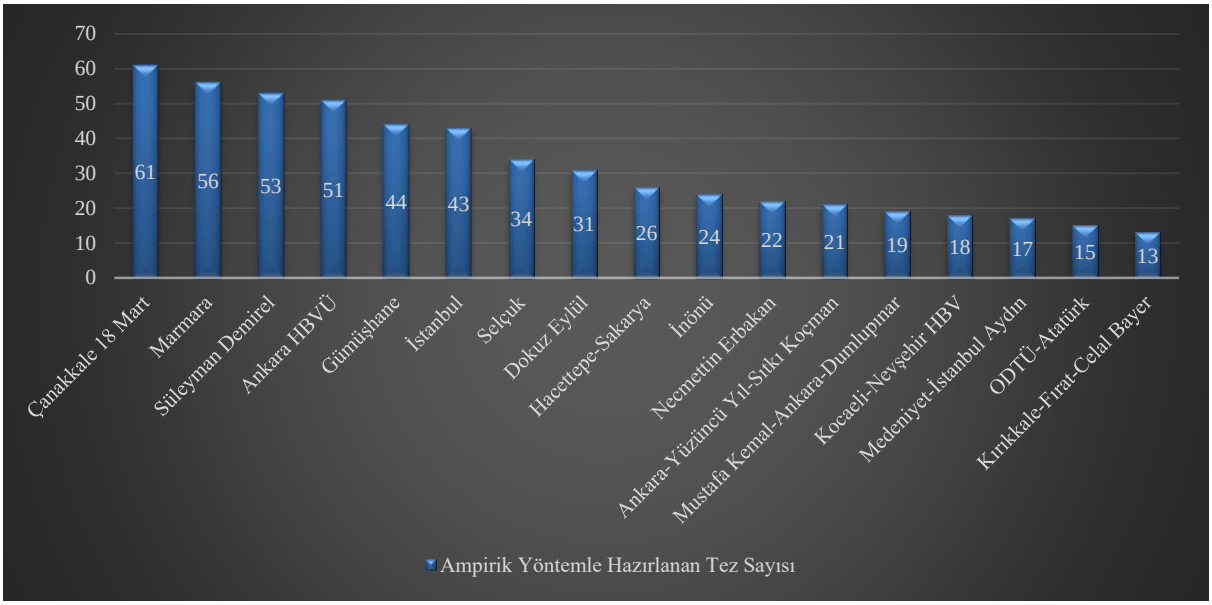
Tezlerin danışman ünvanlarına göre dağılımını incelemek için her danışman ünvanına sahip öğretim üyeleriyle ilişkili tezlerin sayısı hesaplanabilmektedir. Bu tür bir hesaplama farklı akademik ünvanlara sahip danışmanların öğrencilerle hangi sıklıkla çalıştığını anlamaya yönelik olabilmektedir. Bu kapsamda ampirik yöntemle hazırlanmış olan lisansüstü tezlerin, akademik ünvan bazında dağılımına bakıldığında en fazla Profesör Doktor (506) ardından Doçent Doktor (395) ve Doktor Öğretim Üyesi (348) ünvanlarına sahip akademisyenler tarafından tez danışmanlıkları gerçekleştirilmiştir (Grafik 3).

Tablo 2. Tez Türlerinin Danışmanlara Göre Dağılımı (2019-2024)

TEZ TÜRÜ	PROF.	DOÇ.	DR. ÖĞR.ÜYESİ	TOPLAM
YÜKSEK LİSANS	325	337	329	991
DOKTORA	180	58	20	258

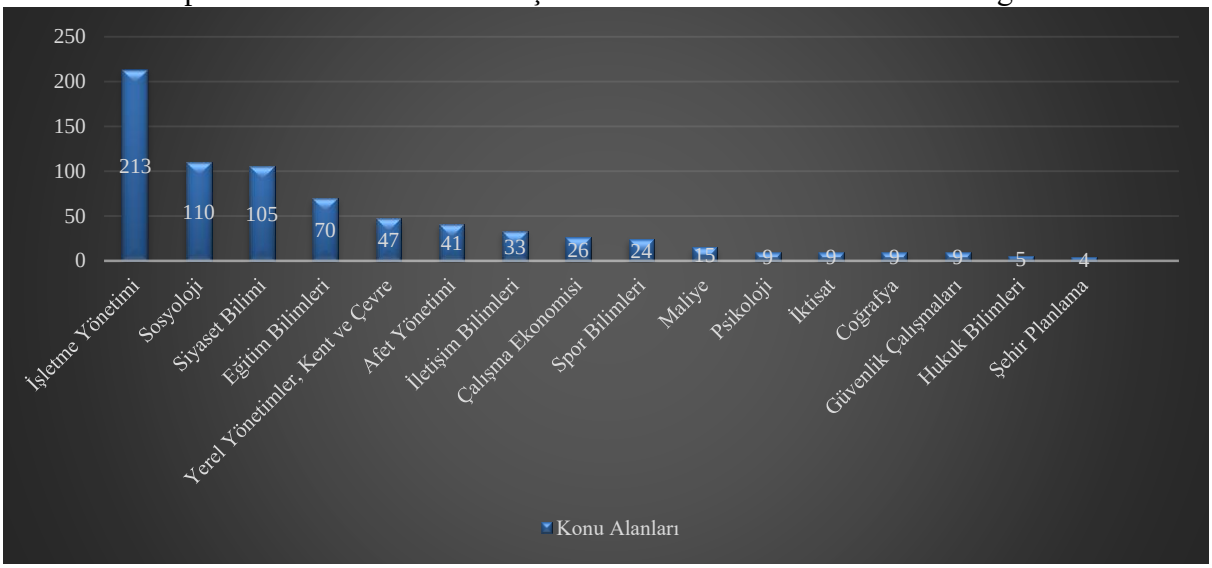
Tez türlerinin danışmanlara göre dağılımı ifadesi bir üniversite veya akademik kurumdaki tezlerin, danışmanların uzmanlık alanlarına göre nasıl dağıldığını ifade etmektedir. Bu dağılım tez türlerinin (örneğin, yüksek lisans tezi, doktora) her danışman tarafından ne kadar miktarda yönlendirildiğini göstermektedir. Ampirik yöntemle hazırlanmış olan tezlerin türlerinin danışmanlara göre dağılımına bakıldığında her üç ünvanda da en fazla yüksek lisans seviyesindeki tezlere danışmanlık yapıldığı görülmektedir. Yüksek lisans seviyesinde en çok Doçent ünvanında danışmanlık alınırken doktora seviyesinde ise Profesör ünvanlı akademisyenlerin ampirik çalışmalarda danışmanlık yaptığı anlaşılmaktadır (Tablo 2).

Grafik 4. Ampirik Yöntemle Hazırlanmış Tezlerin Üniversitelere Göre Dağılımı (Yüksek Lisans + Doktora Tez Türlerinde)



Kamu yönetimi alanında ampirik yöntemle hazırlanan yüksek lisans ve doktora tezlerinin üniversiteler arasında dengeli bir dağılım göstermediğini ortaya koymaktadır. İncelenen üniversiteler arasında Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi 61 tezle ilk sırada yer alırken, Marmara Üniversitesi 56 ve Süleyman Demirel Üniversitesi 53 tezle onu izlemektedir. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi 51 tezle bu gruba oldukça yakın bir konumda yer almakta; Gümüşhane Üniversitesi (44) ve İstanbul Üniversitesi (43) de ampirik tez sayısının görece yüksek olduğu üniversiteler arasında bulunmaktadır (Grafik 4). Dağılımın devamında tez sayılarının kademeli biçimde azaldığı görülmektedir. Selçuk Üniversitesi 34, Dokuz Eylül Üniversitesi 31 ve Hacettepe-Sakarya üniversiteleri 26 tezle orta düzeyde bir yoğunlaşmaya sahipken, diğer üniversitelerde ampirik tez sayıları 24 ve altında kalmaktadır. Listenin alt sıralarında yer alan ODTÜ-Atatürk üniversitelerinde 15, Kırıkkale-Fırat-Celal Bayar üniversitelerinde ise 13 ampirik tez tespit edilmiştir. Genel dağılım, ampirik araştırma pratiğinin belirli üniversitelerde daha görünür bir ağırlık kazandığını, ancak bunun yalnızca birkaç kurumla sınırlı kalmadığını düşündürmektedir. Özellikle ilk altı sıradaki üniversitelerin diğer kurumlara göre belirgin biçimde öne çıkması kamu yönetimi alanındaki ampirik tez üretiminin kurumsal açıdan farklı yoğunluklarda gelişmiştir. Bununla birlikte, ilgili bulgu üniversitelerin ampirik yönteme yönelik eğilimlerinin doğrudan bir göstergesi olarak değerlendirilmemelidir. Böyle bir karşılaştırma için her üniversitede aynı dönemde hazırlanan toplam kamu yönetimi tezlerinin de dikkate alınması gerekir.

Grafik 5. Ampirik Yöntemle Hazırlanmış Tezlerin Konu Alanlarına Göre Dağılımı



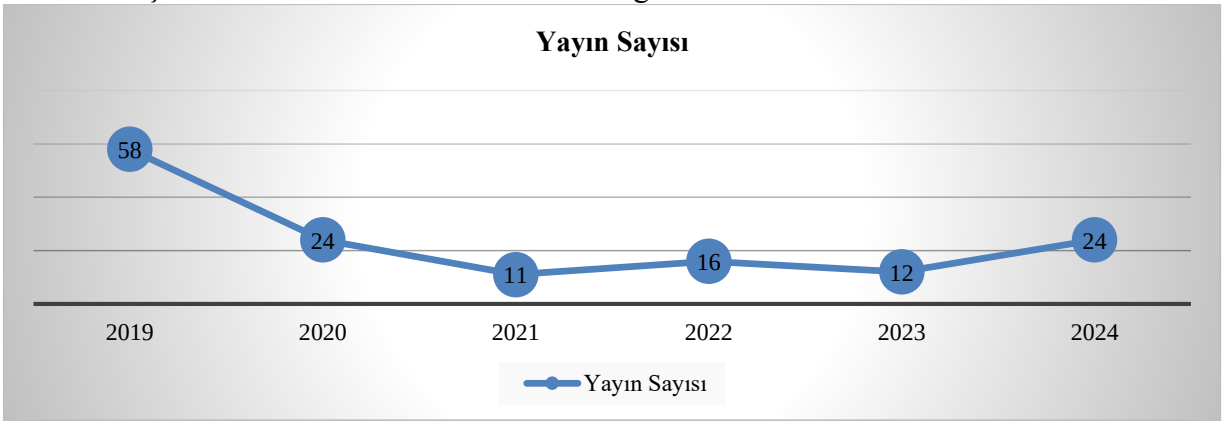
Kamu yönetimi toplumun işleyişi, kamu hizmetlerinin etkisi, yönetim politikaları gibi dinamik alanları kapsamaktadır. Bu nedenle kamu yönetimi alanındaki ampirik araştırmaların çeşitli ve oldukça geniş yelpazeli yönetimsel, finansal, organizasyonel ve toplumsal etkenleri analiz edildiğini göstermektedir. Ampirik yöntemle hazırlanmış olan tezlerin konu alanlarına göre dağılımları incelendiğinde (Grafik 5) en fazla İşletme (213); Sosyoloji (110); Siyaset Bilimi (105), Eğitim Bilimleri (70), Yerel Yönetimler, Kent ve Çevre (47) alanlarında hazırlandığı anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Ampirik Yöntemle Hazırlanmış Tezlerin Konu Alanlarına ve Tez Türlerine Göre Dağılımı

KONU ALANI	YÜKSEK LİSANS	DOKTORA	TÜM TEZLER İÇERİSİNDEKİ ORANI (%)
İşletme Yönetimi	180	33	17,2
Sosyoloji	92	18	8,8
Siyaset Bilimi	93	12	8,4
Eğitim Bilimleri	65	5	5,60
Yerel Yönetimler, Kent ve Çevre	36	11	3,76
Afet Yönetimi	32	9	3,28
İletişim Bilimleri	25	8	2,64
Çalışma Ekonomisi	23	2	2
Spor Bilimleri	20	4	1,92
Maliye	10	5	1,2
Psikoloji	6	3	0,72
İktisat	8	1	0,72
Coğrafya	6	3	0,72
Güvenlik Çalışmaları	6	2	0,64
Hukuk Bilimleri	3	2	0,48
Şehir Planlama	2	2	0,32
Müstakil Olarak Kamu Yönetimi	402	118	41,6

Tablo 3 ile hangi konu alanlarında ampirik araştırmalar daha yaygın ve hangi tez türlerinde daha fazla ampirik çalışmanın yapıldığı ve öğrencilerin belirli akademik alanlarda daha çok ampirik araştırma yapma eğiliminde olup olmadığı gösterilmiştir. Ampirik tezlerin konu alanlarına ve tez türlerine göre dağılımını daha iyi anlamak için her bir disiplinin toplam ampirik tez sayıları içerisindeki oranları hesaplanarak karşısına yazılmıştır. Bu doğrultuda kamu yönetimiyle ilintili yazılmış olan lisansüstü tezlerin dağılımına bakıldığında toplamda 729 olduğu görülmektedir. Geri kalan 520 adet lisansüstü tezin ise müstakil olarak kamu yönetimi alanında yazıldığı anlaşılmıştır. Ayrıca yazılan tezlerin büyük bir çoğunluğu yüksek lisans seviyesinde yazılmıştır. Dolayısıyla 2016-2024 yılları arasında ampirik yöntemlerle hazırlanan toplam 1.249 tezin 520 tanesi spesifik olarak kamu yönetimi disiplini içerisinde ele alınmıştır. 729 tez ise farklı disiplinlerle kamu yönetimi harmanlanarak hazırlanmıştır. Yüzdesel olarak bakıldığında tez çalışmalarında kamu yönetimiyle işletme yönetimi birlikteliği göze çarpmaktadır (%17,04). İşletme yönetimini Sosyoloji (%8,8), Siyaset Bilimi (%8,4), Eğitim Bilimleri (%5,60), Yerel Yönetimler, Kent ve Çevre (%3,76) ile diğer ilgili disiplinler takip etmektedir (Tablo 3).

Grafik 6. Ankara'daki Üniversitelerde Kamu Yönetimi Alanında Ampirik Yöntemle Hazırlanmış Lisansüstü Tezlerin Yıllara Göre Dağılımı



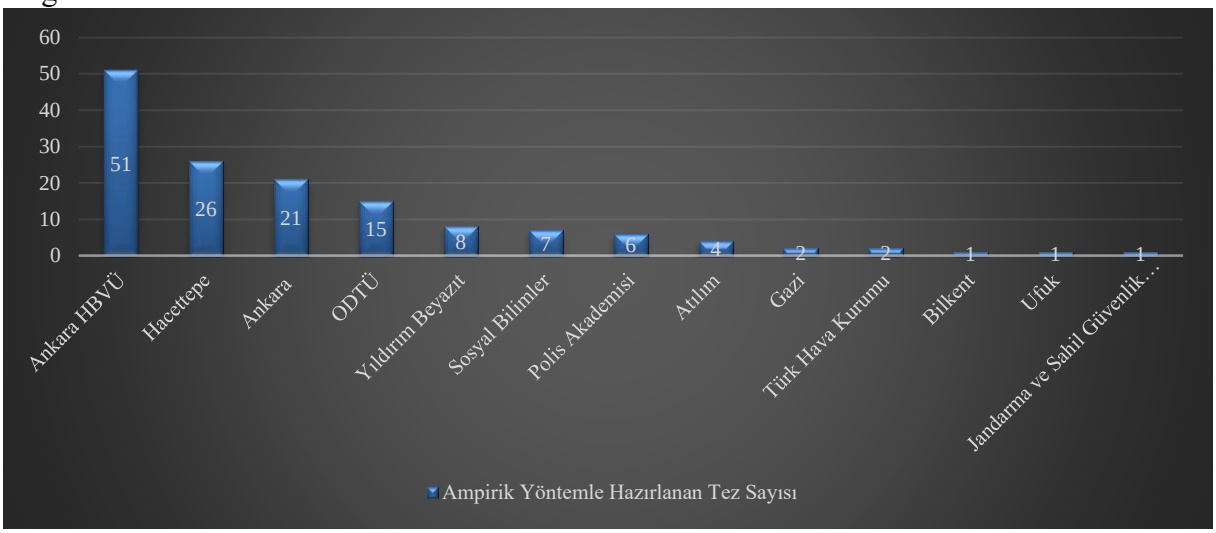
Ankara'daki üniversitelerde kamu yönetimi alanında ampirik yöntemle hazırlanan lisansüstü tezlerin incelenen dönem boyunca düzenli ve doğrusal bir seyir izlemediğini ortaya koymaktadır. 2019 yılında 58 tezle başlayan dönem, aynı zamanda araştırma kapsamındaki en yüksek değeri oluşturmaktadır. Bu sayı 2020'de 24'e, 2021'de ise 11'e gerileyerek dönemin en düşük düzeyine ulaşmıştır. Sonraki yıllarda ise dalgalı bir görünüm söz konusudur. Tez sayısı 2022'de 16'ya yükselmiş, 2023'te 12'ye gerilemiş ve 2024'te yeniden 24'e çıkmıştır. Özellikle 2024 yılında gözlenen artış, 2021-2023 dönemindeki görece düşük düzeylerin ardından ampirik tez üretiminde yeniden bir hareketlenmeye işaret etmektedir. Bununla birlikte 2024'te ulaşılan 24 tez, 2019'daki 58 tezlik düzeyin oldukça gerisindedir (Grafik 6). Bu nedenle incelenen altı yıllık dönem ampirik tez üretiminde süreklilik gösteren bir artış ya da azalıştan çok, yıllar arasında belirgin dalgalanmaların yaşandığı bir görünüm sergilemektedir. Söz konusu değişimin nedenlerini yalnızca bibliyometrik dağılımdan hareketle açıklamak mümkün olmadığından, yıllar arasındaki farklılıkların kurumsal veya dönemsel nedenlerine ilişkin değerlendirmelerin ek verilerle desteklenmesi gerekmektedir.

Tablo 4. Ankara'daki Üniversitelerde Ampirik Yöntemle Hazırlanmış Olan Tezlerin Türlerine Göre Dağılımı

Tez Türü	**Frekans (n)**	**Oran (%)**
Yüksek Lisans	110	75,9
Doktora	35	24,1
Toplam	**145**	**100,0**

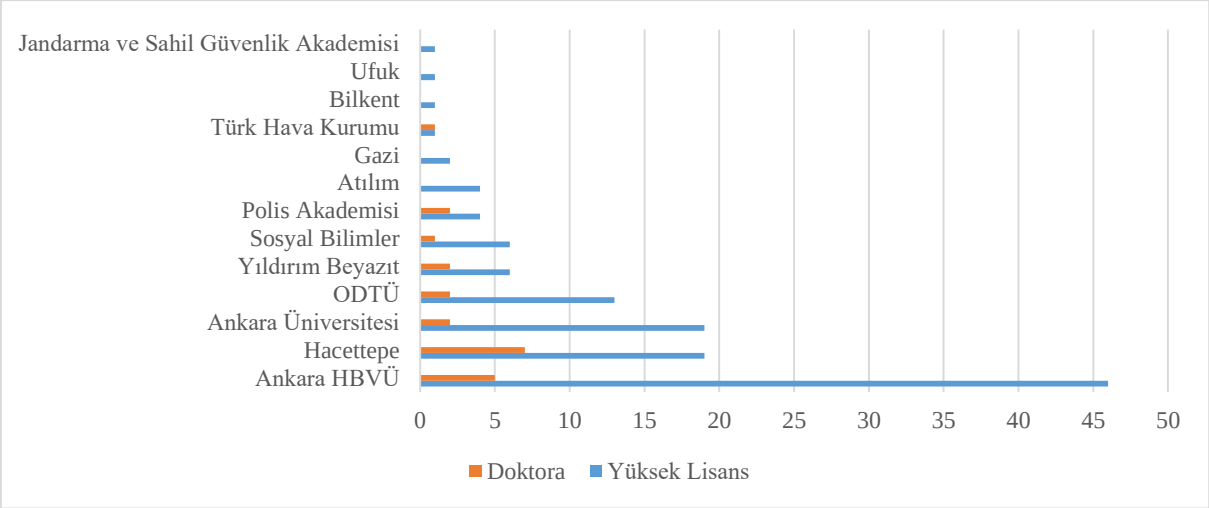
Veri setindeki ampirik tezlerin yaklaşık dörtte üçü yüksek lisans tezlerinden oluşmaktadır. Toplam 145 tezin 110'u (%75,9) yüksek lisans, 35'i (%24,1) ise doktora düzeyindedir. Başka bir ifadeyle her bir doktora tezine karşılık yaklaşık 3,1 yüksek lisans tezi bulunmaktadır (Tablo 4).

Grafik 7. Ankara'daki Üniversitelerde Hazırlanmış Olan Ampirik Tezlerin Üniversitelere Göre Dağılımı



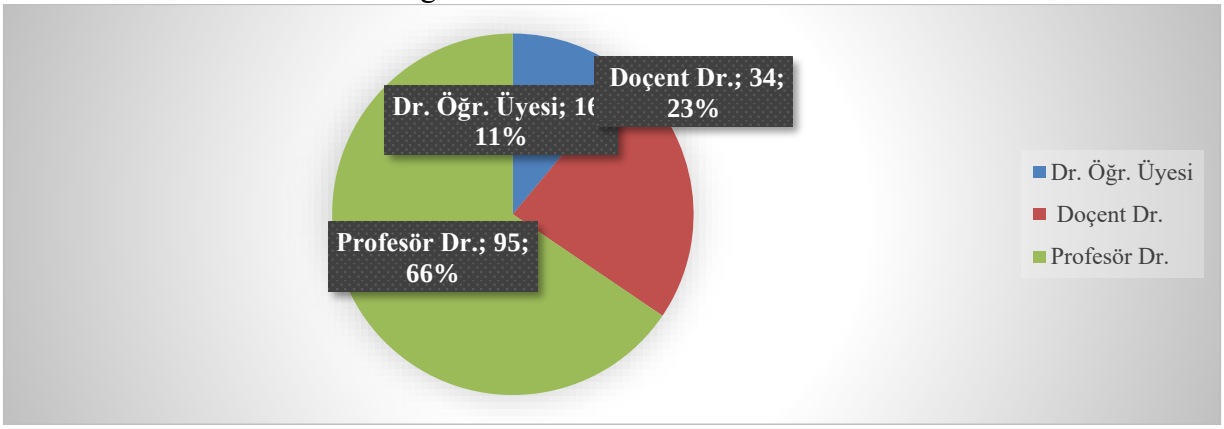
Ankara'daki üniversitelerde ampirik yöntemle hazırlanan lisansüstü tezlerin kurumsal dağılımı, çalışmaların belirli üniversitelerde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi 51 tezle ilk sırada yer alırken, Hacettepe Üniversitesi 26, Ankara Üniversitesi 21 ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi 15 tezle onu izlemektedir. Bu dağılım, özellikle ilk dört üniversitenin incelenen ampirik tezler içerisindeki belirgin ağırlığını ortaya çıkarmaktadır. Diğer üniversitelerde ise tez sayılarının kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi'nde 8, Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi'nde 7 ve Polis Akademisi'nde 6 ampirik tez hazırlanırken, Atılım Üniversitesi'nde bu sayı 4'tür. Gazi Üniversitesi ve Türk Hava Kurumu Üniversitesi ikişer; Bilkent Üniversitesi, Ufuk Üniversitesi ile Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi ise birer tezle dağılımda yer almaktadır (Grafik 7). Bu görünüm, ampirik yöntemle hazırlanan kamu yönetimi tezlerinin Ankara'daki üniversiteler arasında eşit bir dağılım sergilemediğini, üretimin daha çok belirli kurumlarda toplandığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte söz konusu yoğunlaşma, tek başına üniversitelerin ampirik araştırmaya daha fazla yöneldiği biçiminde yorumlanmamalıdır; böyle bir değerlendirme için her üniversitede aynı dönemde tamamlanan toplam lisansüstü tez sayılarının da dikkate alınması gerekir.

Grafik 8. Ankara'daki Üniversitelerde Hazırlanmış Ampirik Tezlerin Üniversite ve Tez Türüne Göre Dağılımı (N=145)



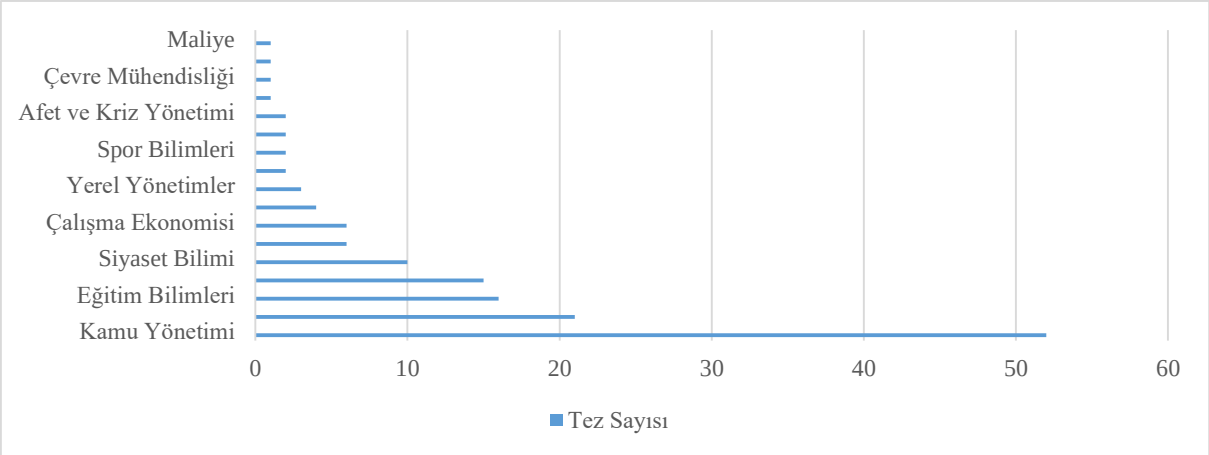
Ampirik tezlerin üniversite ve tez türüne göre dağılımı, incelenen çalışmaların yüksek lisans düzeyinde belirgin biçimde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bu eğilim özellikle tez sayısının yüksek olduğu üniversitelerde daha görünürdür. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, 46 yüksek lisans ve 5 doktora teziyle her iki tez türü birlikte değerlendirildiğinde ilk sırada yer almaktadır. Hacettepe Üniversitesi'nde ise 19 yüksek lisans tezine karşılık 7 doktora tezinin bulunması dikkat çekmektedir. Ankara Üniversitesi'nde 19 yüksek lisans ve 2 doktora, ODTÜ'de ise 13 yüksek lisans ve 2 doktora tezi bulunmaktadır. Üniversiteler arasındaki dağılım doktora tezleri özelinde değerlendirildiğinde Hacettepe Üniversitesi'nin 7 doktora teziyle öne çıktığı, onu 5 tezle Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi'nin izlediği görülmektedir. Ankara Üniversitesi, ODTÜ, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi ve Polis Akademisi'nde doktora düzeyindeki ampirik tezlerin daha sınırlı sayıda kaldığı; bazı üniversitelerde ise incelenen dönem kapsamında doktora tezine rastlanmadığı anlaşılmaktadır (Grafik 8). Genel görünüm Ankara'daki üniversitelerde ampirik yöntemin lisansüstü tezlerdeki kullanımının ağırlıklı olarak yüksek lisans düzeyinde karşılık bulduğunu, doktora düzeyindeki ampirik çalışmaların ise daha sınırlı ve belirli kurumlarda yoğunlaşan bir dağılıma sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Grafik 9. Ankara'daki Üniversitelerde Hazırlanmış Olan Ampirik Tezlerin Danışmanların Akademik Ünvanlarına Göre Dağılımı



Danışmanların akademik ünvanlarına göre dağılım incelendiğinde, ampirik yöntemle hazırlanan tezlerin büyük ölçüde profesör ünvanına sahip akademisyenlerin danışmanlığında yürütüldüğü görülmektedir. İncelenen 145 tezin 95'i (%65,5) Prof. Dr., 34'ü (%23,4) Doç. Dr. ve 16'sı (%11,0) Dr. Öğr. Üyesi danışmanlığında hazırlanmıştır. Buna göre profesörlerin danışmanlığında yürütülen çalışmalar, veri setindeki ampirik tezlerin yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır (Grafik 9).

Grafik 10. Ankara'daki Üniversitelerde Hazırlanmış Olan Ampirik Tezlerin İlişkili Disiplinlere Göre Dağılımı



Grafikteki dağılım okunduğunda Ankara'daki üniversitelerde hazırlanan ampirik tezlerin farklı disiplinlerle ilişki kurmakla birlikte belirli alanlarda yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. İncelenen tezler içerisinde kamu yönetimi açık ara en yüksek paya sahipken, bu alanı işletme, sosyoloji, eğitim bilimleri ve siyaset bilimi izlemektedir (Grafik 10). Özellikle işletme, sosyoloji ve eğitim bilimlerinin görece belirgin bir ağırlığa sahip olması, kamu yönetimi alanındaki ampirik araştırmaların örgüt, yönetim, toplumsal yapı ve eğitim gibi farklı çalışma alanlarıyla temas hâlinde geliştiğini düşündürmektedir. Buna karşılık çalışma ekonomisi, kent ve şehir planlama, güvenlik bilimleri ve yerel yönetimlerle ilişkili tezlerin daha sınırlı kaldığı; hukuk, maliye, çevre mühendisliği, iletişim, afet ve kriz yönetimi gibi alanların ise dağılımın daha düşük frekanslı bölümünü oluşturduğu görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde bu çeşitlilik, ampirik kamu yönetimi araştırmalarının yalnızca disiplinin kendi sınırları içerisinde şekillenmediğini, farklı sosyal bilim alanlarından ve daha sınırlı ölçüde diğer disiplinlerden beslenen disiplinlerarası bir araştırma zemini üzerinde geliştiğini ortaya koymaktadır.

4. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Bu araştırmada 2019-2024 yılları arasında kamu yönetimi alanında ampirik yöntemlerle hazırlanan lisansüstü tezlerin genel görünümünü ortaya koymaktadır. Bu çerçevede Ankara'daki üniversitelerin konumunu ayrıca ele alınmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda Ankara'nın kamu yönetimi alanındaki ampirik bilgi üretiminde dikkate değer bir ağırlığa sahip olduğunu belirtmek mümkündür. Bununla beraber bu üretimin yıllar, üniversiteler ve tez türleri arasında dengeli bir dağılım göstermediği de anlaşılmıştır. Ankara'nın başkent kimliği ve çok sayıda köklü yükseköğretim kurumuna ev sahipliği yapması göz önünde bulundurulduğunda ortaya çıkan tablo kenti yalnızca yönetsel ve siyasal kararların alındığı bir merkez olarak değil kamu yönetimi bilgisinin üretildiği başlıca akademik odaklardan biri olarak da görmeyi mümkün kılmaktadır.

Türkiye geneline bakıldığında 2019-2024 döneminde kamu yönetimi alanında hazırlanan 5.377 lisansüstü tezden 1.249'unun ampirik niteliğe haizdir. Yaklaşık %23'e denk gelen bu oran ampirik araştırmaların alanın bilimsel üretiminde belirli bir yer edindiğini, ancak toplam tez üretimi içinde hâlâ sınırlı bir paya sahip olduğunu düşündürmektedir. Ankara özelinde ise aynı dönemde 145 ampirik lisansüstü teze rastlanmıştır. Bu tezlerin yıllara göre dağılımı doğrusal bir seyir izlememektedir. 2019'da 58 olan sayı 2021'de 11'e kadar gerilemiş, sonraki yıllarda dalgalanarak 2024'te 24'e yükselmiştir. Bu iniş çıkışlı seyirden hareketle Ankara'daki ampirik kamu yönetimi araştırmalarının henüz istikrarlı bir üretim çizgisine oturmadığını öne sürmek mümkündür. Yine de bibliyometrik veriler bu dalgalanmanın nedenlerini tek başına açıklamaya yeterli değildir. Zira farklılıkların lisansüstü programların yapısı, öğrenci sayıları, araştırma olanakları ve dönemsel koşullar gibi değişkenlerle birlikte ele alınması gerekmektedir.

Araştırmanın öne çıkan bulgularından birisi Ankara'daki ampirik tez üretiminin üniversiteler arasında belirgin biçimde farklılaşmasıyla ilgilidir. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi 51 tezle ilk sırada yer alırken bu üniversiteyi 26 tezle Hacettepe Üniversitesi, 21 tezle Ankara Üniversitesi ve 15 tezle Orta Doğu Teknik Üniversitesi izlemektedir. İncelenen dönemde ampirik kamu yönetimi araştırmalarının önemli bir kısmının belirli üniversitelerde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Ancak bu sonuç söz konusu üniversitelerin diğer kurumlara kıyasla ampirik araştırmaya daha fazla önem verdiği biçiminde doğrudan yorumlanmamalıdır. Üniversitelerin lisansüstü program ve öğrenci sayıları ile aynı dönemde ürettikleri toplam tez miktarı hesaba katılmadan yapılacak bir değerlendirme yanıltıcı olabilir. Buna rağmen gözlenen kurumsal yoğunlaşma, Ankara'nın geniş yükseköğretim kapasitesinin ampirik kamu yönetimi araştırmalarına üniversite düzeyinde farklı ölçülerde yansıdığını düşündürmektedir.

Tez türlerine ilişkin bulgular bu görünümü tamamlar niteliktedir. Ankara'daki 145 ampirik tezin 110'u (%75,9) yüksek lisans, 35'i (%24,1) ise doktora düzeyinde hazırlanmıştır. Bu oran, ampirik araştırma pratiğinin esas olarak yüksek lisans düzeyinde karşılık bulduğunu göstermektedir. Doktora tezlerinin sayıca sınırlı kalması ve belirli üniversitelerde yoğunlaşması üzerinde ayrıca durulması gereken bir noktadır. Doktora çalışmalarından beklenen özgün bilgi üretimi ve ileri araştırma yöntemlerinin kullanımı düşünüldüğünde Ankara'daki üniversitelerde doktora düzeyindeki ampirik araştırmaların geliştirilmesi alanın metodolojik birikimine katkı sunabilir. Öte yandan tezlerin %65,5'inin profesör unvanına sahip akademisyenlerin danışmanlığında yürütülmüş olması ampirik araştırmalarda kıdemli akademisyenlerin belirgin bir ağırlık taşıdığına dair bir emare sunmaktadır.

Ankara araştırmaları açısından dikkat çekici bir diğer bulgu ampirik tezlerin disiplinlerarası dağılımıdır. Kamu yönetiminin yanı sıra işletme, sosyoloji, eğitim bilimleri ve siyaset bilimi gibi alanların da görünür olması kentte üretilen kamu yönetimi bilgisinin farklı sosyal bilim disiplinleriyle etkileşim içinde geliştiğini düşündürmektedir. Buna karşılık yerel yönetimler, kent ve şehir planlama, çevre, afet ve kriz yönetimi gibi Ankara'nın kentsel gelişimiyle

doğrudan ilişkilendirilebilecek alanların daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum bir eksiklikten ziyade Ankara merkezli gelecek araştırmalar için bir açık alan olarak okunabilir. Başkent olmanın getirdiği hızlı nüfus hareketleri, ulaşım, çevre, afetlere dirençlilik, yerel hizmet sunumu, kentsel dönüşüm ve yönetişim gibi konular kamu yönetimi araştırmalarının doğrudan saha verileriyle ele alabileceği geniş bir çalışma alanı sunabilecektir.

Bu noktada üniversitelerin kentle kurduğu bilimsel ilişkinin güçlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Ankara'daki üniversitelerde yürütülecek ampirik kamu yönetimi araştırmalarının kentin somut yönetsel ve toplumsal sorunlarıyla daha yakından ilişkilendirilmesi lisansüstü tezlerin akademik bilgi üretiminin ötesine geçerek yerel politika süreçlerine de katkı sunmasına imkân tanıyabilir. Özellikle belediyeler, merkezi yönetimin Ankara'daki birimleri, üniversiteler, sivil toplum kuruluşları ve diğer yerel aktörler arasında araştırma temelli iş birliklerinin geliştirilmesi kente ilişkin sorunların saha verileri üzerinden tanımlanmasını ve çözüm seçeneklerinin kanıta dayalı biçimde tartışılmasını destekleyebilir. Böyle bir yönelim Ankara'nın başkent kimliği ile akademik kapasitesi arasındaki ilişkinin güçlenmesine de katkı sağlayabilecektir.

Ankara'yı kamu yönetimi alanında lisansüstü bilgi üretiminin önemli merkezlerinden biri olarak değerlendirirken bu üretimin ampirik boyutunun kurumsal ve metodolojik açıdan geliştirilebileceği alanlar bulunduğunu da ortaya koymaktadır. Ankara'daki üniversiteler arasında ampirik araştırma kapasitesini destekleyecek akademik iş birliklerinin kurulması, doktora düzeyindeki ampirik çalışmaların teşvik edilmesi ve lisansüstü araştırmaların kentin güncel yönetsel sorunlarıyla daha güçlü biçimde ilişkilendirilmesi bu bakımdan önem arz etmektedir. Gelecek çalışmaların Ankara'nın yerel yönetim yapısı, kamu hizmetlerine erişim, ulaşım, çevre politikaları, afet ve kriz yönetimi, kentsel dönüşüm ve vatandaşların yerel hizmetlere ilişkin deneyimleri gibi alanlara yönelmesi kent hakkında üretilen akademik bilginin çeşitlenmesine katkıda bulunabilir. Böylece üniversitelerde üretilen ampirik bilgi Ankara'nın kentsel sorunlarının anlaşılmasına ve bu sorunlara yönelik kanıta dayalı politika seçeneklerinin geliştirilmesine daha sağlam bir zemin sunabilir.

Ezcümle, araştırmanın bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışma, 2019-2024 dönemi ve Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nde erişilebilen lisansüstü tezlerle sınırlıdır. Ayrıca bibliyometrik dağılımlar tezlerin sayısal ve kurumsal görünümünü ortaya koysa da araştırmaların bilimsel niteliği veya üniversitelerin ampirik araştırma performansı hakkında tek başına bir yargıya varmaya elverişli değildir. Gelecek araştırmalarda üniversitelerde tamamlanan toplam tez sayılarının ampirik tezlere oranının hesaplanması, kullanılan veri toplama ve analiz tekniklerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi ve Ankara'yı doğrudan araştırma sahası olarak ele alan tezlerin ayrıca değerlendirilmesi burada ortaya konan bibliyometrik görünümün daha kapsamlı biçimde açıklanmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Aslancı, S. (2022). Araştırma sorgulamaya dayalı öğrenme: Bibliyometrik bir analiz. Bilimsel Eğitim Araştırmaları Dergisi. 6(1), 1-25.

Ayhan, E., Çolak, A., & Önder, M. (2022). Türkiye'deki Kamu Yönetimi çalışmalarının eğilimi: 1990-2019 yılları arasında AİD'de yayınlanan makalelerin bibliyometrik analizi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi, 17(1), 1-28.

Başaran, V. (2021). Orta Çağ'ın bilim tarihine mirası. Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi. 12(2): 170-181.

Cengiz, A.C. (2024). Bilimin karanlık çağı: Ortaçağda bilimsel düşüncenin durumu. DEÜ Edebiyat Fakültesi Dergisi. 11(1), 232-248.

Cevizci, Ahmet (1996). Felsefe sözlüğü. Ankara: Ekin Yayınları.

Comte, A. (2015). A general view of positivism. (J.H. Bridges, Çev.). New York: Routledge.
Erciyas, S.K. (2021). Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisinin bibliyometrik analizi, Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 13(25), 497-523.
Erdoğan, İ. (2001). Sosyal bilimlerde pozitivist-ampirik akademik araştırmaların tasarımı ve yöntem sorunları. Anatolia: Turizm Araştırmaları Dergisi. 12(Güz), 119-134.
Fırıncı-Orman, T. (2015). Geleneksel empirist bilgi kuramı ve mantıksal empirizm açısından mantık. International Journal of Humanities and Education, 1(2), 241-267
Furat, B.S., ve Uzun, A. (2022). Public policy: Concept and theory. Bekir Parlak ve Kadir Caner Doğan (Ed.) The handbook of public administration 1 içinde. (s. 103-119). Lyon: Livre de Lyon.
Gürsakal, N. (2001). Sosyal bilimlerde araştırma yöntemleri. Bursa: Vipaş A.Ş.
Güven, İ., Bozkuş, Y.D., ve Ayantaş, T. (2023). Kısa Ortaçağ tarihi. Ankara: Pegem Akademi.
Junjie, M., ve Yingxin, M. (2022). The discussions of positivism and interpretivism. Global Academic Journal of Humanities and Social Sciences, 4(1), 10-14.
Karaca, S. (2021). Bilimsel araştırma yöntemleri. Ankara: Gazi Kitabevi.
Luton, L.S. (2007). Deconstructing public administration empiricism. Administration & Society. 39(4), 527-544.
McBurney, K. M., ve Novak, L. P. (2002). What is bibliometrics and why should you care? In Professional Communication Conference, IPCC Proceedings. IEEE International.
Neuman, W. L. (2006). Toplumsal araştırma yöntemleri: Nitel ve nicel yaklaşımlar, (Sedef Özge, Çev.) Ankara: Yayın Odası Yayınları.
Norton, J. M. (2001). Introductory concepts in information science. Medford, NJ: Information Today, Inc.
Öktem, N., ve Karagöz, E. (2015). Sosyal bilimlerde yöntem. Ankara: Astana Yayınları.
Önder, M., Gündoğdu, P., ve Ayhan, E. (2019). Türk Kamu Yönetimi araştırmalarında metodoloji kullanımı. Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi. XLVI(1), 105-122.
Sönmez, A. (2024). Ampirik bir araştırma tasarımımızı nasıl daha iyi hale getirebiliriz? Hacettepe Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi. 41(1), 85-102.
Tabak, A., Barbak, A. ve Öztürk, T. (2015). Kamu politikası disiplinindeki dönüşümü bibliyometrik analiz yöntemiyle anlamak mümkün mü? VI. Kamu Politikaları Çalıştayı, (s. 85-93), Sakarya.
Tutar, H. (2022). Nitel araştırmalarda geçerlilik ve güvenilirlik: Bir model önerisi. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 22(Özel Sayı 2), 117-140.
Usta, Aydın (2011). Bilimsel araştırmalarda problematik: Projelendirme ve raporlaştırma. Akademik Yaklaşımlar Dergisi. 2(2), 176-197.
Yavuz, N. (2022). Sosyal bilimlerde sistematik literatür analizi. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi. 51(Özel Sayı), 347-360.
YÖK Tez Merkezi (2024). **https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tarama.jsp#tabs-2** adresinden 20 Ocak 2024 tarihinde alınmıştır.

WEBERYAN BÜROKRASİYİ YENİDEN OKUMAK: KURAMSAL TEMELLER VE GÜNCEL ELEŞTİRİLER

Prof. Dr. Selma KARATEPE
İstanbul Nişantaşı University, Faculty of Economics, Administrative and Social Sciences, Department of Business Administration, 34000 Sarıyer, İstanbul
ORCID ID: 0009-0004-7119-7717
Doç. Dr. A. Muhammet BANAZILI
Tarsus University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Political Science and Public Administration, 33000 Tarsus, Mersin
ORCID ID: 0000-0002-5088-9587

ÖZET
Bu tebliğ Max Weber'in bürokrasi kuramını tarihsel ve kuramsal temelleri çerçevesinde ele alarak ideal tip bürokrasi modelinin temel özelliklerini ve bu modele yöneltilen güncel eleştirileri incelemeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda öncelikle bürokrasi kavramının tarihsel gelişimi ve modern devlet yönetiminin oluşum sürecindeki yeri değerlendirilmiştir. Ardından Weber'in bürokrasi anlayışının dayandığı egemenlik ve meşruiyet yaklaşımı çerçevesinde geleneksel, karizmatik ve yasal-rasyonel otorite tipleri ele alınmıştır. Çalışmada Weber'in ideal tip bürokrasi modeli görev, yetki ve sorumlulukların belirginliği, hiyerarşik yapılanma, yazılı kurallara bağlılık, uzmanlaşma ve iş bölümü, kişisel olmayan ilişkiler, liyakate dayalı personel seçimi ve yükselme gibi temel ilkeler üzerinden incelenmiştir. Bu ilkeler bürokrasinin düzenli, sürekli ve rasyonel bir yönetim yapısı olarak gelişmesinde önemli bir kuramsal çerçeve sunmaktadır. Bununla birlikte bürokratik modelin uygulamadaki işleyişi Weber'in öngördüğü ideal yapıdan farklılaşabilmektedir. Yetkinin üst kademelerde yoğunlaşması, aşırı biçimsellik, informel ilişkilerin yeterince dikkate alınmaması, kamu görevlilerinin siyasal etkilerden bütünüyle bağımsız kabul edilmesi ve kültürel farklılıkların sınırlı biçimde ele alınması modele yöneltilen başlıca eleştiriler arasında yer almaktadır. Bu çerçevede çalışmada Weberyan bürokrasinin modern örgütlerin anlaşılmasındaki kuramsal önemini koruduğunu ancak günümüz kamu yönetiminin değişen örgütsel koşulları karşısında modelin eleştirel bir bakışla yeniden değerlendirilmesinin gerekli olduğu savunulmuştur.
Anahtar kelimeler: Bürokrasi, Max Weber, Weberyan bürokrasi, ideal tip bürokrasi, otorite

RETHINKING WEBERIAN BUREAUCRACY: THEORETICAL FOUNDATIONS AND CONTEMPORARY CRITIQUES

ABSTRACT
This conference paper aims to examine Max Weber's theory of bureaucracy within its historical and theoretical foundations, with particular attention to the main characteristics of the ideal-type model of bureaucracy and the contemporary critiques directed at it. To this end, the study first considers the historical development of the concept of bureaucracy and its place in the formation of modern state administration. It then discusses traditional, charismatic, and legal-rational types of authority within the framework of Weber's approach to domination and legitimacy, which underpins his understanding of bureaucracy. Weber's ideal-type model of bureaucracy is examined through such core principles as clearly defined duties, authority and responsibilities, hierarchical organization, adherence to written rules, specialization and division of labor, impersonal relations, and merit-based recruitment and promotion. These principles provide an important theoretical framework for understanding the development of bureaucracy as an orderly, continuous, and rational form of administration. Nevertheless, the

functioning of bureaucracy in practice may differ from the ideal structure envisioned by Weber. The concentration of authority at higher organizational levels, excessive formalism, insufficient attention to informal relations, the assumption that public officials can remain entirely independent of political influences, and the limited consideration of cultural differences are among the major criticisms directed at the model. In this context, the study argued that Weberian bureaucracy continues to retain its theoretical significance for understanding modern organizations; however, changing organizational conditions in contemporary public administration require the model to be critically reassessed.
Keywords: Bureaucracy, Max Weber, Weberian bureaucracy, ideal-type bureaucracy, authority

1. GİRİŞ

Modern devletin gelişimi siyasal otoritenin merkezîleşmesinin yanı sıra giderek genişleyen kamusal görevlerin belirli kurallar, yetkiler ve uzmanlık alanları çerçevesinde yürütülmesini gerekli kılmıştır. Nüfusun artması, ekonomik ilişkilerin çeşitlenmesi ve devletin üstlendiği hizmetlerin genişlemesi yönetimin kişisel bağlılıklara dayalı geleneksel biçimlerden daha düzenli ve süreklilik arz eden örgütsel yapılara doğru evrilmesine zemin hazırlamıştır. Bu tarihsel dönüşüm içerisinde bürokrasi modern devletin idari kapasitesini taşıyan temel örgütlenme biçimlerinden biri hâline gelmiştir. Kavram gündelik dilde çoğu zaman kırtasiyecilik, katı kurallar ve ağır işleyen idari süreçlerle özdeşleştirilse de kamu yönetimi bakımından bundan daha geniş bir muhtevaya sahiptir. Esasen bürokrasi kamusal yetkinin nasıl örgütlendiği, görevlerin hangi esaslara göre dağıtıldığı, idari kararların nasıl alındığı ve kamu görevlilerinin siyasal otorite karşısındaki konumunun nasıl tayin edildiği gibi modern yönetimin temel meseleleriyle yakından ilişkilidir.

Bürokrasiyi kapsamlı bir kuramsal zeminde ele alan Max Weber'in yaklaşımı modern örgütlerin anlaşılmasında müstesna bir yere sahiptir. Weber'in ideal tip bürokrasi modeli görev ve yetkilerin açık biçimde tanımlanması, hiyerarşik örgütlenme, uzmanlaşma, yazılı kurallara bağlılık, kişisel olmayan ilişkiler ve liyakate dayalı personel sistemi gibi ilkeler üzerine kurulmuştur. Bu modelde bürokrasi salt birtakım idari işlemlerin yerine getirildiği teknik bir mekanizma değildir. Aynı zamanda yasal-rasyonel otoritenin kurumsal karşılığını teşkil etmektedir. Yetkinin kişiden makama aktarılması ve idari faaliyetin önceden belirlenmiş hukuk kuralları içerisinde yürütülmesi, modern yönetimin öngörülebilirliğini ve sürekliliğini sağlamaya yönelik bir arayışın neticesidir (Karakoyunlu & Üstündağ, 2026). Dolayısıyla Weber'in bürokrasi tasavvurunu yalnızca hiyerarşi ve kurallarla sınırlandırmak kuramın gerisindeki meşruiyet ve rasyonelleşme meselesini gözden kaçırma riskini beraberinde getirebilecektir.

Bununla birlikte Weberyan bürokrasinin günümüzdeki konumu klasik modelin bütünüyle terk edilmesi veya değişmeden muhafaza edilmesi şeklindeki iki uç yaklaşım üzerinden değerlendirilemeyecek kadar girift bir hâl almıştır. Nitekim son yıllarda Neo-Weberyan devlet üzerine yürütülen çalışmalar piyasa ve ağ temelli yönetim anlayışlarının yükselişine rağmen hiyerarşi, hukukilik ve güçlü kamu kurumlarının önemini kaybetmediğine dair yeni bir tartışma alanı açmaktadır. Kuhlmann'ın (2024) Almanya üzerine yaptığı değerlendirmede Yeni Kamu İşletmeciliği sonrasında bazı reformların yeniden hiyerarşi ve kamusal örgütlenme yönünde hareket ettiğini, lakin bunun klasik Weberyan modele basit bir geri dönüş anlamına gelmediğini belirtmiştir. Benzer biçimde Weiss'in (2025) Alman yerel yönetimleri üzerine yapmış olduğu araştırmasında uzun yıllara yayılan reformlara rağmen performans ve stratejik yönetim uygulamalarının Weberyan hukuk devleti geleneğinin yerini bütünüyle alamadığını ve uygulamada farklı yönetim anlayışlarının yan yana varlığını sürdürdüğünü iddia etmiştir. Bu

bakımdan güncel tartışmanın yönü Weberyan bürokrasinin ortadan kalkmasından ziyade onun çağdaş yönetim anlayışlarıyla hangi biçimlerde bir arada var olabildiği meselesine kaymaktadır. Bu tartışmanın en dikkat çekici boyutlarından birini dijital dönüşüm oluşturmaktadır. Kamu hizmetlerinin elektronik ortama taşınması, kurumlar arasında veri paylaşımının yaygınlaşması ve idari süreçlerin dijital altyapılar üzerinden yürütülmesi bürokrasinin geleneksel çalışma araçlarını önemli ölçüde değiştirmiştir. Türkiye açısından yapılan güncel değerlendirmelerde de dijital bürokrasinin kamu yönetiminin örgütsel ve işlevsel yapısını dönüştüren bir unsur hâline geldiği tartışılmaktadır (Pank Yıldırım & Erdoğan, 2025). Bununla beraber teknolojinin bürokratik yapıya nüfuz etmesi bürokrasinin kendiliğinden ortadan kalkacağı anlamına gelmemektedir. Aksine dijital sistemlerin standartlaştırma, kayıt altına alma ve izlenebilirlik kapasitesi düşünüldüğünde teknolojik dönüşüm ile Weberyan rasyonellik arasında beklenenden daha karmaşık bir münasebet bulunduğu söylenebilir.

Dijitalleşmenin daha ileri bir aşamasını teşkil eden algoritmik karar alma ve yapay zekâ uygulamaları ise bürokratik otoritenin kullanılış biçimine ilişkin yeni soruları beraberinde getirmiştir. Roehl ve Crompvoets (2025) kamu kurumlarında otomatik idari karar alma sistemlerinin yaygınlaşmasını "algoritmik bürokrasi" bağlamında ele alarak bu sistemlerin iyi yönetimin temel ilkeleriyle ilişkisini incelemektedir. Danimarka'daki farklı politika alanlarından hareket eden araştırma otomatik karar sistemlerinin gerekçelendirme, denetim, uzmanlık, kalite ve idari karmaşıklık bakımından yeni kurumsal kapasitelere ihtiyaç doğurduğuna dikkat çekmektedir. Bu durum bürokratik kararın dijitalleşmesinin yalnızca teknik bir modernizasyon meselesi olmadığını hukukilik, idari sorumluluk ve hesap verebilirlikle doğrudan ilişkili olduğunu akıllara getirmektedir.

Bilhassa yapay zekânın karar süreçlerine dâhil olması Weberyan bürokrasinin temel unsurlarından biri olan idari takdir yetkisinin mahiyetini yeniden tartışmaya açmaktadır. Vredenburgh (2025) kamu yönetiminde kullanılan yapay zekâ sistemlerinin yalnızca kamu görevlisine bilgi sağlayan tarafsız teknik araçlar olarak değerlendirilmesinin yetersiz kalabileceğini savunmakta ve bu sistemlerin kimi yönleriyle sokak düzeyi bürokratlara benzer bir işlev üstlenebileceğini ileri sürmektedir. Buradaki temel mesele karar verme sürecinde insan muhakemesi ile algoritmik değerlendirme arasındaki sınırın nerede başlayıp nerede sona ereceğidir. Dolayısıyla Weberyan modelde uzmanlık, kural ve idari takdir arasında kurulan ilişkinin algoritmaların kamusal karar süreçlerine dâhil olduğu yeni şartlar altında tekrar ele alınması kaçınılmaz hâle gelmektedir.

Nitekim Afzal ve Panagiotopoulos'un (2025) kamu görevlilerinin algoritmik takdir konusundaki algılarını inceleyen çalışmalarında teknolojik dönüşümün insan unsurunu kendiliğinden ikame etmediğine ilişkin dikkate değer bulgular ortaya koymuşlardır. Birleşik Krallık'taki polisler üzerinde yürütülen araştırmada kamu görevlilerinin kendi takdir yetkilerine önem vermeye devam ettikleri ve algoritmalara yetki devri konusunda ihtiyatlı davranabildikleri belirlenmiştir. Geçiş maliyetleri, performansa ilişkin belirsizlikler ve mevcut çalışma biçimlerini koruma eğilimi algoritmik karar sistemleri karşısındaki tutumları biçimlendiren unsurlar arasında yer almaktadır. Bu bulgu geleceğin kamu bürokrasisinin insan veya algoritma şeklindeki keskin bir ayrımdan ziyade insan muhakemesi ile teknolojik kapasitenin birlikte işlediği daha karmaşık bir örgütsel düzene doğru evrilebileceğine ilişkin bir emare sunmaktadır.

Bütün bu gelişmeler Weberyan bürokrasinin 21. yüzyıldaki konumuna ilişkin tartışmanın mahiyetini değiştirmektedir. Mesele artık yalnızca hiyerarşinin katılığı, kırtasiyecilik veya kurallara aşırı bağlılık değildir. Bürokrasinin dijital sistemler içerisinde nasıl yeniden üretildiği, algoritmik kararların hangi hukuki ve etik sınırlar içerisinde kullanılacağı, kamu görevlisinin takdir alanının nasıl korunacağı ve otomatik karar süreçlerinde mesuliyetin kime ait olacağı da

çağdaş bürokrasi tartışmasının asli meseleleri arasına girmiştir. Bu şartlar altında Weberyan bürokrasiyi geçmişte kalmış ve dijital yönetim tarafından ikame edilmekte olan bir örgüt modeli şeklinde değerlendirmek oldukça iddialı olacaktır. Daha ihtiyatlı bir okuma Weberyan ilkelerin bir bölümünün dönüşürken hukukilik, uzmanlık, liyakat, öngörülebilirlik ve hesap verebilirlik gibi bazı ilkelerin yeni teknolojik şartlar altında farklı bir ehemmiyet kazandığını kabul etmeyi gerektirmektedir.

Bu tebliğ söz konusu tartışmalardan hareketle Max Weber'in bürokrasi kuramını tarihsel ve kuramsal temelleri içerisinde yeniden ele almayı ve ideal tip bürokrasi modelinin günümüz kamu yönetiminin değişen koşulları karşısındaki konumunu güncel eleştiriler üzerinden değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda öncelikle bürokrasi kavramının tarihsel gelişimi ele alınmakta akabinde Weber'in egemenlik ve meşruiyet yaklaşımı çerçevesinde geleneksel, karizmatik ve yasal-rasyonel otorite tipleri incelenmektedir. Daha sonra Weberyan ideal tip bürokrasinin temel özellikleri üzerinde durularak modelin dijital dönüşüm, çevik kamu yönetimi, yapay zekâ, algoritmik karar alma ve çok aktörlü yönetişim bağlamındaki konumu yeniden tartışılmaktadır. Çalışmanın hareket noktası Weberyan bürokrasinin güncelliğini yitirip yitirmediği yönündeki ikili bir sorgulamadan ziyade modelin hangi ilkelerinin çağdaş kamu yönetimi bakımından hâlen işlevsel olduğu ve hangi unsurlarının değişen yönetsel şartlar karşısında yeniden yorumlanmaya ihtiyaç duyduğudur. Bu zaviyeden bakıldığında Weber'i yeniden okumak geçmişe dönük bir kuramsal muhasebeden ibaret değildir. Aynı zamanda dijital çağda kamu bürokrasisinin geçirdiği dönüşümü anlamlandırmaya yönelik güncel bir arayıştır.

2. BÜROKRASİ KAVRAMI VE KRONOLOJİSİ

Etimolojik olarak bürokrasi kavramı büro ve egemenlik anlamlarını çağrıştıran iki sözcüğün birleşimine dayanmaktadır. Kavram zaman içerisinde devlet örgütlerinde görev yapan kamu görevlilerini ifade eden dar anlamının ötesine geçerek kamu hizmetlerinin belirli kurallar, görevler ve yetki ilişkileri çerçevesinde yürütüldüğü bir örgütlenme biçimini tanımlamak üzere kullanılmaya başlanmıştır (Eryılmaz, 2021; Şat, 2009). Bu yönüyle bürokrasi kişisel tercihlere dayalı bir yönetim tarzından ziyade görev, yetki ve sorumlulukların önceden belirlendiği kurumsal bir idare anlayışını ifade etmektedir.

Literatürde bürokrasi kavramına farklı anlamlar yüklenmektedir. Kavram bir yandan işlemlerin gereksiz biçimde uzaması ve yoğun yazışma süreçleriyle ilişkilendirilen "kırtasiyecilik" anlamında kullanılırken diğer yandan kamu hizmetlerinin yürütülmesi amacıyla oluşturulan idari teşkilatları ve siyasal kararları uygulayan kamu görevlilerini ifade etmektedir. Daha kuramsal anlamda ise bürokrasi belirli bir örgütlenme ve işleyiş biçimi olarak ele alınmakta olup bu yaklaşım özellikle Weberyan bürokrasi modeliyle ilişkilendirilmektedir (Öztaş, 2015). Dolayısıyla bürokrasi günlük dildeki olumsuz çağrışımlarından daha geniş ve teknik bir içeriğe sahiptir.

Bürokrasiyi sistemli bir kuramsal çerçeve içerisinde ele alan en önemli isim Max Weber olmuştur. Weber bürokrasiyi modern devlet ve büyük ölçekli örgütlerin ihtiyaçlarına cevap veren rasyonel bir örgütlenme biçimi olarak değerlendirmiştir. Onun çalışmalarının ardından bürokrasi kavram ve olgusu yönetim bilimleri ve sosyoloji literatüründe müstakil bir inceleme alanına dönüşmüştür. Örgütsel yapının işleyişi otorite ilişkileri ve kamu görevlilerinin konumu üzerinden daha yoğun biçimde tartışılmaya başlanmıştır (Dursun, 2012).

Bununla birlikte bürokratik örgütlenmenin tarihsel kökleri modern dönemin çok öncesine uzanmaktadır. İlk topluluklarda yönetim çoğunlukla akrabalık ve kabile ilişkileri üzerinden yürütülürken devlet örgütlenmesinin ortaya çıkışıyla birlikte daha düzenli idari yapılara ihtiyaç duyulmuştur. Sulama sistemlerinin yönetimi, savaşların sevk ve idaresi, vergi toplama, nüfusun artması ve ticaretin gelişmesi gibi unsurlar bürokratik yapılanmaların ortaya çıkmasında etkili

olmuştur. Özellikle Çin gibi erken dönem devletlerinde askerî ve yönetsel ihtiyaçların güçlü bir bürokratik örgütlenmenin gelişmesine zemin hazırladığı belirtilmektedir (Eryılmaz, 2021).
Batı Avrupa'da modern bürokrasinin gelişimi ise feodal yapının çözülmesi ve merkezî devletlerin güçlenmesiyle yakından ilişkilidir. Roma İmparatorluğu sonrasında parçalanan siyasal yapı Orta Çağ boyunca feodal ilişkiler üzerinden şekillenmiştir. 16. yüzyıldan itibaren mutlak monarşilerin güç kazanmasıyla birlikte merkezî otorite yeniden belirginleşmiştir. Krallıkların sürekli gelir kaynaklarına, düzenli idari teşkilatlara ve profesyonel görevlilere ihtiyaç duyması modern memuriyet sisteminin temellerini oluşturmuştur. Bu gelişmeler feodal otoritelerin etkisini azaltırken devlet adına sürekli görev yapan idari kadroların önemini artırmıştır (İskender, 2025).
Bu tarihsel dönüşümün düşünsel boyutlarından biri de 17. ve 18. yüzyıllarda Alman coğrafyasında gelişen Kameralizm olmuştur. Kameralist yaklaşım devlet yönetiminin daha düzenli, planlı ve rasyonel esaslara dayandırılmasını savunarak kamu gelirlerinin artırılmasını ve idari kapasitenin güçlendirilmesini öngörmüştür. Bu düşünce profesyonel kamu görevliliği ve sistematik devlet yönetimi anlayışının gelişmesine katkı sağlayarak modern bürokrasinin düşünsel zeminlerinden birini oluşturmuştur (Erdoğan, 2025).
Netice itibarıyla modern bürokrasi tek bir tarihsel kırılmanın ürünü değildir. Devletin merkezîleşmesi, feodal yapıların çözülmesi, ekonomik ilişkilerin genişlemesi, profesyonel memuriyetin gelişmesi ve yönetimin giderek daha rasyonel esaslara bağlanması uzun bir tarihsel birikim meydana getirmiştir. Weber'in bürokrasi kuramı da esasen bu birikimi kavramsallaştıran ve modern örgütlerin işleyişini açıklamak üzere sistematik hâle getiren bir model olarak ortaya çıkmıştır.

3. WEBER'İN OTORİTE ANLAYIŞI VE İDEAL TİP BÜROKRASİ MODELİ

Sanayileşme ve modern devletin gelişmesi geleneksel yönetim biçimlerinin giderek karmaşıklaşan idari ihtiyaçları karşılamasını güçleştirmiştir. Bu süreçte kişisel bağlılık ve geleneklere dayalı yönetim anlayışının yerini daha düzenli, öngörülebilir ve hukuk temelli örgütlenmeler almaya başlamıştır. Weber'in bürokrasi modeli de bu tarihsel dönüşüm içerisinde gelişen yasal-rasyonel yönetim anlayışının örgütsel biçimini ifade etmektedir (Baransel, 1979).
Max Weber bürokrasiyi modern toplumun gelişimiyle birlikte ortaya çıkan rasyonel bir örgütlenme ve yönetim biçimi olarak ele almıştır. Weberyan yaklaşımda bürokrasi ise süreklilik, disiplin, kesinlik, uzmanlık ve güvenilirlik gibi nitelikleri sayesinde büyük ölçekli örgütlerin düzenli biçimde işlemesine imkân veren bir yapı olarak değerlendirilmektedir. Yönetimin kişisel ilişkilerden uzaklaştırılarak teknik bilgiye, kurallara ve belirli yetki alanlarına dayandırılması bu modelin ayırt edici yönünü oluşturmaktadır (Özer, 2013). Bu bakımdan Weber'in ideal tip bürokrasisi modern yönetimin kişilere bağlı olmaktan çıkarak kurumsal ve rasyonel esaslara yönelmesinin teorik karşılığıdır. Weber'in kullandığı ideal tip ulaşılması gereken kusursuz bir yönetim modelini ifade etmemektedir. Aksine ideal tip toplumsal gerçekliğin belirli özelliklerinin analitik amaçlarla belirginleştirilmesi yoluyla oluşturulan kuramsal bir araçtır. Bu nedenle Weberyan bürokrasi mevcut örgütlerin birebir tasviri olmaktan ziyade onların ne ölçüde bürokratik özellik taşıdığını değerlendirmeye imkân veren kavramsal bir model niteliğindedir (Akçakaya, 2016).
Weber'in bürokrasi kuramının düşünsel temelinde egemenlik ve meşruiyet kavramları yer almaktadır. Egemenlik bir kişi veya grubun başkalarının davranışlarını kendi iradesi doğrultusunda yönlendirebilmesini ifade etmekle beraber bu ilişkinin süreklilik kazanması yönetilenlerin otoriteyi kabul etmesine bağlıdır (Dursun, 2012). Dolayısıyla Weber açısından asıl mesele iktidarın mevcudiyetinden ziyade insanların belirli bir otoriteye neden itaat ettiğidir. Bürokrasinin kişisel ilişkiler yerine rasyonel kurallara ve hukuki yetkilere dayanması da bu

meşruiyet arayışıyla yakından bağlantılıdır. Bu yapı içerisinde görev alanlarının belirgin olması, kararların yasal çerçevede alınması ve patronaj ya da kayırma yerine nesnel ölçütlerin esas alınması beklenmektedir (Taş & Uçacak, 2018).

Devlet otoritesinin devamlılığını açıklarken Weber insanların itaati meşru kabul etmelerinin dayanaklarını geleneksel, karizmatik ve yasal-rasyonel otorite olmak üzere üç ideal otorite tipi üzerinden sınıflandırmıştır (Weber, 2005). Bunlar tarihsel ve toplumsal gerçekliği bütün ayrıntılarıyla tasvir eden kategoriler olmaktan ziyade farklı egemenlik ilişkilerinin hangi meşruiyet temelleri üzerinde yükseldiğini anlamaya yarayan analitik modellerdir (Lukes, 2006). Tüm genel açıklamaların akabinde Weber'in otorite tiplerine değinmekte yarar vardır:

3.1. Geleneksel Otorite

Geleneksel otoritede meşruiyet uzun süredir varlığını koruyan geleneklerin, adetlerin ve toplumsal kabullerin geçerliliğine duyulan inanca dayanmaktadır. Yönetimin kim tarafından ve hangi esaslar doğrultusunda yürütüleceğini büyük ölçüde yerleşik gelenekler belirlemektedir (Ergun & Polatoğlu, 1992). Bu nedenle itaat makamı düzenleyen soyut hukuk kurallarından ziyade gelenek tarafından meşru kabul edilen kişiye ve düzene yönelmektedir. Feodal, patrimonyal ve patriyarkal yönetim biçimleri bu otorite tipinin tarihsel örnekleri arasında değerlendirilmektedir (Weber, 2005). Geleneksel otoritenin sürekliliğinde kişisel sadakat ve geçmişten devralınan düzenin meşruiyetine yönelik toplumsal kabul belirleyicidir. Yönetilenler otorite sahibine sahip olduğu teknik yeterlilikten veya hukuken tanımlanmış makamından dolayı değil geleneksel düzen içerisinde kendisine tanınan konum nedeniyle itaat etmektedir (Doğan, 2013). Bu yönüyle geleneksel otorite modern bürokrasinin kişisel olmayan ve hukuk temelli otorite anlayışından ayrılmaktadır.

3.2. Karizmatik Otorite

Karizmatik otorite meşruiyetini yerleşik geleneklerden veya hukuk kurallarından değil, liderin olağanüstü kabul edilen kişisel niteliklerinden almaktadır. Bilhassa toplumsal kriz ve belirsizlik dönemlerinde liderin toplum tarafından sorunları çözebilecek ve yeni bir yön tayin edebilecek kişi olarak görülmesi bu otorite biçiminin güç kazanmasına zemin hazırlamaktadır (Şavkılı & Aydın, 2013). Bu otorite biçiminde düzenli atama ve terfi sistemleri, yerleşik yetki alanları ve biçimsel hiyerarşi ikinci plandadır. Lider ile takipçileri arasındaki kişisel bağlılık esas olduğundan otoritenin devamlılığı büyük ölçüde karizmanın kabul görmesine bağlıdır (Eşki, 2010). Bu nedenle karizmatik otorite kurallara ve makamlara dayalı yasal-rasyonel otoriteye kıyasla daha kişisel ve istikrarsız bir mahiyet taşımaktadır.

3.3. Yasal-Rasyonel Otorite

Yasal-rasyonel otoritede itaat belirli bir kişinin şahsına değil, hukuken oluşturulmuş makama ve bu makamın yetkilerini belirleyen kurallara yönelmektedir. Yetki kullanan kişinin emirlerine uyulmasının sebebi onun kişisel özellikleri önemli değildir. Önemli olan yetkiyi elinde bulunduran kişinin makamının hukuk düzeni içerisinde meşru kabul edilmesidir. Bu sebeple otoritenin sınırlarını da önceden belirlenmiş hukuk kuralları tayin etmektedir (Weber, 2005). Modern kamu yönetiminin bürokratik örgütlenmesi esas itibarıyla bu otorite biçimi üzerinde yükselmektedir. Yetkinin kişiden makama aktarılması, görev ve sorumlulukların hukuki kurallarla sınırlandırılması ve kararların rasyonel ölçütlere bağlanması keyfî yönetim alanını daraltırken örgütsel sürekliliği de güçlendirmektedir (Taş & Uçacak, 2018). Bununla birlikte modern örgütlerde teknik bilgi ve uzmanlığın giderek önem kazanması, biçimsel hiyerarşinin yanında uzmanlıktan kaynaklanan bir otorite alanının da oluşmasına neden olmuştur (Eryılmaz, 2021). Bu bakımdan Weber'in otorite tipleri birbirinden bütünüyle yalıtılmış yapılar olmaktan çok somut örgütlerde farklı ölçülerde karşılık bulabilen ideal tipler olarak değerlendirilmelidir.

4. WEBERYAN BÜROKRATİK MODELE GETİRİLEN GÜNCEL ELEŞTİRİLER

Weberyan bürokrasi modeli uzmanlaşma, hiyerarşi, yazılı kurallar, liyakat, görev ve yetkilerin belirginliği ile kişisel olmayan ilişkiler üzerine kurulu örgütlenme anlayışıyla modern kamu yönetiminin gelişiminde belirleyici bir yere sahip olmuştur. Bununla birlikte günümüz kamu yönetiminin karşı karşıya bulunduğu sorunların niteliği Weber'in ideal tip bürokrasisinin hangi ölçüde çağdaş yönetsel ihtiyaçlara cevap verebildiği tartışmasını yeniden gündeme taşımıştır. Küreselleşme, dijital dönüşüm, yapay zekâ, karmaşık kamu politikaları ve kurumlar arası bağımlılığın artması geleneksel bürokratik örgütlenmenin sınırlarını daha görünür hâle getirmektedir. Kettl'e (2022) göre çağdaş yönetim pratiği giderek daha az Weberyan özellik gösterirken kamu yönetiminin teorik olarak hâlen Weberyan örgüt tasavvuru üzerinden değerlendirilmesi özellikle uzmanlık ve hesap verebilirlik bakımından yeni sorunlar doğurmaktadır.

Güncel eleştirilerin başında Weberyan modelin katı hiyerarşik yapılanması gelmektedir. Hiyerarşi, yetki ve sorumlulukların belirlenmesi ve idari işlemlerin denetlenebilir olması açısından önemini korumaktadır. Buna mukabil günümüz kamu kurumları hızlı teknolojik değişimler, afetler, salgınlar ve çok aktörlü politika sorunları karşısında daha kısa sürede karar vermek ve değişen şartlara uyum sağlamak durumundadır. Geleneksel bürokratik yapıda kararların farklı hiyerarşik kademelerden geçmesi ve yetkinin üst basamaklarda yoğunlaşması böyle dönemlerde örgütsel hareket kabiliyetini sınırlandırabilmektedir. Nitekim dijital çağda kamu hizmetlerinin hızlı ve esnek biçimde sunulmasının önündeki sorunlar arasında zayıf kurumlar arası koordinasyon, sınırlı iş birliği ve değişime uyum güçlüğü göz önünde bulundurulduğunda güncel tartışma hiyerarşinin tamamen ortadan kaldırılmasından ziyade bürokratik düzen ile örgütsel çeviklik arasında daha işlevsel bir denge kurulması üzerinde yoğunlaşılmasının daha doğru bir girişim olabileceği söylenebilir.

Bu tartışmayla bağlantılı olarak çevik kamu yönetimi (*agile government*) yaklaşımı Weberyan bürokrasinin günümüzde en fazla sorgulanan yönlerinden birini oluşturmaktadır. Kamu yönetiminde çeviklik değişen koşullara hızlı cevap verebilme, farklı uzmanlıkları bir araya getirebilme ve politika uygulamalarını elde edilen sonuçlara göre yeniden düzenleyebilme kapasitesiyle ilişkilendirilmektedir. Bu konuya ilişkin güncel literatür irdelendiğinde çevik yönetimin proje düzeyinden örgütsel yönetime ve yönetişim yapılarına kadar genişlediğini ancak bu yaklaşımın mevcut bürokratik sistemleri bütünüyle ortadan kaldırmadığını ortaya koymaktadır (Mergel vd., 2018; Tai & Awathi, 2025). Aksine çevik uygulamalar ile geleneksel bürokratik mekanizmalar çoğu zaman bir arada varlığını sürdürmektedir. Bu durum, çağdaş kamu yönetimindeki esas meselenin "bürokrasi veya çeviklik" biçimindeki keskin bir tercih olmadığını bürokrasinin hukukilik ve hesap verebilirlik güvenceleri ile çevik yönetimin uyum kapasitesinin nasıl bağdaştırılacağı sorusunun önem kazandığını akıllara getirmektedir.

Weberyan modele ilişkin bir diğer güncel tartışma dijital dönüşümün bürokratik yapı üzerindeki etkileri çevresinde gelişmektedir. Geleneksel bürokraside yazılı belge, görev tanımları, hiyerarşik makamlar ve önceden belirlenmiş prosedürler örgütsel düzenin temel araçlarıdır. Dijital kamu yönetiminde ise işlemler elektronik sistemlere aktarılmakta, kurumlar arasında veri paylaşımı artmakta ve bazı yönetsel süreçler otomatik karar sistemleri aracılığıyla yürütülmektedir. Bu dönüşüm bürokrasinin ortadan kalktığı anlamına gelmemektedir. Grøn ve Møller (2024) dijitalleşmenin Weberyan bürokrasinin iş bölümü, hiyerarşi, kurallar ve idari takdir gibi temel unsurlarını hem güçlendirebildiğini hem de dönüştürebildiğini belirtmektedir. Dijital sistemler bir taraftan işlemlerin standartlaştırılmasını ve izlenebilirliğini kolaylaştırırken diğer taraftan hiyerarşik sınırları belirsizleştirebilmekte ve kamu görevlilerinin takdir alanını yeniden biçimlendirebilmektedir.

Bu gelişme Weberyan bürokrasinin kural temelli rasyonellik anlayışına yönelik eleştirileri de farklı bir noktaya taşımaktadır. Geleneksel bürokraside temel mesele memurun önceden

belirlenmiş kurallara uygun hareket etmesi iken dijital bürokraside bazı kurallar yazılım kodları ve algoritmalar aracılığıyla uygulanmaktadır. Böylece bürokratik kararın kaynağı insan tarafından yorumlanan yazılı mevzuattan kısmen algoritmik süreçlere doğru kayabilmektedir. Bu değişim ilk bakışta Weber'in öngördüğü kişisel olmayan, standart ve öngörülebilir yönetim anlayışını güçlendirebilir. Ne var ki algoritmik kararların nasıl üretildiğinin yeterince açıklanamaması, kullanılan verilerdeki önyargıların kararlara yansıması ve hatalı bir kararın sorumluluğunun kime ait olduğunun belirsizleşmesi yeni hesap verebilirlik sorunlarını beraberinde getirmektedir. Yapay zekâ temelli kamu yönetimine ilişkin güncel literatür incelemelerinde algoritmik güvenilirlik, önyargı ve hesap verebilirlik meselelerinin başlıca tartışma alanları arasında yer alması bu bakımdan dikkat çekicidir (Chandra & Feng, 2026).

Yapay zekânın kamu yönetiminde yaygınlaşması, Weberyan modeldeki uzmanlık ve bürokratik takdir yetkisi anlayışını da yeniden düşünmeyi gerekli kılmaktadır. Weberyan modelde kamu görevlisinin meşruiyet kaynaklarından biri sahip olduğu mesleki ve teknik bilgidir. Oysa veri analitiği ve yapay zekâ sistemlerinin karar hazırlama ve karar verme süreçlerine dâhil olmasıyla birlikte uzmanlığın mahiyeti değişmektedir. Hofisi ve Lamidi (2026) yapay zekânın kamu yönetiminde hiyerarşik ve kural temelli yapılardan daha veri odaklı ve uyarlanabilir yönetişim modellerine doğru bir dönüşümü teşvik ettiğini belirtmektedir. Bununla beraber bu değişim, insan unsurunun yönetimden tamamen çıkarılması anlamına gelmemektedir. Bilakis algoritmik kararların hukukilik, etik ve kamu yararı açısından değerlendirilmesi, insan denetiminin hangi aşamalarda korunacağı ve kamu görevlisinin mesleki muhakemesinin nasıl kullanılacağı yeni bürokratik tartışma alanları olarak belirmektedir.

Nitekim 2026 senesinde yayımlanan kimi çalışmalar kamu bürokrasilerinin bütünüyle otomatikleşmesinin özellikle karmaşık görevler ve ayrıntılı hukuki düzenlemeler nedeniyle oldukça güç olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle günümüzde klasik Weberyan bürokrasiden tamamen algoritmik bir bürokrasiye geçişten ziyade insan görevliler, dijital sistemler ve otomatik karar mekanizmalarının birlikte faaliyet gösterdiği "hibrit bürokrasi" biçimlerinin geliştiği ileri sürülmektedir. Madsen, Melin ve Larsson'un (2026) kamu refah kurumları üzerine çalışması, karmaşık vakalarda kamu görevlilerinin önemini koruduğunu ve dijital teknolojilerin bürokratik örgütlenmenin sınırlarını yeniden şekillendirdiğini ortaya koymaktadır.

Güncel eleştirilerin bir başka boyutunu kurumlar arası ve çok aktörlü yönetişim oluşturmaktadır. Weberyan model büyük ölçüde belirgin örgütsel sınırlar, hiyerarşik yetki ilişkileri ve uzmanlaşmış bürokratik birimler üzerinden şekillenmiştir. Oysa günümüzde iklim değişikliği, düzensiz göç, afet yönetimi, siber güvenlik ve dijital dönüşüm gibi politika sorunları tek bir kamu kurumunun yetki ve kaynaklarıyla çözülebilecek nitelikte değildir. Bu tür meseleler farklı kamu kurumlarının yanı sıra yerel yönetimler, özel sektör, sivil toplum ve uzmanlık kuruluşları arasında eş güdüm gerektirmektedir. Dolayısıyla çağdaş kamu yönetiminde otoritenin tek bir hiyerarşik hat içerisinde kullanılması yerine farklı aktörler arasında dağıldığı ve karşılıklı bağımlılıkların arttığı daha karmaşık yönetişim biçimleri gelişmektedir. Kettl'in (2022) Weberyan teori ile çağdaş yönetim pratiği arasındaki mesafeye ilişkin değerlendirmesi de toplumsal sorunların ve bunlara karşı geliştirilen kamusal stratejilerin giderek karmaşıklaşmasına dikkat çekmektedir.

Bununla birlikte Weberyan bürokrasinin güncelliğini bütünüyle yitirdiğini ileri sürmek isabetli olmayacaktır. Aksine dijitalleşmenin yoğunlaştığı bir dönemde hukukilik, liyakat, görev ve yetkinin belirginliği, kayıt altına alma, tarafsızlık ve hesap verebilirlik gibi Weberyan ilkeler farklı bir önem kazanmaktadır. Yapay zekâ ve otomasyon karar süreçlerini hızlandırırken kamu gücünün hangi hukuki yetkiye dayanarak kullanıldığı, kararın gerekçesinin açıklanabilir olup olmadığı ve sorumluluğun kime ait olduğu soruları varlığını korumaktadır. Bu nedenle dijital

dönüşümün bürokrasiyi ortadan kaldırdığı yönündeki görüşlerin aksine, güncel araştırmalar teknolojinin bürokrasinin bazı temel özelliklerini yeniden üretebildiğine ve hatta güçlendirebildiğine dikkat çekmektedir.
Bu noktada güncel eleştirilerin Weberyan modelin tasfiyesinden ziyade yeniden yorumlanmasına yöneldiği söylenebilir. Günümüz kamu yönetiminin ihtiyacı, hiyerarşi ve kuralları tamamen terk eden bir örgütlenme olmadığı gibi teknolojik yenilikleri mevcut bürokratik yapıya eklemekten de ibaret değildir. Hukukilik ve hesap verebilirliğin sağladığı kurumsal güvenceler korunurken karar süreçlerinin daha çevik, kurumlar arası iş birliğine açık ve değişen toplumsal ihtiyaçlara duyarlı hâle getirilmesi gerekmektedir. Nitekim çevik kamu yönetimine ilişkin güncel çalışmalar da çevik uygulamaların geleneksel bürokratik sistemlerle çeşitli biçimlerde bir arada var olduğunu ortaya koymaktadır.

Netice itibarıyla 21. yüzyılda Weberyan bürokrasiye yöneltilen eleştirilerin ağırlık merkezi değişmiştir. Tartışma artık bürokrasinin salt kırtasiyecilik, aşırı hiyerarşi veya katı kurallarla özdeşleştirilmesinden ziyade; dijital dönüşüm, örgütsel çeviklik, algoritmik karar alma, yapay zekâ, bürokratik takdir, kurumlar arası iş birliği ve hesap verebilirlik meseleleri üzerinden ilerlemektedir. Bu yeni şartlar Weberyan modelin bazı unsurlarını aşındırırken hukukilik, uzmanlık, liyakat ve kurumsal sorumluluk gibi temel ilkelerini daha da değerli hâle getirebilmektedir. Dolayısıyla güncel tartışmanın temel meselesi Weberyan bürokrasinin sona erip ermediği değil, modelin hangi unsurlarının korunacağı ve hangilerinin dijital çağın değişen yönetim ihtiyaçlarına göre yeniden biçimlendirileceğidir.

4. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Max Weber'in bürokrasi kuramı modern devletin ve büyük ölçekli örgütlerin nasıl düzenli, sürekli ve öngörülebilir biçimde işleyebileceğini açıklayan en etkili kuramsal yaklaşımlardan biri olmayı sürdürmektedir. Görev ve yetkilerin belirginliği, hiyerarşi, uzmanlaşma, yazılı kurallar, liyakat ve kişisel olmayan ilişkiler üzerine inşa edilen ideal tip bürokrasi yönetimin kişisel sadakatlerden ve keyfî uygulamalardan uzaklaştırılarak hukuki ve rasyonel bir zemine oturtulmasına yönelik güçlü bir çerçeve sunmuştur. Bununla birlikte Weber'in ideal tip kavramsallaştırmasının kusursuz veya her dönemde aynı biçimde uygulanabilecek bir yönetim modeli olarak değil somut örgütsel yapıları anlamaya ve mukayese etmeye imkân veren çözümleyici bir araç olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.
Bu tebliğde ele alınan tarihsel ve kuramsal çerçeve bürokrasinin modern devletle birlikte bir anda ortaya çıkmış bir örgütlenme biçimi olmadığını, bunun devamında, devletin merkezîleşmesi, profesyonel kamu görevliliğinin gelişmesi, uzmanlaşmanın artması ve yönetimin giderek daha fazla hukuki kurallara bağlanmasıyla şekillenen uzun bir tarihsel birikimin neticesiyle vuku bulmuştur. Weber'in katkısı ise bu tarihsel dönüşümü sistematik bir kuramsal zemine taşımasında aranmalıdır. Nitekim geleneksel ve karizmatik otoriteden farklı olarak yasal-rasyonel otoritede itaatin kişiden ziyade hukuken oluşturulmuş makama ve kurallara yönelmesi modern bürokrasinin ayırt edici vasıflarından biri hâline gelmiştir.
Buna mukabil, Weberyan bürokrasinin ortaya çıktığı dönemin örgütsel şartları ile günümüz kamu yönetiminin karşı karşıya bulunduğu meseleler arasında mühim farklılıklar bulunmaktadır. Dijital dönüşüm, yapay zekâ, kurumlar arası bağımlılık, çok aktörlü yönetişim ve hızla değişen toplumsal ihtiyaçlar kamu kurumlarından geleneksel bürokratik düzenin ötesine geçen bir uyum kapasitesi beklemektedir. Özellikle katı hiyerarşik karar süreçleri ve yetkinin üst kademelerde yoğunlaşması hızlı müdahale gerektiren politika alanlarında yönetsel hareket kabiliyetini daraltabilmektedir. Çevik kamu yönetimi tartışmalarının giderek önem kazanması da esasen bu ihtiyacın bir tezahürü olarak değerlendirilebilir.

Dijitalleşme ve yapay zekâ ise Weberyan bürokrasi tartışmasını daha farklı bir mecraya taşımaktadır. Kamu hizmetlerinin elektronik ortama aktarılması, kurumlar arasında veri paylaşımının artması ve algoritmik sistemlerin karar süreçlerine dâhil olması bürokrasinin ortadan kalkmasından ziyade onun araçlarının ve işleyiş biçiminin değişmesine yol açmaktadır. Yazılı kuralların bir bölümünün yazılım kodları ve algoritmalar aracılığıyla uygulanmaya başlanması Weber'in kişisel olmayan ve standartlaştırılmış yönetim düşüncesiyle ilk bakışta uyumlu görünmektedir. Ne var ki kararın hangi veriler üzerinden üretildiği, algoritmik önyargıların nasıl önleneceği, kararların ne ölçüde açıklanabileceği ve hatalı sonuçlarda mesuliyetin kime ait olacağı gibi meseleler klasik bürokrasinin ötesine geçen yeni hesap verebilirlik sorunlarını beraberinde getirmektedir.

Bu nedenle çağdaş kamu yönetimi bakımından asıl mesele Weberyan bürokrasiyi bütünüyle terk etmek değildir. Bilakis hukukilik, liyakat, uzmanlık, yetki ve sorumluluğun belirginliği, kayıt altına alma ve hesap verebilirlik gibi ilkeler dijital yönetim çağında da ehemmiyetini muhafaza etmektedir. Kamu gücünün algoritmalar ve otomatik karar sistemleri aracılığıyla kullanılabildiği bir dönemde kararın hangi hukuki yetkiye dayandığının bilinmesi ve sorumluluğun açık biçimde belirlenmesi daha da önemli hâle gelmektedir. Dolayısıyla teknolojik dönüşüm Weberyan ilkelerin tamamını hükümsüz kılmaktan çok bazılarını yeni şartlar altında yeniden düşünmeyi gerekli kılmaktadır.

Bu noktada Weberyan bürokrasi ile çevik ve dijital yönetim anlayışlarını birbirinin alternatifi olarak değerlendirmek yerine aralarında fonksiyonel bir denge kurulması daha isabetli görünmektedir. Hiyerarşinin denetim ve sorumluluk bakımından sağladığı kurumsal güvenceler korunurken karar süreçlarının gereksiz biçimde uzamasının önüne geçilmesi; yazılı kuralların hukuki güvence sağlayan niteliği muhafaza edilirken değişen koşullar karşısında idari esnekliğe alan açılması; dijital teknolojilerden yararlanılırken insan denetimi ve mesleki muhakemenin bütünüyle dışlanmaması bu dengenin temel unsurları arasında düşünülebilir. Bu bakımdan geleceğin kamu bürokrasisinin ne tamamen klasik Weberyan ne de bütünüyle algoritmik bir mahiyet taşıması beklenmelidir. İnsan, kural, uzmanlık ve teknolojinin birlikte yer aldığı hibrit bürokratik yapıların daha belirgin hâle gelmesi kuvvetle muhtemeldir.

Netice itibarıyla Weberyan bürokrasinin günümüz kamu yönetimi açısından değeri bütün unsurlarıyla muhafaza edilmesi gereken değişmez bir örgüt modeli olmasından kaynaklanmamaktadır. Onun asıl kıymeti kamu yönetiminde otoritenin nasıl meşrulaştırıldığı, yetkinin nasıl sınırlandırıldığı, uzmanlığın nasıl örgütlendiği ve idari sorumluluğun nasıl tesis edildiği gibi bugün de güncelliğini koruyan temel sorulara güçlü bir kuramsal zemin sunmasında yatmaktadır. Bu sebeple 21. yüzyıl kamu yönetimi açısından tartışılması gereken husus Weberyan bürokrasinin sona erip ermediğinden ziyade hangi ilkelerinin korunacağı, hangilerinin yeniden yorumlanacağı ve bunların dijital çağın çeviklik, iş birliği, açıklanabilirlik ve hesap verebilirlik talepleriyle nasıl telif edileceğidir. Bu zaviyeden bakıldığında Weber'in bürokrasi kuramı aslında geçmişte kalmış bir yönetim tasavvuru değildir. Bilakis, çağdaş kamu yönetiminin dönüşümünü anlamlandırmak için hâlen müracaat edilebilecek güçlü bir kuramsal referans niteliğini korumaktadır.

KAYNAKÇA

Afzal, M., & Panagiotopoulos, P. (2025). How public officials perceive algorithmic discretion: A study of status quo bias in policing. Public Administration Review, 85(5), 1385-1399. https://doi.org/10.1111/puar.13957

Akçakaya, M. (2016). Weber'in bürokrasi kuramının bugünü ve geleceği. Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 3(8), 275-295. https://izlik.org/JA48AZ88DT

Baransel, A. (1979). Çağdaş yönetim düşüncesinin evrimi. İstanbul: İşletme İktisadı Enstitüsü

Chandra, Y., & Feng, N. (2026). Algorithms for a new season? Mapping a decade of research on the artificial intelligence-driven digital transformation of public administration. Public Management Review, 28(3), 620–654.

Dursun, D. (2012). Bürokrasi teorisi ve yönetim. Sosyal Siyaset Konferansları Dergisi, 37-38, 133-149. https://izlik.org/JA93AY64FR

Erdoğan, M. C. (2024). XVIII. yüzyıl Osmanlı düşüncesinde Kameralist üretim anlayışı. Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 15(1), 67-88. https://izlik.org/JA74MZ25MW

Ergun, T., & Polatoğlu, A. (1992). Kamu yönetimine giriş (4. baskı). Ankara: TODAİE Yayınları.

Eryılmaz, B. (2021). Bürokrasi ve siyaset. (8. Baskı). Kocaeli: Umuttepe Yayınları.

Eşki, H. (2010). Bugünü anlamak için Max Weber'i yeniden okumak. ZKÜ Sosyal Bilimler Dergisi, 6(11), 187-198. https://izlik.org/JA85SK89KN

Grøn, C. H., & Møller, A. M. (2024). Public bureaucracy and digital transformation: Structures, practices and values. Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67864-6

Hofisi, C., & Lamidi, K. O. (2026). Artificial intelligence and the transformation of public administration: Towards an algorithmic governance paradigm. Industrial Artificial Intelligence. https://doi.org/10.1007/s44244-026-00034-8

İskender, S. (2025). Max Weber'in bürokrasi kuramı: Günümüz uygulamaları ve gelecek yönelimleri. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 15(4), 1484-1513.

Johannessen, B. I. (2025). An agile bureaucracy? Lessons from an ethnographic study of agile teams in the Norwegian public sector. Government Information Quarterly, 42(3), 102057. https://doi.org/10.1016/j.giq.2025.102057

Karakoyunlu, İ., & Üstündağ, H. C. (2026). Max Weber'in bürokrasi teorisi bağlamında Osmanlı bürokrasisinin gelişim sürecinin izini sürmek. Ünye İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 8(1), 1-19. https://izlik.org/JA46AS28AM

Kettl, D. F. (2022). Weberian bureaucracy and contemporary governance. Perspectives on Public Management and Governance, 5(2), 111-120. https://doi.org/10.1093/ppmgov/gvab026

Kuhlmann, S. (2024). Back to bureaucracy? The advent of the Neo-Weberian State in Germany. Journal of Policy Studies, 39(2), 5-20. https://doi.org/10.52372/jps39202

Lukes, S. (2006). İktidar ve otorite. In T. Bottomore & R. Nisbet (Ed.), Sosyolojik çözümlemenin kısa tarihi-II (Çev. S. Tekay, ss. 885-944). İstanbul: Kırmızı Yayınları.

Madsen, C. Ø., Melin, U., & Larsson, K. K. (2026). Hybrid bureaucracy: The relationship between digital technologies and institutional arrangements in public welfare agencies. Government Information Quarterly, 43(3), 102166. https://doi.org/10.1016/j.giq.2026.102166

Mergel, I., Ganapati, S., & Whitford, A. B. (2021). Agile: A new way of governing. Public Administration Review, 81(1), 161-165. https://doi.org/10.1111/puar.13202

Özer, M. A. (2013). Weber'in bürokrasisi karşısında yönetimde yeniden yapılandırma arayışları. Küresel İktisat ve İşletme Çalışmaları Dergisi, 2(4), 43-57. https://izlik.org/JA77YJ49UN

Öztaş, N. (2015). Yönetim: Örgüt ve yönetim kurumları. Ankara: Otorite Yayınları.

Pank Yıldırım, Ç., & Erdoğan, O. (2025). Dijital bürokrasinin Türk kamu yönetimine etkisi bakımından incelenmesi: Dijital Dönüşüm Ofisi örneği. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, 47. 137-150. https://doi.org/10.18092/ulikidince.1579149

Roehl, U., & Crompvoets, J. (2025). Inside algorithmic bureaucracy: Disentangling automated decision-making and good administration. Public Policy and Administration, 40(2). 322-350. https://doi.org/10.1177/09520767231197801

Şat, N. (2009). Yeni kamu yönetimi anlayışı: Weber bürokrasisinin sonu mu? Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 2(1), 93-108.

Şavkılı, C., & Aydın, T. (2013). Atatürk döneminde bürokrasinin yeniden yapılandırılması. Atatürk Araştırma Merkezi Dergisi, 29(87), 67-90. https://izlik.org/JA87SB63NE

Tai, K. T., & Awasthi, P. (2025). An exploration of agile government in the public sector: A systematic literature review at macro, meso, and micro levels of analysis. Government Information Quarterly, 42(4), 102082. https://doi.org/10.1016/j.giq.2025.102082

Taş, İ. E., & Uçacak, K. (2018). Türk kamu yönetiminde bürokratik işlemlerin azaltılmasında UYAP uygulamasının önemi. Sosyal Bilimler Dergisi, 5(19), 492-513.

Vredenburgh, K. (2025). AI and bureaucratic discretion. Inquiry, 68(4), 1091-1120. https://doi.org/10.1080/0020174X.2023.2261468

Weber, M. (2005). Bürokrasi ve otorite (Çev. H. B. Akın). Ankara: Adres Yayınları.

Weiss, J. (2025). Is bureaucracy ironclad after all? Prevalence and variances of performance- and strategy-oriented management in German local governments. International Review of Administrative Sciences, 91(2), 293-309. https://doi.org/10.1177/00208523241268140

CITY POP VE GÖRSEL NOSTALJİ ÜZERİNDEN 1980'LER ESTETİĞİNİN DİJİTAL ÇAĞDA YENİDEN ÜRETİMİ

Doç. Dr. Bayram BOZHÜYÜK
Gaziantep University, Faculty of Fine Arts, Department of Graphic Arts, Şehitkamil/Gaziantep
ORCID ID: 0000-0002-3958-5072

ÖZET

1970'lerin sonu ile 1980'lerin Japonya'sında ortaya çıkan müzik türünün, 21. yüzyıl dijital ortamlarında yeniden popülerleşmesi farklı açılardan değerlendirilecek sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Müziğin yanında özellikle görsel estetiğin rolünün incelenmesi nostalji içerisinde başka bir boyut açmıştır. Günümüzde YouTube, Spotify ve sosyal medya platformları aracılığıyla yeniden dolaşıma giren City Pop, özellikle görsel tasarımın eşlik ettiği dijital sunumlar sayesinde yeni kuşak dinleyiciler üzerinde güçlü bir duygusal etki yaratmaktadır. City Pop, yalnızca bir müzik türü değil; aynı zamanda kentli yaşam, tüketim kültürü ve moderniteye dair geçmişe ait görsel ve duygusal imgelerle örülü kültürel bir alanıdır. Bu fikirler makalede kaynaklarla irdelenmiştir. Çalışmada, City Pop estetiğini temsil eden görsel sanatçıların üretimleri incelenmiş; bu görsellerin içerdiği nostalji, bellek ve idealize edilmiş geçmiş temsilleri nitel analiz yöntemiyle çözümlenmiştir. Aynı zamanda müzik ve görsel birlikteliğinin dijital platformlarda nasıl bir algı ve deneyim oluşturduğu ele alınmıştır. Çalışmanın bulguları, City Pop'un günümüzdeki popülerliğinin yalnızca müzikal özelliklerinden değil, aynı zamanda görsel estetikle kurduğu güçlü bağdan kaynaklandığını göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, Türkiye'de sınırlı olan City Pop literatürüne katkı sunmayı ve görsel-müzikal etkileşim üzerine yeni tartışma alanları açmayı hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: City Pop, Post-Nostalji, illüstrasyon.

THE REPRODUCTION OF 1980S AESTHETICS IN THE DIGITAL AGE THROUGH CITY POP AND VISUAL NOSTALGIA

ABSTRACT

The resurgence of a music genre that emerged in Japan in the late 1970s and 1980s within 21st-century digital environments has produced outcomes that can be evaluated from multiple perspectives. Examining the role of visual aesthetics alongside music has opened up a new dimension within nostalgia. Today, City Pop, which has re-entered circulation through platforms such as YouTube, Spotify, and social media, creates a strong emotional impact on new generations of listeners, particularly through digital presentations accompanied by visual design. City Pop is not only a music genre; it is also a cultural domain interwoven with visual and emotional images of urban life, consumer culture, and modernity from the past. These ideas are examined in the article through relevant sources. The study analyzes the works of visual artists representing City Pop aesthetics and interprets the nostalgia, memory, and idealized representations of the past embedded in these visuals through a qualitative analysis method. Additionally, it explores how the combination of music and visuals constructs perception and experience on digital platforms. The findings of the study indicate that the contemporary popularity of City Pop stems not only from its musical qualities but also from its strong connection with visual aesthetics. In this context, the study aims to contribute to the limited City Pop literature in Turkey and to open new avenues for discussion on visual-musical interaction.

Keywords: City Pop, Post-Nostalgia, illustration

1. GİRİŞ

City Pop, 1970'lerin sonlarında Japonya'da ortaya çıkan ve 1980'ler boyunca gelişen bir popüler müzik türüdür. Funk, soul, caz-fusion ve disko gibi Batı kökenli müzik türlerinden beslenen City Pop, Japonya'nın hızlı ekonomik büyüme dönemine eşlik eden kentli yaşam biçimini yansıtır. Bu müzik, yalnızca işitsel bir deneyim sunmakla kalmaz; aynı zamanda modern şehir hayatı, tüketim kültürü, bireysel özgürlük ve boş zaman pratikleri gibi kavramlarla iç içe geçmiştir. 1980'ler Japonya'sı, ekonomik refahın arttığı, orta sınıfın genişlediği ve tüketim kültürünün yaygınlaştığı bir dönemdir. City Pop, bu bağlamda, gece şehir manzaraları, otomobiller, yaz tatilleri, sahil yaşamı ve romantik ilişkiler gibi temaları hem müzikal hem de görsel düzlemde temsil eder. Albüm kapakları, dergi illüstrasyonları ve reklam estetiği, bu müziğin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Ancak City Pop'un küresel ölçekte yeniden popülerleşmesi 2010'lu yılların ortalarından itibaren gerçekleşmiştir. Özellikle YouTube algoritmalarının öneri sistemleri, bu müziğin yeni dinleyicilerle buluşmasında kritik bir rol oynamıştır. Eski kayıtların dijital ortama yüklenmesi, remix kültürü ve Vaporwave/Future Funk gibi türlerin City Pop'tan örnekler kullanması, bu yeniden keşif sürecini hızlandırmıştır. Bu noktada dikkat çeken önemli bir unsur, müziğin tek başına değil, görsel tasarımlarla birlikte sunulmasıdır. YouTube videolarında kullanılan anime sahneleri, retro şehir manzaraları, neon ışıklar ve minimal illüstrasyonlar, dinleyiciye yalnızca bir müzik değil, bütünsel bir atmosfer sunmaktadır. Bu durum, müzik deneyimini görsel bir anlatıya dönüştürmektedir. Bu makalenin temel amacı, City Pop'un dijital çağdaki yeniden üretiminde görsel estetiğin rolünü incelemektir. Çalışma, özellikle 20. yüzyılın görsel estetik anlayışlarının 21. yüzyıl dijital grafiklerine nasıl adapte edildiğini analiz etmektedir. Bu bağlamda senin önceki çalışmanla doğrudan kavramsal bir süreklilik kurulmaktadır. Öncelikle "City Pop Kavramı ve Japon Pop Müziğine Kısaca Bakış" başlığı altında bu müzik türünün nasıl ortaya çıktığı, görsel estetiğe etkisi ve günümüzde neden tekrar popüler hale geldiği kaynaklarla üzerinde durulmuştur. Ardından "Bellek, Nostalji ve Görsel Sanatlarda Kullanımı" başlığı altında nostalji kavramının güncel dünyada neyi ifade ettiği ve kolektif hafıza üretimindeki önemi anlatılmış, tasarımcıların güncel işlerinde neden eskinin estetiğini tekrar kullanmak istediği kaynaklarla tartışılmıştır. Ayrıca bu bölümde geçmişin hatırlanması ve eskinin estetiğinin City pop ve internet teknolojilerinin artışı ile aynı paralelde ilerlediği ortaya konulmak istenmiştir. Sonraki bölümde ise görsel analiz, kültürel çözümleme ve kavramsal değerlendirme teknikleri kullanılmıştır. City Pop estetiğini temsil eden sanatçılar ve görseller incelenmiş, bu görsellerin çağrıştırdığı duygular, imgeler ve anlam katmanları analiz edilmiştir. Bu çalışma, Türkiye'de henüz sınırlı olan City Pop literatürüne katkı sunmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda müzik ve görsel sanatlar arasındaki etkileşimi dijital kültür bağlamında ele alarak disiplinler arası bir perspektif geliştirmeyi amaçlamaktadır.

2. CITY POP KAVRAMI VE JAPON POP MÜZİĞİNE KISACA BAKIŞ

City Pop'un kökenleri, Japonya'da II. Dünya Savaşı sonrası dönemde gelişen popüler müzik kültürüne kadar uzanır. 1950'ler ve 1960'larda Japonya'da Batı müziği etkisi giderek artmış ve pop müzik yerel müzik üretimini şekillendirmiştir. 1950'ler ve 60'lar Uzak Doğu ülkelerinin tekrar kendilerini toparlama ve savaş sonrası liberal dünya ile barışması sürecini oluşturmuştur. Bu sürecin doğrultusunda City Pop, ilk olarak 1970'lerin sonlarında Japonya'da ortaya çıkmıştır. Sınırları bir tür olarak kesin çizilmemiş bir müzik türüdür çünkü Funk, soul, disko, fusion, boogie ve rock gibi Batı popüler müzik türlerini Japonca sözlerle birleştirmektedir (Sommet ve Kato, 2021:2). Bu dönemde Japon müzisyenler, Batı müziğini taklit etmekten ziyade, onu yerel kültürel bağlamla harmanlamaya başlamıştır. Ortaya çıkan müzik, hem küresel hem de yerel unsurlar taşıyan hibrit bir yapıdadır. City Pop, bu hibritleşmenin en

belirgin örneklerinden biridir. 1980'lerde Japonya'nın sanayileşme, markalaşma ve anime gibi özelliklerle refah seviyesinin yükselmesi ve ekonomik zirveye ulaşmasıyla birlikte City Pop da altın çağını yaşamıştır. Aynı zamanda büyük bir teknolojik atılımla dünyada ilk olan Sony'nin Walkman'inin icadıyla artık müzik, kasetçaları olan bu cihazla mobilize hale gelmiştir (Russell, 2020). Bu sayede müzik, şehirli bireyin yaşam tarzını temsil eden bir araç haline gelmiştir. Bu bakımdan City Pop terimi, müzik ile şehir yaşamına ve kentsel deneyimlere odaklanmasını anlatmaktadır. (Chen, 2023:1214). Ayrıca 1980'lerde Dünya'da tüketim toplumunun yükselişi, genç kuşağın varlıklı yaşam tarzıyla karakterize edilmiş, Japonya'nın da eşi benzeri görülmemiş ekonomik refahı ve kültürel üretim için sağlanan bol finansal kaynaklar, özellikle Tokyo merkezli Japon müzik endüstrisinin hızla büyümesine ve gelişmesine olanak tanımıştır (Uchiyama, Akhir, Furuoka, Wang, Nikitina, 2024:585). City pop, özü ve dokusu itibarıyla özellikle görece yüksek yaşam standartlarına sahip kentli dinleyicilerin beklenti ve arzularına hitap etmiştir (Chen, 2023:1214). Otomobil kullanımı, yaz tatilleri, gece hayatı ve romantik ilişkiler, şarkı sözlerinde ve albüm kapaklarında sıkça işlenen temalardır. Örneğin gece Japonya'da araba kullanmak ya da yazın sahilde dinlenmek gibi imgeler öne çıkmaktadır. Bu motifler, 1980'lerin Japon albüm ve müzik dergisi kapaklarıyla ilişkilendirilen görsel dünyayla örtüşmektedir (bkz. Kimura 2006, 2014'den akt. Sommet ve Kato, 2021:11).Ancak 1990'larla birlikte Japon müzik piyasasında değişimler yaşanmış ve City Pop popülerliğini kaybetmiştir. Buna rağmen, tür tamamen ortadan kalkmamış; belirli bir dinleyici kitlesi tarafından varlığını sürdürmüştür. 2010'lu yıllarda ise internetin etkisiyle City Pop yeniden keşfedilmiştir. YouTube, Reddit ve Spotify gibi platformlar, bu müziğin küresel dolaşıma girmesini sağlamıştır. Özellikle algoritmik öneriler, dinleyicilerin bu müzikle tesadüfi şekilde karşılaşmasına olanak tanımıştır. Bu türün popüler olmasındaki en büyük pay ise Covid salgını dönemi olmuştur. Evlerine kapanan insanlar bu müziği keşfetmiştir. Opus Tube, Snowpony gibi birçok amatör müzik ekibi ayrı ayrı evlerinden senkronize bir şekilde bu müzikleri tekrar icra etmişlerdir. Ayrıca Vaporwave ve Future Funk gibi internet tabanlı müzik türleri, City Pop'un yeniden popülerleşmesinde önemli rol oynamıştır. Bu türler, eski City Pop kayıtlarını örnekleyerek yeni müzikler üretmiş ve genç dinleyicilerin ilgisini çekmiştir. Günümüzde ise yapay zekâ uygulamaları ile bu müziğe ait tınılardan oluşan dijital müziklerde artış bulunmaktadır. Bu süreçte City Pop, yalnızca bir müzik türü olmaktan çıkmış; bir internet estetiğine dönüşmüştür. Çünkü bu nostalji her zaman salt Japonya'ya yönelik değildir; insanlar için bu müzikler ve görseller yalnızca internet aracılığıyla karşılaştıkları gündelik medya deneyimlerinin bir parçası olmuştur (Sugiyama ve Barile, 2025:434). Ayrıca YouTube videolarında kullanılan hareketli grafikler, video görseller, nostaljik bir geçmiş imgesi yaratmakta ve dinleyiciyi hayali bir geçmişe taşımaktadır. Bu bağlamda YouTube, yalnızca müziğin dinlendiği bir platform olmaktan çıkarak, ses ve görüntünün birlikte işlediği alternatif bir geçmiş deneyiminin kurulduğu dijital bir alan hâline gelmektedir. Özellikle düşük çözünürlüklü görüntüler, retro tipografiler, VHS estetiği ve dönemsel görsel unsurlar, dinleyicide geçmişe aitmiş gibi algılanan bütünlüklü bir atmosfer oluşturmaktadır.

3. BELLEK, NOSTALJİ VE GÖRSEL SANATLARDA KULLANIMI

Nostalji, bireyin geçmişe duyduğu özlem olarak tanımlanmaktadır. Bu duygu durumu günümüz dijital toplumda işe yarar bir ifade türü olarak ortaya çıkmaktadır. Burada öncelikle değerlerin metalaşması durumu söz konusudur. Çünkü modern kültür endüstrisi, geçmişi bugünün ihtiyaçlarına göre yeniden kurgulayarak toplumsal belleği biçimlendirme gücüne sahiptir. Nostalji, teknolojik ve organizasyonel yenilik zamanında yaratılan nesnelere yeni bir tür zaman duygusu kazandırma yeteneği nedeniyle endüstriyel toplumda önemli bir rol oynamaktadır (Sugiyama ve Barile, 2025:427) Eski, liberal toplumun günümüz insanının hafızasındaki sahte

imgesinin oluşturulması için bir araç haline gelmiştir (Adorno, 2013: 84). Bu durum, bireyin tarihsel gerçeklikle kurduğu ilişkiyi ticari bir alana çekmekte ve rasyonel düşünme kapasitesinin giderek aşınmasına yol açmaktadır. Modern kültür endüstrisi nostalji psikolojisini çoğu zaman gerçek geçmişten ziyade idealize edilmiş geçmiş bir zaman dilimine yönelik gösterişli versiyonlarını sunmaktadır.

İnsan zihninin geçmişi hatırlama eğilimi, belirsizlik ve karmaşa karşısında güvenli alanlar yaratma ihtiyacıyla ilişkilidir. Geçmiş, çoğu zaman bugünden daha düzenli, daha anlamlı ve daha "saf" bir zaman dilimi olarak algılanır. Bu algı, her ne kadar gerçeklikle tam olarak örtüşmese de, bireyin duygusal denge kurmasına yardımcı olur. Günümüzün hızla değişen dijital dünyasında, sürekli bilgi akışı ve görsel yoğunluk, bireyde bir tür yorgunluk ve yabancılaşma hissi yaratmaktadır. Bu noktada nostaljik estetikler, daha sade, daha anlaşılır ve daha "yavaş" bir dünya vaadi sunar. Bu bağlamda kolektif belleğe ait imgeler insan zihninde belirmesi olasıdır. Kolektif bellek bireylere geçmişi hatırlatma mekanizması olmasının yanında yaşanmış ya da yaşanması arzulanan olaylar üzerinden belirli nostalji duygularını üretmede etkendir. Ayrıca bu otobiyografik hafıza durumu, geçmişte deneyimlenen ve hatırlanan bir şeye geri dönmeye yönelik psikolojik bir özlemi ortaya çıkarmaktadır (Nieland, Maherdran, Crafter, 2023: 68). Bunların yanında sanatsal yaratıcılığı geleceğe yansıtmak yerine, düşsel ve estetik anlamda çağdaş insan konfor alanının dışına çıkmamanın rahatlığını nostaljinin tekrarında bulmaktadır. Nostaljiye dayanan somut dünyadan uzaklaşma, edebiyatta, görsel sanatlarda ve film endüstrisinde ortaya çıkışı göz önüne alındığında, sanatçılar kadar sosyologlar, psikologlar ve filozoflar tarafından da bilinen bir olgudur (Sopčić ve Musil, 2020: 280).

Nostalji, en genel tanımıyla bireyin geçmişe duyduğu özlem olarak ifade edilse de, bu kavramın yalnızca bireysel bir duygu durumunu değil, aynı zamanda kültürel, toplumsal ve estetik bir üretim alanını kapsadığı görülmektedir. Nostalji çoğu zaman bireyin gerçekten deneyimlediği bir geçmişe değil, zihinde yeniden kurgulanan, idealize edilmiş ve estetik olarak filtrelenmiş bir zamana yöneliktir. Bu bağlamda nostalji, gerçekliğin birebir hatırlanmasından ziyade, belleğin seçici ve yeniden kurucu doğasıyla ilişkilidir. Günümüzde retro trendlerin yeniden canlanması, geçmişten fotoğraf, müzik, film ve moda paylaşımı için önemli bir araç haline gelen sosyal medya platformlarının yükselişiyle de yakından bağlantılıdır (Chen, 2023:1212). City Pop estetiği de, dijital alanda bu yeniden kurulan geçmişin hem işitsel hem de görsel düzlemde güçlü bir temsilini sunmaktadır. Görsel tasarımda bellek kavramı, burada yalnızca bireysel hatırlama süreçleriyle sınırlı değildir; aynı zamanda kolektif bellek olarak adlandırılan, toplumların ortak deneyim ve imgeler üzerinden oluşturduğu bir anlam dünyasını da içermektedir. Tasarımcılar açısından bakıldığında, nostalji ve kolektif bellek, güçlü bir yaratıcı kaynak olarak işlev görmektedir. Günümüz grafik tasarımcıları, geçmişe ait görsel dilleri yeniden yorumlayarak çağdaş üretimlere uygulamaktadır. Bu süreçte doğrudan taklitten ziyade, estetik kodların yeniden bağlamlandırılması söz konusudur. Örneğin 1980'lere ait fotoğraflar, renk paletleri, tipografi anlayışı veya kompozisyon biçimleri, günümüz dijital araçlarıyla yeniden üretilmekte ve farklı bir bağlamda sunulmaktadır. Barbara Kruger, Stefan Sagmeister, David Carson, Paula Scher ve Gerhard Richter gibi görsel tasarımcıların çalışmaları sanatsal anlamda örnek gösterilebilir. Aynı şekilde 1980'ler Japonya'sına ait şehir manzaraları, neon ışıklar, sahil yolları ya da otomobiller, bu dönemi yaşamamış bireyler için bile güçlü bir nostaljik çağrışım yaratabilir. Çünkü 1980'li yıllarda, hangi coğrafyada yaşanırsa yaşansın, televizyon kültürü ve görsel dili, dönemin Japon animeleri ile bu yapımlarda kullanılan müzik ve temalar, kolektif belleğin oluşumunda dikkate alınması gereken önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Bu durum, görsel ve işitsel kültürün kolektif bellek üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymada bir örnekti. Günümüz metamodernist tasarımlarda uyandırılan anılar, gerçekliğin gerçekçi ve güncel olmayan tasvirlerine dayanma eğilimindedir ve belki de yalnızca

izleyici/dinleyicinin hayal gücünde var olan zaman ve yerlere odaklanmaktadır (Ballam-Cross, 2021: 70). Eskiye ait afişler, kitap baskıları, gazete reklamları, tv reklamları ve çeşitli ilan türleri dönemin yaşam şeklini ve estetiğini içinde barındırmaktadır. Burada grafik eserlerin görsel yönlerinin özellikleri zevkler ve kimlikler hakkında bir his uyandırma eğilimi göstermektedir (Farias, 2014:205). Zaman içinde grafik tasarımın renk paletleri, yazı karakterleri, illüstratif dili ve düzen kurguları, farkında olunmadan ortak bir görsel hafızanın parçası hâline gelmiştir. Günümüzde ise geçmişe yönelik bu sezgisel yakınlık, tasarımcıların yorumları aracılığıyla dönüşüme uğrayarak çağdaş görsel anlatım biçimleri içinde yeniden varlık kazanmaktadır. Görsel sanatlarda nostalji, belirli renk paletleri, kompozisyonlar ve temalar aracılığıyla inşa edilmektedir. City Pop görsellerinde de pastel tonlar, gün batımı renkleri, neon ışıklar ve minimal kompozisyonlar sıkça kullanılmaktadır. Bu unsurlar, izleyicide hem tanıdık hem de uzak bir zaman hissi yaratmaktadır. Müzik ve görselin birleşimi, bu duygusal etkiyi daha da güçlendirir. Dinleyici, yalnızca bir şarkıyı dinlediği sırada başka bir atmosferin içine girmektedir. Bu durum, özellikle dijital platformlarda daha belirgindir. City Pop estetiği, tam da bu noktada, bireysel ve kolektif belleğin kesişiminde durmaktadır. Bu görseller çoğu zaman belirli bir anlatıya sahip değildir; ancak güçlü bir atmosfer üretir. Müzik ile birleştiğinde ise bu atmosfer, dinleyiciyi adeta başka bir zamana taşımaktadır. Böylece dinleyici yalnızca bir şarkıyı dinlemenin yanında görsel olarak kurgulanmış bir hafıza alanının içine girmektedir. Bu bağlamda "post-nostalji" kavramı düşünülmesi gereken bir kavramdır. Post-nostalji, bireyin hiç deneyimlemediği bir geçmişe yönelik nostaljik bağ kurması olarak tanımlanabilir. Günümüzde genç dinleyicilerin büyük bir kısmı 1980'ler Japonya'sını yaşamamış olmasına rağmen, City Pop aracılığıyla bu döneme dair güçlü bir aidiyet hissi geliştirmektedir. Bu durum, nostaljinin artık yalnızca geçmişe ait bir duygu olmadığını, aynı zamanda kültürel üretim yoluyla inşa edilen bir deneyim olduğunu göstermektedir.

City Pop estetiği de bu yeniden üretim sürecinin önemli bir parçasıdır. Tasarımcılar, eski albüm kapaklarından, dergi illüstrasyonlarından ve reklam görsellerinden ilham alarak yeni dijital içerikler üretmektedir. Bu üretimler, hem geçmişe referans verir hem de günümüz izleyicisinin estetik beklentilerine uygun hale getirilir. Böylece ortaya hem tanıdık hem de yeni olan bir görsel dil çıkar. Nostalji ve bellek kavramları, City Pop estetiğinin anlaşılmasında merkezi bir rol oynamaktadır. Bu estetik, yalnızca geçmişe yönelik bir özlem değil; aynı zamanda dijital çağın koşulları içinde yeniden üretilen bir deneyimdir. Kolektif bellek, meta-modern duyarlılık ve post-nostaljik yaklaşımlar, bu deneyimin temel bileşenlerini oluşturur. Görsel ve işitsel unsurların birleşimi ise bu süreci daha etkili ve yoğun hale getirir. Bu bağlamda City Pop, yalnızca bir müzik türü değil, aynı zamanda çağdaş görsel kültürün önemli bir ifade biçimi olarak değerlendirilebilir.

4. JAPON CITY POP GÖRSEL ÖRNEKLERİ

20. yüzyılın başından günümüze moda kavramı çerçevesinde değişimleri onar yıllık periyotlara bölme şekli nostaljik bir şeyi tanımlarken kullanılan bir yaklaşımdır. Bu kapsamda City Pop görsel estetiği denilen tanımlama da 1970'lerin sonu ve 1980'lerin yaşam şekli, teknolojisi ve popüler kültürü ile bağlantılıdır. Kısacası o dönemlerin moda ve görsel açıdan içeriği ne ise Japon City Pop estetiğinin de kuralları aynı çerçevede düşünülebilir. City pop görsel estetiğinin farklı coğrafya ve kültürlerde yetişmiş insanları nostalji kapsamında cezbedici yanlarından birisi budur. Özellikle 1980'li yılların Amerikan dizileri, Japon çizgi filmleri yapımları görsel plastik bağlamda günümüzde kolektif bellekte yer etmiştir. Bu kapsamda 1970'lerin sonundan 1980'lerin sonuna kadar ki City pop müzik piyasasına ait albüm kapaklarının ve o dönemin illüstratörlerinin tasarımları günümüz dijital medyasında tekrar keşfedilmiştir. Bu kapsamda günümüzde metamodernizm kapsamında belirli sanatçıların üretimleri tekrar gündeme gelerek

bu türde çalışmalar üretilmektedir. Bu bağlamda görsel inceleme kapsamında 1970'lerin sonu ve 1980'lere ait City pop estetiğinin izlenebileceği bazı sanatçı ve çalışmalarından bahsetmek gerekmektedir. Minimal sanatın 20. yüzyılın son yarısında gündeme gelmesi ile batı sanatında grafik kökenli illüstratif çalışmalar artmıştır. Bu eserlerin veren sanatçıların başında David Hockney (9 Temmuz 1937 – 11 Haziran 2026) 1960'ların pop art hareketine önemli katkıda bulunmasıyla Hockney minimal sanatın en etkili İngiliz sanatçılarından biri olarak kabul edilir (Hockney, 2026). Hockney her zaman yenilik, teknoloji ve yeni yaratım yollarıyla yakından ilgilenir, fotoğrafın yanı sıra video, renkli fotokopi ve faks makinalarıyla da çalışır (Arınç, Aracagök, 2016:19). Hockney'in çalışmaları arasında Fotoğraf, baskı resim, sahne tasarımı, foto kolaj ve illüstrasyonlar bulunmaktadır. Bu çalışmaların genelinde sanatçı düz renkler, sade geometrik mekânlar göze çarpmaktadır. Hockney'in minimal çalışmalarına örnek olarak Japon ressam ve illüstratörlerden de bahsetmek gerekecektir.

City pop estetiğinin en büyük görsel temsilcilerinden birisi Hiroshi Nagai'dir. Plak kapakları tasarlayarak kariyerine başlayan Nagai, Kaliforniya sahillerinden ilham alan rüya sahnelerini net çizgiler ve canlı renklerle resmetmiş; bu özgün tarzı sayesinde 1980'ler Japonya'sında büyük bir popülerlik kazanmıştır (Russell, 2020). 1970'lerin başlarında Amerika Birleşik Devletleri'ni gezmiş ve çalışmaları için ilham kaynağını pasifikte bulmuştur. O dönemlerde Nagai, ülkenin zengin kentsel ve doğal manzaralarından, Amerikan ruhunun görsel iyimserliğinden ve her yerde bulunan reklamlarda görülen günlük görsel kültürden yararlanmıştır (Ohwada, Mizukawa, McNeill, 2020: 3). Bu imgeleri Japon estetiğinin perspektifi ile harmanlayıp eserler üretmiştir. Sanatçının boşluk kullanımı, sadelik duygusu ve mekânları geometrik bir düzen içinde kurgulaması dikkat çekicidir. Yaz mevsimini çağrıştıran mavi tonlar, yüzme havuzları, gün doğumu ve gün batımında tercih ettiği yumuşak renkler, uzakta beliren şehir siluetleri, deniz kıyısı temaları, palmiye ağaçları Nagai'nin, City Pop'un görsel sınırlarını belirleyen isimlerden biri hâline gelmesini sağlamıştır (Görsel 1).



Görsel 1. Hiroshi Nagai'nin illüstrasyonlarına örnekler. Erişim: 06.04.2026, Kaynak: https://sydney.jpf.go.jp/jpf/jpfmedia/JPF-HNCatalogue-R7-Issuu.pdf

Eizin Suzuki, Japon litografi ve sergirafi baskı ve illüstrasyon sanatçısıdır. Özellikle 1980'ler Japon popüler kültürüyle ilişkilendirilen city pop estetiğinin görsel dünyasını şekillendiren önemli isimlerden biridir. Parlak renkler, Nagai'ye göre daha renkli hareketli tropikal manzaralar ve modern şehir sahneleriyle tanınmaktadır. Çalışmaları genellikle yaz mevsiminin sıcak ve nostaljik atmosferini yansıtır. Suzuki, albüm kapakları ve reklam illüstrasyonlarıyla geniş kitlelere ulaşmış, Japonya'nın ekonomik refah döneminin görsel hafızasını oluşturmuştur.

Günümüzde eserleri, retro estetik ve nostalji arayışıyla yeniden popülerlik kazanmıştır (Görsel 2).



Görsel 2. Eizin Suzuki'nin illüstrasyonlarına örnekler. Erişim: 06.04.2026, Kaynak: https://wallpapercave.com/w/wp10588311

Seizo Watase üzerinden City Pop estetiğini ele almak, görsel kültür ile müzik arasında kurulan ilişkiyi anlamak açısından geçmişe ve güncele ait örnekler sunmaktadır. Watase, ürettiği görseller bu estetiğin temel bileşenleriyle güçlü bir paralellik göstermektedir. Bu bağlamda sanatçının üretimleri, 1980'li yılların görsel hafızasını şekillendiren önemli katkılar sunmuş; dolayısıyla City Pop estetiğine belirleyici bir katkıları bulunmaktadır. Seizo Watase'nin illüstrasyonlarında öne çıkan modern kent yaşamı, düzenli mimari yapılar ve dengeli boşluk kullanımı, City Pop estetiğinin idealize edilmiş şehir deneyimiyle örtüşmektedir. Geniş perspektifli kompozisyonlar, sınırlı figür kullanımı ve durağan sahneler, izleyicide hem dinginlik hem de mesafe duygusu uyandırır. Bu görsel dil, City Pop müziğinin sunduğu rahatlık, özgürlük ve hafif melankoliyle paralel bir estetik deneyim üretir. Özellikle yaz teması, sahil manzaraları, figürlerdeki batılı şekildeki yaşam tarzını parlak renk paleti ve Japon perspektifinden ele almaktadır. Güncel bağlamda da sanatçının çalışmaları, dijital kültür içinde yeniden dolaşıma girmiştir. Özellikle YouTube gibi platformlarda paylaşılan çeşitli City Pop albümlerinde ve yapay zekâ destekli müzik uyarlamalarında Watase'nin görsellerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu yeniden kullanım, görsellerin zamansal bağlamından koparak yeni bir estetik deneyim üretmesine olanak tanımaktadır. Aynı zamanda bu görseller, izleyicide güçlü bir nostaljik his uyandırmakta; geçmişe dair idealize edilmiş bir yaz atmosferini yeniden kurmaktadır (Görsel 3).



Görsel 3. Seizo Watase'nin çizimlerine ait örnekler. Erişim: 06.04.2026, https://www.tumblr.com/t1ooo/646360683083120640/seizo-watase

Japon şehirli müzik kültürünün en çok görsel bağlamda görünür olduğu 1980'li yıllarda, albüm kapak tasarımları bu estetiğin önemli taşıyıcıları hâline gelmiştir. Bu dönemde kullanılan illüstrasyonlar ve deniz temalı fotoğrafik kompozisyonlar, City Pop estetiğinin temel unsurlarını yansıtan güçlü görsel örnekler sunmaktadır. Özellikle sahil manzaraları, palmiye ağaçları, yüzme havuzları, gün batımı ışıkları ve modern mimari unsurlar, albüm kapaklarında sıkça tercih edilen imgeler arasında yer alır. Bu görseller, yalnızca müziğin ruhunu desteklemekle kalmaz; aynı zamanda dinleyiciye idealize edilmiş bir yaşam tarzı sunduğu düşünülebilir. Bu bağlamda Anri, Tatsuro Yamashita ve Toshiki Kadomatsu gibi sanatçıların albüm kapakları dikkat çekici örnekler arasında değerlendirilebilir. Söz konusu kapaklarda kullanılan görsel dil, yaz mevsiminin hafifliği, tatil hissi ve kentli bireyin boş zaman deneyimiyle doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla 1980'ler Japon müzik kültüründe albüm kapakları, yalnızca bir ambalaj unsuru olmasının yanında dönemin sosyo-kültürel atmosferini yansıtan ve City Pop estetiğini görsel olarak inşa eden önemli tasarım alanları olarak değerlendirilebilir (Görsel 4).



Görsel 4. Çeşitli albüm kapağı çalışmalarına örnekler. Erişim: 06.04.2026, https://cdn-images.dzcdn.net/images/cover/
https://insheepsclothinghifi.com/wordpress/wp-content/uploads/2021/01/sato_front.jpg
https://encrypted-tbn0.gstatic.com/ https://music.163.com/#/album?id=2707211

Örneklerde bahsi geçen sanatçıların eserlerinde ortak olarak görülen unsurlar şunlardır: minimalizm, düz renk yüzeyler, perspektifli şehir manzaraları, sahil imgeleri, otomobiller figürsüz mekânlardır. Bu görseller, izleyicide belirli sahneler canlandırır: gece şehirde araba sürmek, yaz tatilinde sahilde olmak, yalnız ama huzurlu bir an yaşamak. Bu imgeler, müzikle birleştiğinde güçlü bir atmosfer oluşturmaktadır. Günümüzde dijital ortamda yayımlanan City pop müziklerinde ya eski albüm kapakları kullanılmakta ya da City pop bir nostaljik estetik olarak güncel ortamda da yeniden üretilmektedir.

5. DİJİTAL ÜRETİMLERDE CİTY POP ESTETİĞİNİN YENİDEN ÜRETİMİ

Günümüzde City Pop estetiği, yalnızca tarihsel bir müzik ve görsel kültür unsuru olmaktan çıkarak, anonim üreticiler ve çevrimiçi platformlar aracılığıyla yeniden dolaşıma giren bir ifade biçimine dönüşmüştür. Çalışmada daha önce bahsedildiği üzere 1980'li yılların Japon kentli yaşamını idealize eden bu estetik, günümüzde özellikle YouTube, SoundCloud ve Bandcamp gibi dijital mecralarda üretilen ve paylaşılan içeriklerde yeniden görünür hâle gelmektedir. Bu platformlarda sıklıkla karşılaşılan "City Pop mix" videoları, çoğu zaman geçmişe ait albüm kapaklarını ya da bu kapaklardan esinlenen görselleri kullanarak nostaljik bir atmosfer yaratmaktadır. Anonim içerik üreticileri, telif sınırlarının muğlaklaştığı bu dijital ortamda, eski görselleri yeniden bağlamlandırarak müziğin sundu hissiyatı görsel estetik ile daha da derinleşmesini istemekte oldukları düşünülmektedir. Bu durum, City Pop'un yalnızca işitsel

değil, aynı zamanda görsel bir hafıza olarak da yeniden üretildiğini göstermektedir. Ayrıca güncel dijital üretimlerde teliften dolayı arşivsel klasikleşmiş görseller yerine, bu estetiğin yeniden yorumlandığı özgün tasarımlar da dikkat çekmektedir. Özellikle stok sitelerinde, Instagram ve Pinterest gibi görsel odaklı platformlarda, anonim ya da yarı anonim tasarımcılar tarafından üretilen illüstrasyonlar, City Pop estetiğinin çağdaş bir uzantısı olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmalarda yine yaz günleri, palmiye ağaçları, sahil şeritleri, yüzme havuzları ve neon ışıklı kent manzaraları gibi klasik öğeler korunurken; daha minimal, dijital araçlarla üretilmiş ve zaman zaman soyutlamaya yaklaşan kompozisyonlar da tercih edilmektedir (Görsel 5).



Görsel 5. Çeşitli City Pop estetiğine ait güncel dijital çalışmalar. Erişim: 06.04.2026, https://tr.pinterest.com/pin/19703317114137754/
https://i.pinimg.com/736x/cf/fa/5c/cffa5c855eee303f0783e8c5f9a8aeb7.jpg
https://tr.pinterest.com/pin/2674081024885607/,
https://tr.pinterest.com/pin/1618549863734434/

Ayrıca Vaporwave ve Synthwave gibi akımların etkisiyle, bu estetiğin daha yoğun bir retro-fütüristik atmosfer kazandığı da örnekler de bulunmaktadır. Bir müzik türü olmasının yanında görsel sanat akımı da olan vaporwave, 1970'lerden 1990'lara dek gözlenmiş olan tüketim çılgınlığını, parlak neon renkleri, neşeli reklam filmlerini ve dönemin müziğini vurgular ve över (Koçer, 2022:16). Bu bağlamda üretimler, geçmişin birebir temsili olmaktan ziyade, geçmişe dair kurgusal ve seçici bir yeniden inşa sürecini yansıttığı görülmektedir (Görsel 6).

Görsel 6. Çeşitli City Pop temalı futuristik ve 80'ler estetiği ile yapılmış güncel dijital çalışmalar. Erişim: 06.04.2026,



https://i.pinimg.com/736x/58/95/2b/58952b4a64ca8b1193bc8bae61d1e9bf.jpg
https://i.pinimg.com/736x/f8/ad/00/f8ad00009f556cbe851e88793ed1b4bb.jpg

Son yıllarda yapay zekâ destekli görsel üretim araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte City Pop estetiği yeni bir üretim alanı daha kazanmıştır. Özellikle Midjourney, DALL·E ve Stable Diffusion gibi sistemler aracılığıyla üretilen görseller, bu estetiğin algoritmik bir yeniden üretimine olanak tanımaktadır. Kullanıcılar tarafından girilen metin tabanlı komutlar (promptlar), 1980'ler Japon yazı, sahil ve kent yaşamını çağrıştıran imgeleri yeniden kurgulayarak, çoğu zaman gerçekte var olmamış ancak "tanıdık" hissettiren sahneler üretmektedir (Görsel 7). Bu durum, nostaljinin artık yalnızca geçmişe ait bir duygu olmaktan çıkıp, dijital araçlar aracılığıyla simüle edilebilen bir deneyime dönüştüğünü göstermektedir. Dolayısıyla City Pop estetiği, günümüzde hem anonim dijital üreticiler hem de yapay zekâ teknolojileri aracılığıyla sürekli yeniden şekillenen, nostaljik bir görsel kültür alanı olarak değerlendirilebilir.



Görsel 7. Yapay zekâ desteği ile prompt yazılarak üretilmiş çeşitli City Pop temalı dijital görseller.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

City Pop estetiği, 20. yüzyılın son çeyreğinde ortaya çıkan tarihsel bağlamından koparılarak, 21. yüzyıl dijital kültürü içerisinde görsel-müzikal etkileşim ekseninde post nostalji kapsamında nasıl yeniden üretildiği ve dönüştürüldüğü incelenmiştir. Elde edilen bulgular, City Pop'un günümüzdeki yeniden popülerliğinin yalnızca müzikal yapısına dayanmayıp, güçlü bir görsel estetikle birlikte sunulmasını açıkça ortaya koymaktadır. 1980'ler Japonya'sının kentli yaşam biçimini idealize eden görsel dil; sahil imgeleri, modern mimari, neon ışıklar ve yaz atmosferi gibi unsurlar aracılığıyla günümüz dijital üretimlerinde yeniden kurgulanmaktadır. Bu durum, nostaljinin yalnızca geçmişe ait bir hatırlama pratiği değil, aynı zamanda güncel kültürel üretim süreçleri içinde aktif olarak yeniden inşa edilen bir deneyim olduğunu göstermektedir.

Çalışmada incelenen Hiroshi Nagai, Eizin Suzuki ve Seizo Watase gibi sanatçıların üretimleri, City Pop estetiğinin görsel kodlarını belirleyen temel referans noktaları olarak değerlendirilmiştir. Bu sanatçıların eserlerinde gözlemlenen minimalizm, renk kullanımı, mekânsal kurgu ve atmosfer yaratma biçimleri, günümüz dijital üreticileri tarafından doğrudan ya da dolaylı olarak yeniden yorumlanmaktadır. Özellikle albüm kapakları ve illüstrasyonlar üzerinden kurulan bu görsel dil, müzik ile birlikte algılandığında çok katmanlı bir deneyim üretmektedir. Bu bağlamda City Pop, yalnızca bir müzik türü olmaktan çıkarak, görsel kültürün önemli bir bileşeni hâline gelmiştir. Dijital platformların bu süreçte oynadığı rol oldukça belirleyicidir. YouTube, Spotify ve Instagram gibi mecralar, hem müziğin hem de görsel estetiğin geniş kitlelere ulaşmasını sağlayarak City Pop'un küresel ölçekte yeniden keşfedilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu platformlarda üretilen içeriklerin önemli bir kısmı

anonim ya da yarı anonim üreticiler tarafından oluşturulmakta; bu durum ise estetik üretimin merkezsizleştiğini ve kolektif bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir. Aynı zamanda algoritmik öneri sistemleri, kullanıcıların bu içeriklerle karşılaşmasını kolaylaştırarak nostaljik estetiklerin yayılımını hızlandırmaktadır. Bununla birlikte, çalışmanın ortaya koyduğu önemli bir diğer sonuç, yapay zekâ destekli üretim araçlarının City Pop estetiğini yeni bir boyuta taşıdığıdır. Midjourney, DALL•E ve Stable Diffusion gibi teknolojiler aracılığıyla üretilen görseller, geçmişe ait estetik kodları yeniden yorumlayarak gerçekte var olmamış ancak tanıdık gelen sahneler yaratmaktadır. Bu durum, "post-nostalji" kavramını destekler nitelikte olup, bireylerin deneyimlemedikleri bir geçmişe yönelik duygusal bağ kurabildiklerini göstermektedir. Dolayısıyla nostalji, dijital çağda yalnızca hatırlanan değil, aynı zamanda simüle edilen ve yeniden tasarlanan bir olgu hâline gelmiştir.

Çalışmanın bulgularına dayanarak geleceğe yönelik bazı öneriler sunmak mümkündür. Öncelikle, City Pop estetiğinin dijital kültürdeki dönüşümünü daha kapsamlı biçimde inceleyebilmek için nicel veri analizleriyle desteklenen çalışmalar yapılabilir. Özellikle dijital platformlardaki kullanıcı davranışları, izlenme oranları ve algoritmik öneri sistemleri üzerinden gerçekleştirilecek analizler, bu estetiğin yayılım dinamiklerini daha somut sayısal verilerle ortaya koyabilir. İkinci olarak, yapay zekâ ile üretilen görsellerin psikolojik, estetik ve etik boyutları üzerine disiplinler arası çalışmalar geliştirilmelidir. Bu konu kapsamında (City Pop görselleri ve nostaji üretimi), özgünlük, telif hakları ve yaratıcı emeğin dönüşümü gibi konular daha detaylı ele alınabilir. Ayrıca Türkiye bağlamında City Pop estetiğinin nasıl alımlandığı ve yerel tasarım pratiklerine nasıl yansıdığı üzerine yapılacak çalışmalar, literatüre önemli katkılar sağlayacaktır. Yerel tasarımcıların bu estetiği nasıl yorumladıkları, hangi görsel kodları benimsedikleri ve bu üretimlerin küresel estetikle nasıl ilişki kurduğu, araştırılması gereken önemli konular arasında yer almaktadır. Son olarak, müzik ve görsel sanatlar arasındaki etkileşimi merkeze alan disiplinler arası çalışmaların artırılması, çağdaş dijital kültürün daha bütüncül bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Genel itibariyle City Pop estetiği, geçmiş ile bugün arasında kurulan bir köprü olmanın ötesinde, dijital çağın üretim ve tüketim dinamikleri içinde sürekli yeniden şekillenen bir görsel-müzikal deneyim alanı sunmaktadır. Bu estetik, hem bireysel hem de kolektif belleğin yeniden inşasında önemli bir rol oynamakta ve günümüz görsel kültürünün anlaşılması açısından zengin bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Adorno, W., T. (2013). Kültür Endüstrisi ve Kültür Yönetimi (Çev: M. Tüzel, N. Ünler, E. Gen). İstanbul: İletişim Yayınları.

Arınç, Z. ve Aracagök, Z. (2016). Rengin içinde yaşamak isteyen David Hockney. Istanbul Art News. 22, 18-19.

Ballam-Cross, P. (2021). Reconstructed Nostalgia. Journal of Popular Music Studies, 33 (1): 70-91. Doi: 10.1525/JPMS.2021.33.1.70

Chen, M. (2023). The Resurgence of City Pop and The Nostalgia Cycle: Impacts on The Music Industry and Modern Culture. Highlights in Business Economics and Management. 23, 1212-1216.

Koçer, B. (2022). Tüketici kapitalizm bağlamında vaporwave'in stil unsurlarının çözümlemesi. Eurasian Journal of Music and Dance, 20, 16-45. https://doi.org/10.31722/ejmd.1089959

P. Farias. (2014). On graphic memory as a strategy for design history. Blucher Design Proceedings Aralık 2014, No: 5, Volume 1 p. 201-206.

Nieland, S., Mahendran, K., Crafter, S. (2023). I'll never forget: Remembering of past events within the Silent Generation as a challenge to the political mobilisation of nostalgia. Sage Journal Culture and Psychology, 29 (1): 67-80. Doi: 10.1177/1354067X211066815

Ohwada, T., Mizukawa, H., McNeill, M. (2020). Hiroshi Nagai Paintings for Music. The Japan Foundation, Sydney.

Russell, S., A. (2020). "Dive into Japanese artist Hiroshi Nagai's pop art exhibition". Time Out Sydney. https://www.timeout.com/sydney/art/hiroshi-nagai-paintings-for-music (03.04.2024).

Sommet, M., & Kato, K. (2021). Japanese City Pop Abroad: Findings from an online music community survey. Fribourg.

Sopčić B., Musil, B. (2020). Escapism: suppression of self or its expansion? Mateja Matjašič Friš (Ed.), Studia Historica Slovenica, Humanities and Social Studies Review içinde. (s. 279-308). Maribor: Itagraf.

Sugiyama, S. ve Barile, N. (2025). Japanese City Pop and Gen Z in the US: happy, calm, and automated nostalgia, Continuum, 39:3, 425-438, DOI: 10.1080/10304312.2025.247107

Uchiyama, Y., Nasrudin Akhir, M., Furuoka, F., Wang Y. & Nikitina, L. (2024). Cultural re-importation through soft power and transnational cultural flows mediated by digital influence: the case of city pop music in Japan, Malaysia and Indonesia, Japan Forum, 36:5, 582-601, DOI: 10.1080/09555803.2024.2407774

Wikipedia (2026). David Hockney. https://en.wikipedia.org/wiki/David_Hockney Erişim Tarihi: 04.02.2026.

YETİŞKİNLERDE YAPILANDIRILMIŞ EGZERSİZ MÜDAHALELERİNİN DNA METİLASYONUNA DAYALI EPİGENETİK YAŞLANMA GÖSTERGELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Şener Mutlu
Bursa Uludağ Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Beden Eğitimi ve Spor Bölümü, Bursa, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-1711-6048

ÖZET

Amaç: Yetişkinlerde yapılandırılmış egzersiz müdahalelerinin DNA metilasyonuna dayalı epigenetik yaş ve yaşlanma hızı göstergeleri üzerindeki etkisini değerlendirmek; sonuçların saat, doku, müdahale ve klinik bağlama göre değişip değişmediğini incelemek.

Yöntem: PRISMA 2020 ile uyumlu sistematik derlemede PubMed, Scopus, Web of Science Core Collection ve SPORTDiscus tarandı. Yetişkinlerde en az iki hafta süren yapılandırılmış egzersizi egzersizsiz, olağan bakım veya aktif kontrolle karşılaştıran çalışmalar ana senteze alındı. Kayıtlar tek araştırmacı tarafından iki ayrı geçişte değerlendirildi. Randomize çalışmalar sonuç düzeyinde RoB 2 ile değerlendirildi; kontrolsüz ve çok bileşenli müdahaleler destekleyici sentezde tutuldu.

Bulgular: Dört veri tabanından 351 kayıt elde edildi; 146 yinelenen kayıt kaldırıldı ve 205 benzersiz kayıt tarandı. Başlık-özette 181 kayıt dışlandı; 24 tam metnin dördü gerekçesiyle dışlandı. Beş kontrollü rapor ana senteze, 15 rapor destekleyici senteze alındı. DO-HEALTH Bio-Age analizinde (Bischoff-Ferrari et al., 2025) 777 katılımcıda üç yıllık ev tipi kuvvet egzersizinin aktif esneklik kontrolüne kıyasla dört DNA metilasyonu saatinde tutarlı bağımsız yararı görülmedi. FORCE alt çalışmasında 147 katılımcının olağan bakım kolunda GrimAge hızlanması altı ayda 0,45 standart sapma (%95 GA 0,24–0,66) iken direnç egzersizi kolunda anlamlı hızlanma görülmedi. Diğer kontrollü pilotların örneklemleri küçüktü ve sonuçları tutarsızdı. Klinik ve yöntemsel heterojenlik nedeniyle meta-analiz yapılmadı; GRADE kesinliği çok düşük olarak değerlendirildi.

Sonuç: Mevcut kontrollü kanıt, yapılandırılmış egzersizin yetişkinlerde epigenetik yaşı genel olarak geriye çevirdiği sonucunu desteklememektedir. Kemoterapi gibi yüksek biyolojik stres koşullarında yaşlanma hızındaki artışı sınırlayan bir etki olasıdır, ancak bu sinyal doğrulayıcı denemeler gerektirir. Gelecek araştırmalar önceden kayıtlı saat sonuçları, yeterli örneklem, gerçek egzersizsiz kontrol, hücre bileşimi düzeltmesi ve dokuya uygun saatler kullanmalıdır.

Anahtar kelimeler: egzersiz; DNA metilasyonu; epigenetik saat; biyolojik yaş; GrimAge; DunedinPACE; sistematik derleme.

EFFECTS OF STRUCTURED EXERCISE INTERVENTIONS ON DNA METHYLATION-BASED EPIGENETIC AGING IN ADULTS

ABSTRACT

Objective: To evaluate the effects of structured exercise interventions on DNA methylation-based epigenetic age and pace-of-aging measures in adults, with attention to clock, tissue, intervention, and clinical context.

Methods: PubMed, Scopus, Web of Science Core Collection, and SPORTDiscus were searched. Adult studies of at least two weeks of structured exercise were eligible for the main controlled synthesis. One reviewer screened records in two separate passes. Randomized studies were assessed with RoB 2; uncontrolled and multicomponent interventions were retained as supportive evidence.

Results: Searches retrieved 351 records; 146 duplicates were removed, 205 unique records were screened, and 24 full texts were assessed. Five controlled and 15 supportive reports were included. DO-HEALTH found no consistent independent exercise benefit across four clocks. In FORCE, usual care showed a 0.45-SD GrimAge increase per six months (95% CI 0.24 to 0.66), whereas no significant acceleration occurred with resistance training. Smaller controlled studies were inconsistent. Meta-analysis was inappropriate and GRADE certainty was very low. Conclusion: Current controlled evidence does not establish that structured exercise generally reverses epigenetic age in adults. A protective effect under intense biological stress is plausible but remains unconfirmed.
Keywords: exercise; DNA methylation; epigenetic clock; biological age; GrimAge; DunedinPACE; systematic review.

GİRİŞ

Kronolojik yaş, yaşlanmanın süresini gösterir; aynı yaştaki bireyler arasındaki işlevsel ve hastalık riski farklarını açıklamakta yetersiz kalır. DNA metilasyonu saatleri, yaşla ilişkili CpG örüntülerini tek bir tahminde birleştirerek biyolojik yaş veya yaşlanma temposu hakkında bilgi üretir. Birinci kuşak saatler kronolojik yaşı kestirmeye, ikinci kuşak saatler mortalite ve klinik fenotiplerle ilişkili sinyalleri yakalamaya, DunedinPACE gibi ölçüler ise yaşlanma hızını tahmin etmeye odaklanır. Bu nedenle farklı saatler aynı biyolojik yapıyı ölçmez.

Egzersiz, kardiyorespiratuvar uygunluk, kas gücü, glisemik kontrol, inflamasyon ve mortalite üzerinde yararlı etkileri kanıtlanmış bir davranışsal müdahaledir. Bu etkilerin epigenetik yaş göstergelerine yansıması olasıdır. Yine de fiziksel aktivite ile daha genç epigenetik yaş arasındaki kesitsel ilişki, egzersizin saati değiştirdiğini kanıtlamaz. Sağlıklı kullanıcı yanlılığı, vücut bileşimi, sigara, ilaçlar, sosyoekonomik durum ve bağışıklık hücresi dağılımı hem aktiviteyi hem de metilasyon sonuçlarını etkileyebilir.

2026 tarihli bir sistematik derleme 44 fiziksel aktivite çalışmasının çoğunun kesitsel olduğunu bildirdi. Bir standart sapmalık daha yüksek fiziksel aktivite Horvath yaş hızlanmasında yaklaşık 0,03, GrimAge yaş hızlanmasında 0,09 standart sapmalık düşük değerle ilişkiliydi; Hannum ve PhenoAge için anlamlı ilişki görülmedi. Başka bir derleme, insan egzersiz çalışmalarında periferik kan DNA metilasyonunu inceleyen 29 çalışmayı anlatısal olarak sentezledi ve sonuç çeşitliliği nedeniyle meta-analiz yapmadı. Bu bulgular müdahale kanıtını, genel metilasyon değişikliklerini ve gözlemsel ilişkileri birbirinden ayıran daha dar bir değerlendirmeye ihtiyaç olduğunu gösterir.

Bu derlemenin amacı, yetişkinlerde yapılandırılmış egzersiz müdahalelerinin doğrulanmış DNA metilasyonu yaşlanma göstergeleri üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Ana soru, egzersizin kontrol koşuluna göre başlangıçtan takibe değişimi etkileyip etkilemediğidir. Saat, doku, popülasyon ve örnekleme zamanının bulguları değiştireceği önceden kabul edilmiştir.

YÖNTEM

2.1. Protokol ve raporlama

Protokol çalışma klasöründe zaman damgalı olarak oluşturuldu. Raporlama PRISMA 2020, protokol yapısı PRISMA-P ilkeleriyle uyumludur. Protokol ileriye dönük olarak PROSPERO veya OSF'ye kaydedilmedi; bu durum ve nihai arama sonrasında açıklığa kavuşturulan yöntem kararları sapma olarak belgelenmiştir.

2.2. Uygunluk ölçütleri

Popülasyon: Ortalama veya medyan yaşı en az 18 olan sağlıklı, risk altındaki veya klinik insan örneklemleri. Müdahale: En az iki hafta süren aerobik, direnç, yüksek yoğunluklu interval veya kombine yapılandırılmış egzersiz. Karşılaştırıcı: Egzersizsiz kontrol, olağan bakım, bekleme listesi, dikkat kontrolü veya aktif karşılaştırıcı. Sonuç: Doğrulanmış ya da hesaplama yöntemi

açıkça tanımlanmış DNA metilasyonu yaşı, yaş hızlanması veya yaşlanma temposu. Tasarım: Ana sentezde randomize ve randomize olmayan kontrollü müdahale; destekleyici sentezde kontrolsüz pre-post çalışma.

Yalnız diferansiyel CpG, global metilasyon, telomer, transkriptomik yaş veya doğrulanmamış özel skor bildiren çalışmalar dışlandı. Egzersizin diyet, takviye, uyku veya stres yönetiminden ayrılamadığı paket müdahaleler ana etki sentezine alınmadı.

2.3. Bilgi kaynakları ve arama

PubMed, Scopus, Web of Science Core Collection ve SPORTDiscus başlangıç tarihi veya dil filtresi uygulanmadan tarandı. Aramalar egzersiz, DNA metilasyonuna dayalı epigenetik saat ve müdahale tasarımı kavramlarını birleştirdi. PubMed'de 145, Scopus'ta 112, Web of Science'ta 73 ve SPORTDiscus'ta 21 olmak üzere toplam 351 kayıt dışa aktarıldı. Platforma özgü tam sorgular ve ham dışa aktarımlar çalışma kayıt dosyasında saklandı.

PubMed çekirdek sorgusu: (Exercise[Mesh] OR Exercise Therapy[Mesh] OR Resistance Training[Mesh] OR High-Intensity Interval Training[Mesh] OR exercis*[Title/Abstract] OR training[Title/Abstract] OR physical activity[Title/Abstract] OR aerobic*[Title/Abstract] OR resistance[Title/Abstract] OR HIIT[Title/Abstract]) AND (epigenetic clock*[Title/Abstract] OR epigenetic age[Title/Abstract] OR DNA methylation age[Title/Abstract] OR DNAm age[Title/Abstract] OR age acceleration[Title/Abstract] OR GrimAge[Title/Abstract] OR GrimAge2[Title/Abstract] OR PhenoAge[Title/Abstract] OR Horvath[Title/Abstract] OR Hannum[Title/Abstract] OR DunedinPACE[Title/Abstract] OR DunedinPoAm[Title/Abstract] OR FitAge[Title/Abstract] OR MEAT[Title/Abstract]) NOT (animals[mh] NOT humans[mh]).

2.4. Seçim, veri çıkarımı ve çalışma aileleri

Kayıtlar kanonik başlık ve mevcut bibliyografik kimlikler kullanılarak algoritmik olarak yinelenenlerden arındırıldı; olası kümeler elle kontrol edildi. Başlık-özet ve tam metin taraması tek araştırmacı tarafından, ilk karardan bağımsız ikinci bir geçişle yürütüldü. Her tam metin dışlaması için tek birincil gerekçe kaydedildi. Aynı katılımcıları kullanan yayınlar çalışma ailesi olarak bağlandı. Veri çıkarımı örneklem, müdahale dozu, karşılaştırıcı, doku, platform, saat, hücre bileşimi düzeltmesi, takip süresi, kayıp veri ve gruplar arası tahminleri kapsadı. Bağımsız ikinci değerlendirici bulunmaması seçilim ve sınıflandırma hatası riskini artıran bir sınırlılık olarak önceden kabul edildi.

2.5. Yanlılık riski ve sentez

Randomize çalışmalar sonuç bazında Cochrane RoB 2 ile değerlendirildi. Ana tahmin, gruplar arasındaki başlangıca göre değişim farkıdır. Aynı saat ve ölçekte ortalama fark, farklı ölçeklerde Hedges g planlandı. En az üç bağımsız, klinik ve yöntemsel olarak benzer karşılaştırma olmadıkça havuzlama yapılmaması kararlaştırıldı. Rastgele etkiler modeli için REML ve küçük örneklemde Hartung-Knapp güven aralığı öngörüldü. Saatler tek bir genel epigenetik gençleşme sonucunda birleştirilmedi.

ARAŞTIRMA VE BULGULAR

3.1. Arama durumu ve çalışma seçimi

Veri tabanlarından 351 kayıt belirlendi. Yinelenen 146 kayıt çıkarıldıktan sonra 205 başlık ve özet tarandı; 181 kayıt dışlandı. Tam metni değerlendirilen 24 raporun dördü dışlandı: ikisi özgün araştırma olmadığı, biri uygun egzersiz müdahalesi bulunmadığı ve biri geçerli DNA metilasyonu saati sonucu sunmadığı için. Beş kontrollü rapor ana senteze, 15 rapor destekleyici senteze alındı. Akış sayıları gerçek dışa aktarımlar ve tarama günlüğünden üretildi.

Tablo 1. PRISMA 2020 çalışma seçim akışı

PRISMA alanı	Sayı
Veri tabanlarından belirlenen kayıtlar	351
Yinelenen kayıtlar	146
Taranan benzersiz kayıtlar	205
Başlık-özette dışlanan	181
Tam metni değerlendirilen raporlar	24
Tam metinde dışlanan	4
Senteze alınan raporlar	20
Çalışma ailesi	19
Ana kontrollü sentez	5 rapor
Destekleyici sentez	15 rapor

3.2. Kontrollü çalışmaların özellikleri

Tablo 2. Kontrollü çalışmaların temel özellikleri ve sonuçları

Çalışma	Tasarım ve müdahale	Epigenetik sonuç ve yorum
DO-HEALTH Bio-Age (Bischoff-Ferrari et al., 2025)	Faktöriyel RCT alt analizi; n=777; ≥70 yaş; 3 yıl; ev tipi kuvvet; aktif esneklik kontrolü	Tam kan; PhenoAge, GrimAge, GrimAge2, DunedinPACE. Bağımsız egzersiz etkisi tutarlı biçimde yararlı değildi.
DAMA (Ermini et al., 2021)	2×2 faktöriyel RCT; n=219; postmenopozal kadınlar; 24 ay fiziksel aktivite müdahalesi	Tam kan; DNAmGrimAge. Saatte anlamlı egzersiz yararı görülmedi; epigenetik mutasyon yükü azaldı.
Moulton et al. (2024)	Pilot RCT; meme kanseri; n=23; 16 hafta çevrim içi gözetimli egzersiz	ELOVL2 tabanlı hedefli yaş skoru olumlu değişti; küçük örneklem ve gruplar arası tahmin eksikliği çıkarımı sınırlar.
Lukkahatai et al. (2023)	Ebeveyn RCT'nin seçilmiş alt çalışması; kanser sağ kalanları; tam veri n=10; ev temelli egzersiz	Tescilli DNAge ölçümünde gruplar arası anlamlı fark yok; ciddi seçilim ve eksik veri sorunu.
FORCE (Binder et al., 2026)	Kolon kanseri; randomize direnç egzersizi–olağan bakım; başlangıç n=171, takip n=147	Olağan bakımda GrimAge +0,45 SS/6 ay (%95 GA 0,24–0,66); direnç egzersizinde anlamlı hızlanma yok.

3.3. Kontrollü kanıtın sonuçları

DO-HEALTH, örneklem büyüklüğü ve takip süresi bakımından en güçlü çalışmaydı. Katılımcıların yaklaşık yüzde 70i programı haftada en az iki kez, yüzde 62si üç kez uyguladı. Kontrol koşulu da esneklik egzersizi içerdiği için tahmin, egzersize başlamanın etkisini değil kuvvet ile esneklik programlarının farkını ölçtü. Omega-3 ve üçlü kombinasyon için bildirilen küçük etkiler egzersizin bağımsız etkisi olarak kabul edilmedi.

FORCE çalışmasında (Binder et al., 2026) başlangıç epigenetik ölçümü bulunan 171 katılımcının 147'sinde takip ölçümü vardı; olağan bakım kolu 76, direnç egzersizi kolu 71 kişiden oluştu. Ortalama takip 4,6 aydı. Kemoterapi boyunca DunedinPACE altı ay başına 0,70 SS (%95 GA 0,41–0,98), GrimAge 0,29 SS (%95 GA 0,13–0,46; özgün ölçekte yaklaşık 1,2 yıl) arttı. Olağan bakımda GrimAge hızlanması 0,45 SS (%95 GA 0,24–0,66; yaklaşık 1,84 yıl) iken direnç egzersizi kolunda anlamlı hızlanma görülmedi. Modeller randomizasyon tabakaları,

kan alma zamanı, yaş, cinsiyet ve DNA metilasyonundan tahmin edilen hücre bileşimi için ayarlandı. Bununla birlikte sonuç saat-özgü ikincil bir biyobelirteç bulgusudur ve klinik yarar kanıtı değildir.

Moulton ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında egzersiz grubunda ELOVL2 tabanlı tahmini yaş azaldı. Bununla birlikte yalnız 23 katılımcı vardı; eş zamanlı kanser tedavileri heterojendi; kullanılan algoritma tescilliydi ve temel çıkarım açık bir grup ile zaman etkileşimi yerine grup içi testlere dayanıyordu. Bu sonuç genom çapında çoklu CpG saatleriyle havuzlanmadı.

3.4. Destekleyici kontrolsüz kanıt

Tablo 3. Destekleyici çalışmaların yapılandırılmış anlatısal özeti

Çalışma	Bağlam	Sonuç ve sınırlılık
Van Damme et al. (2026)	6 ay bisiklet; kontrolsüz	GrimAge beklenen eğilime göre 7,44 ay azaldı; hücre bileşimine duyarlı.
Heikkinen et al. (2026)	4–6 hafta HIIT; kas; kontrolsüz kohortlar	PCGrimAge bir kohortta azaldı; DunedinPACE iki kohortta arttı.
da Silva Rodrigues et al. (2023)	8 hafta; sedanter kadınlar; kontrolsüz	DNAm yaşında yaklaşık iki yıllık azalma bildirildi.
Dawangpa et al. (2024)	14 hafta kombine egzersiz; obez yaşlı kadınlar; kontrolsüz	Genel DNAm yaşında anlamlı değişim yok.
Olaso-Gonzalez et al. (2026)	6 ay egzersiz+beslenme; randomize; DNAm tam veri n=24	PhenoAge lehine değişim; diğer saatler anlamsız ve eksik veri yüksek.
Fitzgerald et al. (2021)	8 hafta çok bileşenli yaşam tarzı; pilot RCT/olgu serisi	Olumlu Horvath değişimleri; egzersiz etkisi diğer bileşenlerden ayrılamaz.
RAPA-EX-01	Her iki kol egzersiz; sirolimus–plasebo RCT	Randomizasyon egzersize değil ilaca yapıldığı için egzersiz etkisi tahmin edilemez.
Fitzgerald et al. (2023)	8 haftalık çok bileşenli yaşam tarzı; kadınlarda olgu serisi; n=6	Ortalama DNAm yaşında azalma bildirildi; kontrol yok ve egzersiz etkisi ayrılamaz.
Loh et al. (2023)	Myeloid maligniteli yaşlılarda 8–12 hafta egzersiz; tek kollu; n=20	GrimAge, PhenoAge ve DunedinPACE ölçümleri belirgin değişmedi.
Nishimura et al. (2026)	Egzersiz, diyet rehberliği ve B. longum yoğurdu; keşifsel RCT	Kısa dönem saat değişimleri tutarlı değildi; egzersiz etkisi diğer bileşenlerden ayrılamaz.
Rosko et al. (2021)	Hematolojik maligniteli yaşlılarda gözetimli egzersiz; kontrolsüz	Seçilmiş küçük DNAm alt örnekleminde mPhenoAge değişimi keşifseldir.
da Silva Rodrigues et al. (2026)	14 hafta kombine egzersiz; aynı Kore çalışma ailesi	Başlangıç zindeliğine göre farklılıklar; kontrolsüz tasarım nedensel çıkarımı engeller.
Sinke et al. (2025)	GOTO; 13 hafta diyet ve fiziksel aktivite; çoklu doku	GrimAge ve dokuya özgü metilasyon değişimleri; kontrol yok ve egzersiz etkisi ayrılamaz.
Rigamonti et al. (2022)	Üç haftalık diyet ve egzersiz içeren kilo azaltma programı; n=72	Genel örneklemde DNAm yaşı değişmedi; başlangıçta hızlanmış alt gruptaki azalma regresyona açıktır.
Yaskolka Meir et al. (2021)	CENTRAL MRI; 18 aylık yaşam tarzı müdahalesi; epigenetik alt örneklem n=120	Müdahale grupları arasında mAge farkı yok; egzersize özgü etki tahmin edilmedi.

3.5. Çok bileşenli müdahaleler ve dışlanan yakın kanıt

Frail yaşlılarda altı aylık egzersiz ve beslenme müdahalesi PhenoAge için olumlu değişim bildirdi, ancak iki bileşenin etkisi ayrılamadı; diğer saatler anlamlı değildi. Fitzgerald ve arkadaşlarının diyet, uyku, egzersiz, gevşeme ve takviye paketinde de egzersizin bağımsız katkısı belirlenemedi. Demansta Otago egzersiz çalışması yalnız global DNA metilasyonu

ölçtüğü, Voisin ve arkadaşları doğrulanmış yaş saati yerine yaşla ilişkili CpG ve transkriptom örüntülerini değerlendirdiği için etkililik sentezinden dışlandı.

3.6. Yanlılık riski

Tablo 4. Kontrollü çalışmalar için RoB 2 genel yargıları

Çalışma	RoB 2 genel yargı	Başlıca gerekçe
DO-HEALTH	Bazı kaygılar	Post hoc biyobelirteç alt analizi ve çoklu sonuçlar
DAMA	Bazı kaygılar	İkincil epigenetik analiz; uyum ve önceden belirleme sınırlı
Moulton et al.	Yüksek	Çok küçük örneklem, grup içi vurgu ve tescilli hedefli saat
Lukkahatai et al.	Yüksek	Yalnız tam veri bulunan 10 kişinin seçilmesi
FORCE	Bazı kaygılar	İkincil biyobelirteç analizi ve 171'den 147'ye takip

3.7. Meta-analiz ve kanıt kesinliği

Kontrollü çalışmalar aynı tahmini ölçmedi. Biri sağlıklı yaşlılarda kuvvet ile esneklik karşılaştırması, biri kemoterapi sırasında direnç egzersizi ile olağan bakım karşılaştırması, biri ise meme kanserinde tek lokuslu özel saat kullanan pilot çalışmaydı. Saat, popülasyon, müdahale süresi, kontrol koşulu ve raporlama biçimi bakımından klinik ve istatistiksel havuzlama savunulabilir değildi. Bu nedenle toplam etki üretilmedi; yayın yanlılığı testi uygulanmadı. Sonuç bazında GRADE kesinliği, ciddi yanlılık riski, dolaylılık ve kesinlik sorunu nedeniyle çok düşük olarak değerlendirildi.

Tablo 5. GRADE kanıt profili

Sonuç	Kesinlik	Düşürme gerekçeleri
Yapılandırılmış egzersizin DNAm yaşlanma saatlerine etkisi	Çok düşük	Ciddi yanlılık riski, tutarsızlık, dolaylılık ve kesin olmama

TARTIŞMA

4.1. Temel bulgular

Beş kontrollü rapor, egzersizin yetişkinlerde epigenetik yaşı genel olarak geriye çevirdiğini göstermedi. En büyük ve en uzun randomize veri setinde bağımsız kuvvet egzersizi sinyali belirgin değildi. Olumlu bulgular klinik tedavi bağlamında veya küçük pilot çalışmalarda ortaya çıktı. Bu örüntü, egzersizin sağlıklı bireylerde kronolojik yaşa göre hesaplanan saatleri düşürmesinden çok, yoğun biyolojik stres altında olumsuz hızlanmayı sınırlayabileceği hipoteziyle uyumludur. Ancak bu hipotez henüz doğrulanmış değildir.

4.2. Saat seçimi neden sonucu değiştirir?

Horvath ve Hannum saatleri kronolojik yaşı kestirmede başarılı olsa da kısa süreli bir davranış müdahalesine duyarlı olmak üzere geliştirilmedi. PhenoAge ve GrimAge klinik fenotipleri, plazma proteinlerini ve sigara maruziyetini temsil eden metilasyon bileşenleri içerir. DunedinPACE ise yaşlanma temposunu ölçmeye çalışır. Bir saatte değişim olmaması, egzersizin biyolojik etkisizliğini; değişim görülmesi de doğrudan gençleşmeyi kanıtlamaz. Sonucun yorumlanması saatin geliştirme amacı ve doğrulama alanıyla sınırlı olmalıdır.

4.3. Doku ve hücre bileşimi

Kan saatleri bağışıklık hücresi dağılımından etkilenebilir. Egzersiz nötrofil, lenfosit ve diğer hücre oranlarını kısa ve uzun vadede değiştirebilir. Van Damme çalışmasında GrimAge değişiminin hücre bileşimiyle R^2=0,74 düzeyinde ilişkili olması bu sorunu nicel olarak gösterir.

İskelet kasında kan için geliştirilen bir saatin kullanılması da doku uyumsuzluğu yaratır. HIIT sonrasında DunedinPACE artışı, hızlanmış organizma yaşlanmasından çok kas yenilenmesi, inflamasyon veya örnekleme zamanını yansıtabilir.

4.4. Klinik ve sağlıklı popülasyonlar

Kemoterapi metabolik, inflamatuvar ve hematolojik bir stres oluşturur. FORCE bulgusu bu dönemde direnç egzersizinin GrimAge artışını sınırlayabileceğini düşündürür. Böyle bir etki, sağlıklı yetişkinde mutlak epigenetik yaş düşüşünden farklı bir klinik tahmindir. Sağlıklı, kanser tedavisi gören, frail ve HIV ile yaşayan örneklemlerin tek bir havuzda birleştirilmesi biyolojik olarak yanıltıcı olur.

4.5. Önceki derlemelerle karşılaştırma

Shan ve arkadaşlarının (2026) gözlemsel ağırlıklı sentezinde fiziksel aktivite ile Horvath ve GrimAge hızlanması arasında küçük ters ilişkiler bulunmuştur. Bu ilişkiler nedensel egzersiz etkisinden daha güçlü görünebilir, çünkü fiziksel aktivitesi yüksek bireyler birçok sağlık belirleyicisi bakımından farklıdır. Yang ve arkadaşlarının (2026) genel periferik kan metilasyonu derlemesi ise çalışma sonuçlarının havuzlanamayacak kadar çeşitli olduğunu bildirmiştir. Mevcut dar soru, aynı sorunun saat düzeyinde de sürdüğünü ve kontrollü kanıtın gözlemsel literatürden daha temkinli yorum gerektirdiğini gösterir.

4.6. Metodolojik öneriler

Gelecek denemeler epigenetik saati önceden kayıtlı bir sonuç olarak tanımlamalı ve tek bir birincil saat belirlemelidir. Örneklem büyüklüğü, beklenen gruplar arası değişim ve çoklu test planına göre hesaplanmalıdır. Egzersiz dozu nesnel olarak izlenmeli; kontrol grubundaki fiziksel aktivite ölçülmeli; kan örnekleri günün aynı saatinde, son egzersiz seansından standart bir süre sonra alınmalıdır. Hücre bileşimi ölçülmeli veya güvenilir biçimde tahmin edilmeli, analiz hem düzeltilmiş hem duyarlılık biçiminde sunulmalıdır. Sonuçlar grup içi anlamlılığa göre değil, başlangıca göre ayarlanmış gruplar arası tahmin ve güven aralığıyla raporlanmalıdır.

4.7. Güçlü yönler ve sınırlılıklar

Derleme, yapılandırılmış müdahaleyi gözlemsel fiziksel aktiviteden; doğrulanmış saatleri genel metilasyon sonuçlarından; bağımsız egzersiz etkisini çok bileşenli paketlerden ayırdı. Aynı çalışma ailesinden gelen yayınların bağımsız sayılmaması ve aktif kontrolün doğru adlandırılması da aşırı yorumu azalttı.

En önemli sınırlılık, başlık-özet, tam metin, veri çıkarımı ve RoB 2 değerlendirmelerinin bağımsız ikinci değerlendirici olmaksızın tek araştırmacı tarafından yürütülmesidir; iki geçişli süreç bu riski azaltmayı amaçlasa da ortadan kaldırmaz. Yalnız dört veri tabanı taranmış, gri literatür ve çalışma kayıtları ayrı bir resmi aramaya dâhil edilmemiştir. Dahil edilen çalışmaların çoğu küçük, ikincil veya post hoc biyobelirteç analizleridir; saatler, dokular, müdahaleler ve popülasyonlar heterojendir. Bu nedenle meta-analiz ve yayın yanlılığı testi uygulanamamış, kanıt kesinliği çok düşük bulunmuştur.

SONUÇ

Mevcut kontrollü kanıt, yapılandırılmış egzersizin yetişkinlerde DNA metilasyonuna dayalı epigenetik yaşı genel ve klinik olarak anlamlı ölçüde geriye çevirdiği iddiasını desteklememektedir. Sağlıklı yaşlılarda uzun süreli kuvvet egzersizi aktif esneklik kontrolünden üstün görünmezken, kemoterapi sırasında direnç egzersizi GrimAge hızlanmasını sınırlamış olabilir. Bu ikinci bulgu umut vericidir, ancak kayıt dışı yardımcı analiz ve çoklu sonuç yapısı nedeniyle doğrulanmalıdır. Epigenetik saatler egzersizin yerleşik klinik yararlarının yerine geçecek bir sonlanım değil, dikkatle yorumlanması gereken deneysel biyobelirteçlerdir.

BEYANLAR

Protokol kaydı: Protokol çalışma dosyasında zaman damgalı olarak oluşturulmuş, ancak PROSPERO veya OSF'ye ileriye dönük kaydedilmemiştir. Bu sapma ve sonradan yapılan yöntem açıklamaları şeffaf biçimde raporlanmıştır.

Etik onay: Bu çalışma yayımlanmış verileri sentezlediği için yeni katılımcı onayı gerektirmez.

Finansman: Bu çalışma herhangi bir kurum veya kuruluştan finansal destek almamıştır.

Çıkar çatışması: Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Yazar katkıları: Şener Mutlu; kavramsallaştırma, metodoloji, veri toplama, kayıt tarama, veri çıkarımı, biçimsel analiz, görselleştirme, ilk taslağın yazımı, eleştirel gözden geçirme ve son sürümün onaylanması.

Veri kullanılabilirliği: Veri tabanı sorguları, ham dışa aktarımlar, tarama kararları, veri çıkarım tabloları, RoB 2, GRADE ve PRISMA sayıları çalışma eklerinde sunulmuştur. Telif hakkıyla korunan tam metinler paylaşılmamıştır

KAYNAKÇA

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Horvath, S. (2013). DNA methylation age of human tissues and cell types. Genome Biology, 14(10), R115. https://doi.org/10.1186/gb-2013-14-10-r115

Hannum, G., Guinney, J., Zhao, L., Zhang, L., Hughes, G., Sadda, S., Klotzle, B., Bibikova, M., Fan, J.-B., Gao, Y., Deconde, R., Chen, M., Rajapakse, I., Friend, S., Ideker, T., & Zhang, K. (2013). Genome-wide methylation profiles reveal quantitative views of human aging rates. Molecular Cell, 49(2), 359–367. https://doi.org/10.1016/j.molcel.2012.10.016

Levine, M. E., Lu, A. T., Quach, A., Chen, B. H., Assimes, T. L., Bandinelli, S., Hou, L., Baccarelli, A. A., Stewart, J. D., Li, Y., Whitsel, E. A., Wilson, J. G., Reiner, A. P., Aviv, A., Lohman, K., Liu, Y., Ferrucci, L., & Horvath, S. (2018). An epigenetic biomarker of aging for lifespan and healthspan. Aging, 10(4), 573–591. https://doi.org/10.18632/aging.101414

Lu, A. T., Quach, A., Wilson, J. G., Reiner, A. P., Aviv, A., Raj, K., Hou, L., Baccarelli, A. A., Li, Y., Stewart, J. D., Whitsel, E. A., Assimes, T. L., Ferrucci, L., & Horvath, S. (2019). DNA methylation GrimAge strongly predicts lifespan and healthspan. Aging, 11(2), 303–327. https://doi.org/10.18632/aging.101684

Belsky, D. W., Caspi, A., Arseneault, L., Baccarelli, A., Corcoran, D. L., Gao, X., Hannon, E., Harrington, H. L., Rasmussen, L. J., Houts, R., Huffman, K., Kraus, W. E., Kwon, D., Mill, J., Pieper, C. F., Prinz, J. A., Poulton, R., Schwartz, J., Sugden, K., et al. (2020). Quantification of the pace of biological aging in humans through a blood test, the DunedinPoAm DNA methylation algorithm. eLife, 9, e54870. https://doi.org/10.7554/eLife.54870

Bischoff-Ferrari, H. A., Gängler, S., Wieczorek, M., Belsky, D. W., Ryan, J., Kressig, R. W., Stähelin, H. B., Theiler, R., Dawson-Hughes, B., Rizzoli, R., Vellas, B., Rouch, L., Guyonnet, S., Egli, A., Orav, E. J., Willett, W., & Horvath, S. (2025). Individual and additive effects of vitamin D, omega-3 and exercise on DNA methylation clocks of biological aging in older adults from the DO-HEALTH trial. Nature Aging, 5(3), 376–385. https://doi.org/10.1038/s43587-024-00793-y

Binder, A. M., Weltzien, E., Cespedes Feliciano, E. M., Brown, J. C., Lee, C., Ross, M., Campbell, K. L., Castillo, A., Pena Perez, A., Meyerhardt, J. A., Schmitz, K. H., & Caan, B. J. (2026). Epigenetic aging during adjuvant chemotherapy for colon cancer and modification by a resistance training intervention. JNCI: Journal of the National Cancer Institute. https://doi.org/10.1093/jnci/djag226

Moulton, C., Grazioli, E., Ibáñez-Cabellos, J. S., Murri, A., Cerulli, C., Silvestri, M., Caporossi, D., Pallardó, F. V., García-Giménez, J. L., Magno, S., Rossi, C., Duranti, G., Mena-Molla, S., Parisi, A., & Dimauro, I. (2024). Physical activity and epigenetic aging in breast cancer treatment. International Journal of Molecular Sciences, 25(16), 8596. https://doi.org/10.3390/ijms25168596

Van Damme, M., Stegen, S., Steenwinckel, B., Schroé, H., Reyes del Paso, G. A., Pulopulos, M. M., De Raedt, R., Vanderhasselt, M.-A., Derave, W., Ongenae, F., Boone, J., Van Criekinge, W., Rietzschel, E. R., & De Meyer, T. (2026). Epigenetic age deceleration reflects exercise-induced cardiorespiratory fitness improvements. GeroScience. https://doi.org/10.1007/s11357-025-02076-9

Heikkinen, A., Uusitalo-Kylmälä, L., Blom, I., Helge, J. W., Gillberg, L., Seaborne, R., Larsen, S., Jacques, M., Grolaux, R., Aaltonen, S., Kaprio, J., van der Kolk, B. W., Heinonen, S., Eynon, N., Pietiläinen, K. H., Kivelä, R., Pirinen, E., & Ollikainen, M. (2026). The divergent effects of nicotinamide riboside and high-intensity exercise training on skeletal muscle epigenetic aging. Aging Cell, 25(8), e70638. https://doi.org/10.1111/acel.70638

da Silva Rodrigues, G., Noma, I. H. Y., Noronha, N. Y., Watanabe, L. M., da Silva Sobrinho, A. C., de Lima, J. G. R., Sae-Lee, C., Benjamim, C. J. R., Nonino, C. B., & Bueno, C. R. (2023). Eight weeks of physical training decreases 2 years of DNA methylation age of sedentary women. Research Quarterly for Exercise and Sport, 95(2), 405–415. https://doi.org/10.1080/02701367.2023.2228388

Dawangpa, A., Chitta, P., Rodrigues, G. d. S., Iadsee, N., Noronha, N. Y., Nonino, C. B., Bueno Júnior, C. R., & Sae-Lee, C. (2024). Impact of combined exercise on blood DNA methylation and physical health in older women with obesity. PLOS ONE, 19(12), e0315250. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315250

Jankowski, C. M., Konigsberg, I. R., Wilson, M. P., Sun, J., et al. (2024). Skeletal muscle DNA methylation: Effects of exercise and HIV. Aging Cell, 23(1), e14025. https://doi.org/10.1111/acel.14025

Olaso-Gonzalez, G., Millan-Domingo, F., Garcia-Fernandez, L., Garcia-Tercero, E., Cebrian, M., Garcia-Dominguez, C., Carbonell, J. A., Casabo-Valles, G., Garcia-Gimenez, J. L., Tamayo-Torres, E., Gambini, J., Tarazona-Santabalbina, F. J., Vina, J., & Gomez-Cabrera, M. C. (2026). A multidomain lifestyle intervention is associated with improved functional trajectories and favorable changes in epigenetic aging markers in frail older adults: A randomized controlled trial. Aging Cell, 25(2), e70376. https://doi.org/10.1111/acel.70376

Jehu, D. A., Hanson, M., Huang, Y., Soares, A., Patel, C., Hergott, C., Waller, J. L., Young, L., Hall, W., Robinson-Johnson, D., Allen, C., Sams, R., Carrick, R. M., Fulzele, S., Hamrick, M., Zhu, H., & Dong, Y. (2026). Preliminary effects of a modified Otago Exercise Program on metabolic, cellular, and epigenetic biomarkers in people living with dementia: A pilot

randomized controlled trial. Molecular and Cellular Neuroscience, 137, 104077. https://doi.org/10.1016/j.mcn.2026.104077

Voisin, S., Seale, K., Jacques, M., Landen, S., Harvey, N. R., Haupt, L. M., Griffiths, L. R., Ashton, K. J., Coffey, V. G., Thompson, J.-L. M., Doering, T. M., Lindholm, M. E., Walsh, C., Davison, G., Irwin, R., McBride, C., Hansson, O., Asplund, O., Heikkinen, A. E., et al. (2023). Exercise is associated with younger methylome and transcriptome profiles in human skeletal muscle. Aging Cell, 23(1), e13859. https://doi.org/10.1111/acel.13859

Shan, J., Tay, J. H., Wang, W., Tan, R., Joshi, R., Maier, A. B., & Feng, L. (2026). Physical activity and biological age measured by DNA methylation clocks: A systematic review and meta-analysis. The Lancet Healthy Longevity, 7(4), 100835. https://doi.org/10.1016/j.lanhl.2026.100835

Yang, Y., Zhu, F., & Chen, A. (2026). Effects of exercise on peripheral blood DNA methylation and related epigenetic markers: A systematic review of human trials. Clinical Epigenetics, 18(1), 123. https://doi.org/10.1186/s13148-026-02123-y

Fiorito, G., Caini, S., Palli, D., Bendinelli, B., Saieva, C., Ermini, I., Valentini, V., Assedi, M., Rizzolo, P., Ambrogetti, D., Ottini, L., & Masala, G. (2021). DNA methylation-based biomarkers of aging were slowed down in a two-year diet and physical activity intervention trial: The DAMA study. Aging Cell, 20(10), e13439. https://doi.org/10.1111/acel.13439

Lukkahatai, N., Park, J., Jia, H. M., Martin, D., Li, J., Sheng, J. Y.-S., Gill, J., Saligan, L. N., Stearns, V., & Carducci, M. (2023). Feasibility of DNA methylation age as a biomarker of symptoms and resilience among cancer survivors with multiple chronic conditions. Biomedicines, 11(11), 3076. https://doi.org/10.3390/biomedicines11113076

Fitzgerald, K. N., Hodges, R., Hanes, D., Stack, E., Cheishvili, D., Szyf, M., Henkel, J., Twedt, M. W., Giannopoulou, D., Herdell, J., Logan, S., & Bradley, R. (2021). Potential reversal of epigenetic age using a diet and lifestyle intervention: A pilot randomized clinical trial. Aging, 13(7), 9419–9432. https://doi.org/10.18632/aging.202913

Fitzgerald, K. N., Campbell, T., Makarem, S., & Hodges, R. (2023). Potential reversal of biological age in women following an 8-week methylation-supportive diet and lifestyle program: A case series. Aging, 15(6), 1833–1839. https://doi.org/10.18632/aging.204602

Loh, K. P., Sanapala, C., Jensen-Battaglia, M., Rana, A., Sohn, M. B., Watson, E., Gilmore, N., Klepin, H. D., Mendler, J. H., Liesveld, J., Huselton, E., LoCastro, M., Susiarjo, M., Netherby-Winslow, C., Williams, A. M., Mustian, K., Vertino, P., & Janelsins, M. C. (2023). Exercise and epigenetic ages in older adults with myeloid malignancies. European Journal of Medical Research, 28(1), 180. https://doi.org/10.1186/s40001-023-01145-z

Nishimura, T., Horigome, A., Tanaka, M., Hishida, Y., & Odamaki, T. (2026). Short-term responsiveness of DNA methylation-based aging biomarkers to a multimodal intervention comprising exercise and dietary guidance involving daily consumption of yogurt containing Bifidobacterium longum BB536: An exploratory randomized controlled trial. Aging, 18(1), 639–655. https://doi.org/10.18632/aging.206386

Rosko, A. E., Wall, S., Baiocchi, R., Benson, D. M., Brammer, J. E., Byrd, J. C., Efebera, Y. A., Maddocks, K., Rogers, K. A., Jones, D., Sucheston-Campbell, L., Tang, H., Ozer, H. G., Huang, Y., Burd, C. E., & Naughton, M. J. (2021). Aging phenotypes and restoring functional deficits in older adults with hematologic malignancy. Journal of the National Comprehensive Cancer Network, 19(9), 1027–1036. https://doi.org/10.6004/jnccn.2020.7686

da Silva Rodrigues, G., Yumi Noronha, N., Ribeiro de Lima, J. G., Sae-Lee, C., Chitta, P., da Silva Sobrinho, A. C., Harumi Yonehara Noma, I., Maria Diani, L., Barbosa Júnior, F., Barbosa Nonino, C., Moriguchi Watanabe, L., & Roberto Bueno Júnior, C. (2026). Impact of 14 weeks

combined exercise on serum cadmium levels, DNA methylation, and epigenetic aging in older women. Epigenomics, 18(5), 575–589. https://doi.org/10.1080/17501911.2026.2672104

Sinke, L., Beekman, M., Raz, Y., Gehrmann, T., Moustakas, I., Boulinguiez, A., Lakenberg, N., Suchiman, E., Bogaards, F. A., Bizzarri, D., van den Akker, E. B., Waldenberger, M., Butler-Browne, G., Trollet, C., de Groot, C. P. G. M., Heijmans, B. T., & Slagboom, P. E. (2025). Tissue-specific methylomic responses to a lifestyle intervention in older adults associate with metabolic and physiological health improvements. Aging Cell, 24(4), e14431. https://doi.org/10.1111/acel.14431

Rigamonti, A. E., Bollati, V., Favero, C., Albetti, B., Caroli, D., Abbruzzese, L., Cella, S. G., & Sartorio, A. (2022). Effect of a 3-week multidisciplinary body weight reduction program on the epigenetic age acceleration in obese adults. Journal of Clinical Medicine, 11(16), 4677. https://doi.org/10.3390/jcm11164677

Yaskolka Meir, A., Keller, M., Bernhart, S. H., Rinott, E., Tsaban, G., Zelicha, H., Kaplan, A., Schwarzfuchs, D., Shelef, I., Gepner, Y., Li, J., Lin, Y., Blüher, M., Ceglarek, U., Stumvoll, M., Stadler, P. F., Stampfer, M. J., Kovacs, P., Liang, L., & Shai, I. (2021). Lifestyle weight-loss intervention may attenuate methylation aging: The CENTRAL MRI randomized controlled trial. Clinical Epigenetics, 13(1), 48. https://doi.org/10.1186/s13148-021-01038-0

ORGANİK MADDE İLE TOPRAK SU TUTMA KAPASİTESİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Korkmaz BELLİTÜRK
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Süleymanpaşa-Tekirdağ/Türkiye,
ORCİD: 0000-0003-4944-3497
Cihan DEMİR
Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kırklareli, TÜRKİYE
Mehmet Fırat BARAN
Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği, Siirt/Türkiye.
ORCİD: 0000-0002-7657-1227

Özet
Bir toprağın ne kadar canlı, verimli, kaliteli ve sürdürülebilir olduğunu belirleyen en temel göstergelerden biri içindeki organik madde düzeyidir. Son yıllarda toprak analizleri ile ortaya çıkan acı bir gerçek, sahip olunan tarım topraklarının organik madde düzeylerinin çok düşük olması ve bu toprakların suyu tutma kapasitelerinin yetersizliğidir. Bu sonuç, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini olumsuz etkilemekle birlikte, üretilen ürünlerin kalite ve miktarlarında önemli düzeylerde düşüşlere neden olmaktadır. Bu problemin çözümü mümkün olup, bunun ilk adımını toprakların organik madde düzeylerini artırma çalışmaları oluşturmaktadır. Organik maddece yeterli düzeye gelen toprakların, zamanla su tutma kapasitelerinde de önemli düzeylerde artışlar gözlemlenmektedir.
Türkiye tarım topraklarının düşük organik madde içerenlerinin (<%1) oranının son yapılan çalışmalar neticesinde %80'e vardığı bildirilmektedir. Bu problemin acilen çözülmesi gerekmektedir. Sıfır atık yönetiminin ne kadar önemli olduğuna ilişkin yoğun çalışmalar yapılan ülkemizde, özellikle hayvansal ve bitkisel kökenli atıkların kompost, vermikompost gibi organik gübrelere dönüştürülmesine ilişkin çalışmalar başlatılmış olsa da bunun yaygınlaştırılması için daha fazla çalışmalara ve yasal düzenlemelere ihtiyaç olduğu görülmektedir. Çevreyle dost ve ekonomik olan vermikompost ve kompost gübresi kullanımının sürdürülebilir toprak sağlığını olumlu yönde desteklediği bilinmektedir.
Anahtar Kelimeler: Toprak, organik madde, su tutma kapasitesi, vermikompost, kompost.

THE RELATIONSHIP BETWEEN ORGANIC MATTER AND SOIL WATER HOLDING CAPACITY

Abstract
One of the most fundamental indicators determining how vibrant, fertile, high-quality, and sustainable a soil is its organic matter level. A harsh reality revealed by soil analyses in recent years is that agricultural soils have very low organic matter levels and insufficient water retention capacity. This negatively impacts the sustainability of agricultural production and leads to significant decreases in the quality and quantity of crops. Solving this problem is possible, and the first step is to increase the organic matter levels of soils. Soils that reach sufficient organic matter levels show significant increases in their water retention capacity over time.

Recent studies indicate that the percentage of agricultural soils in Turkey with low organic matter content (<1%) has reached 80%. This problem needs to be solved urgently. While intensive work is being done in our country on the importance of zero-waste management, and

studies have been initiated on converting animal and plant waste into organic fertilizers such as compost and vermicompost, further research and legal regulations are needed to expand this practice. Vermicompost and compost fertilizers, which are environmentally friendly and economical, are known to positively support sustainable soil health.
Keywords: Soil, organic matter, water holding capacity, vermicompost, compost.

Organik Madde ile Su Tutma Kapasitesi Arasındaki İlişki

Tarım, gıda üretiminin temelidir ve gıda güvencesi, beslenme ve gıda ekonomisi için kritik bir rol oynar. Tarımda sürdürülebilirliğin sağlanması için verimlilik artırılmalı, toprak ve doğal kaynaklar korunmalı, çiftçinin yaşam kalitesi yükseltilmeli, ama en önemlisi nüfusu hızla artan dünyanın ihtiyaç duyduğu yeterli miktarda, kaliteli ve sağlıklı gıda maddelerinin üretilerek gıda ve besin güvenliğinin sağlanmasıdır. Gıda üretiminin sürdürülebilir ve sağlıklı olması, insanların yaşamlarını olumlu etkiler ve insanların gelecekleri için teminat oluşturmaktadır (Büyükfiliz ve ark., 2023).

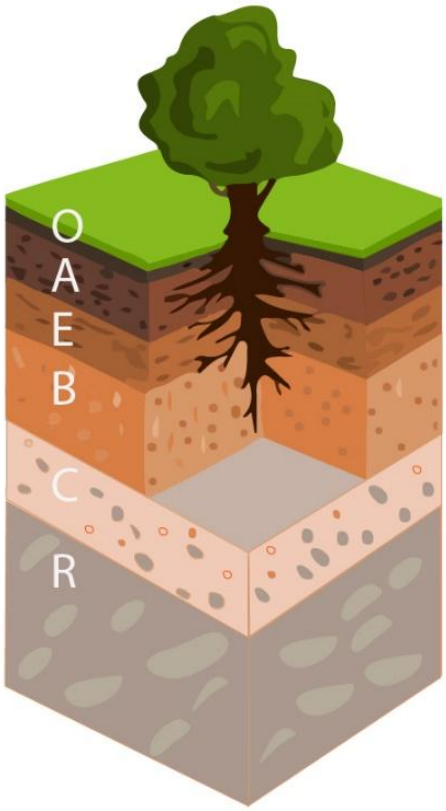
Ülkemizin tarımsal üretiminde özellikle son yıllarda toprakların düşük organik madde içermesi, çinko gibi yarayışlı elementlerin yetersizliği, pH değerlerindeki bozulmalar, toprakların kuraklığa bağlı nem kayıplarına maruz kalması ve sulanabilir alanların azalması gibi nedenlerle önemli sorunlar yaşanmaktadır. Bu sorunlar nedeniyle üretilen ürünlerin miktar ve kalitesinde azalmalar yaşanırken, üretim maliyetleri de artmak suretiyle ekonomik kayıplar ortaya çıkmaktadır (Bellitürk ve Çelik, 2025).

Son yıllarda Türkiye'deki tarım alanlarında yapılan çeşitli yanlış uygulamalar ve aşırı kimyasal kullanımı gibi alışkanlıklar sonucunda topraktaki organik madde miktarları azalmış durumdadır. Böylece bitkilere yararlı olan besin maddeleri de azalarak tarımsal üretimde miktar ve kalite düşerken, üreticilerin gelirleri de azalmaktadır (Çelik ve ark., 2023).

Kuraklık yağışların kaydedilen normal seviyelerinin önemli ölçüde altına düşmesi sonucu toprak su kaynaklarının olumsuz etkilenmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Kuraklık şartlarında toprakların su tutma kapasiteleri ve suyun etkin olarak kullanımı büyük önem taşımaktadır (Gümüş ve ark., 2016).

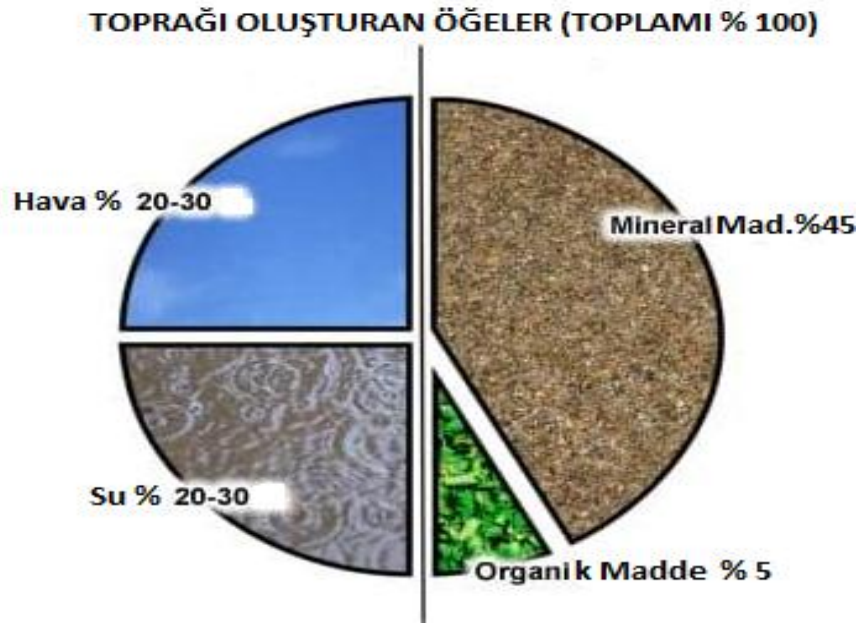
Toprak, tarımsal üretimin temel yapı taşı olup; içinde ve üzerinde yaşayan canlılar için besin ve durak yeri olan, katı-sıvı-gaz fazlarından oluşan yaşamın temel taşlarından birisidir. Toprak; uygarlıkların gelişmesinde aynı zamanda yaşamın sürekliliğinde önemli rol oynayan, elde edilmesi zor ancak kaybedilmesi kolay olan ve 1 cm kalınlığının oluşması için bile binlerce yıl geçmesi gereken doğal bir kaynaktır (Bellitürk, 2012).

Genellikle bir toprak profilinde en üst katmanda miktar olarak diğer katmanlara göre fazla oranlarda bulunan organik madde, topraktaki tohum ve bitkinin beslenmesinden birinci derecede sorumlu olan bölgedir (Şekil 1). Tarımsal açıdan önemli olan organik maddenin O ve A katmanlarındaki varlığı, tarımsal üretimin kalite ve miktarını doğrudan ilgilendirmektedir (Bellitürk ve Goldmann Benardete, 2020).



Şekil 1. Toprak profili (O: Organik katman, A: Pulluk katmanı; Bellitürk ve Goldmann Benardete, 2026).

Bellitürk ve Goldmann Benardete (2020) tarafından bildirildiğine göre, tarımsal üretimin yapılan bir toprakta ortalama olarak %25 hava, %25 su, %45 mineral madde ve %5 oranında da organik madde olması idealdir (Şekil 2). Ancak organik madde bakımından Türkiye tarım topraklarının %80 oranında düşük (<%1) olduğu bilinmektedir. Bu ve benzeri sebepler nedeniyle halen yoğun olarak kullanılmakta olan tarım topraklarının su tutma kapasitelerinin düşük olması, çoğunluğu ithal edilerek ülkemizde satılan kimyasal gübrelerin etkinliğini düşürmekte, gübre için harcanan dövizler boşa gitmekte, topraklar da giderek verimsizleşmektedir. Çözüm nedir? Çözüm, kimyasal gübrelere ilaveten özellikle katı veya sıvı inek gübresi, koyun gübresi, solucan gübresi (vermikompost) vb. organik gübrelerin tarımsal üretim amacıyla "organik gübre" adı altında kullanılmasının yaygınlaştırılmasıdır (Bellitürk ve Baran, 2020).



Şekil 2. Toprağı oluşturan öğeler (Bellitürk ve Goldmann Benardete, 2020).

Organik madde, toprağın su sutma kapasitesini arttırır. Toprakta %1 organik madde varken, ilk 30 cm. derinlikte 15 ton/da su tutulur, %2 organik maddede tutulan su miktarı 30 ton/da'dır (Anonim, 2026a). Günümüzde küresel ısınmanın olumsuz etkilerinden büyük pay alan toprak su tutma kapasitesinin artırılmasının organik gübrelerle sağlanması neticesinde, hem toprakların organik madde ve diğer besin element bakımından iyileştirilmesi hem de kimyasal gübreye gereksiz yere fazla para harcanmadan düşük maliyetli tarımsal üretim gerçekleştirilmesi söz konusu olabilmektedir (Bellitürk ve Baran, 2026).

Tarımsal üretimde su en önemli faktörlerden biri olup; verim ve kalite üzerinde doğrudan etkilidir. Uygulanacak su miktarı toprağın su tutma kapasitesi ile sınırlı olup kumlu topraklarda daha düşük değerdedir. Bitkilerin yararlanabildikleri yarayışlı su miktarı toprağın bünyesi, yapısı, gözeneklilik ve organik madde içeriği gibi faktörlere bağlıdır. Toprağın organik madde içeriğini artıran uygulamalar diğer olumlu etkilerinin yanı sıra yarayışlı su miktarını da artıracaktır. Bu amaçla yapay ve doğal pek çok toprak iyileştirici kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda esas olan konu toprak iyileştiricinin beklenen faydaları sağlarken aynı zamanda kolay elde edilebilir ve ekonomik olmasıdır (Er ve ark., 2020).

Toprak organik maddesinin tarımsal sürdürülebilirlik açısından bu kadar kritik olmasının en çarpıcı göstergelerinden biri, %1'lik artışın bile toprağın su tutma kapasitesini dramatik biçimde yükseltmesidir. Bilimsel çalışmalar, toprakta %1 organik madde artışının hektar başına yaklaşık 150–170 ton ek su tutma kapasitesi kazandırdığını ortaya koymaktadır. Bu, kuraklık riskinin arttığı bir dünyada tarımsal üretimin geleceği için hayati bir avantajdır. Organik madde sayesinde toprak süngerleşir; yağışları daha iyi emer, sel riskini azaltır ve bitki kökleri için daha dengeli bir su rejimi oluşturur. Organik madde yalnızca su değil, karbon açısından da kritik öneme sahiptir. Dünyadaki karbonun en büyük doğal depolarından biri topraktır. Atmosfere salınan karbonun önemli bir kısmı doğru yönetilen topraklarda organik madde formunda depolanabilir. Bu nedenle toprağın organik madde düzeyini artırmak, tarımı bir emisyon kaynağı olmaktan çıkarıp karbon yutağı haline getirebilir. Bunun tam tersi gerçekleştiğinde, yani organik madde azaldığında, toprak karbonu tutamaz ve atmosfere geri salarak iklim krizini hızlandırır. Dolayısıyla organik madde, iklim politikalarının göz ardı edilmemesi gereken en somut parametresidir (Anonim, 2026b).

Organik atıkların doğru şekilde yönetilerek, tarım ve peyzaj alanlarında organik gübre olarak kullanılmasıyla birlikte, sürdürülebilir bir tarım ve çevre koruma yaklaşımı desteklenmiş olmakla birlikte hem toprakların organik madde miktarları artmakta ve hem de topraklardaki su tutma kapasitesi artmak suretiyle tarımsal üretim desteklenmektedir (Edwards ve Arancon, 2004).

Sonuç ve Öneriler

Bugün küresel ısınmanın da etkisiyle hem yağış rejimleri bozulmakta ve hem de toprakların mevcut su tutma kapasiteleri düşmektedir. Sulama amacıyla yoğun ve bilinçsiz olarak kullanılan su miktarlarının da baraj ve göletlerde azalması neticesinde, en hızlı çözümün "topraklarda su tutma kapasitesini" artırmak olduğu akla gelmektedir. Bu konuda topraklarda suyun tutulmasına önemli katkılar sağladığı bilinen önemli ve çevreyle dost organik gübrelerden olan kompost ve vermikompostun tarımsal üretimde kullanılmasının yaygınlaştırılması, çözüm açısından oldukça önemlidir.

Günümüzde yoğun olarak yapılan tarımsal faaliyetler nedeniyle yorgun düşen topraklardaki zamanla azalan organik maddenin yeniden topraklara kazandırılması için mutlaka ülke genelindeki her türlü organik atıkların sıfır atık yönetimi dahilinde konu uzmanlarının bilgi ve yönlendirmeleri neticesinde organik gübrelere dönüştürülmesi sağlanmalı ve bu şekilde oluşan organik gübrelerin de gübreleme programlarında yer almasına yönelik özel teşvik ve desteklerin sağlanmasına ilişkin uygulamalara geçilmelidir. Organik maddenin artmasıyla birlikte topraklarda su tutma kapasiteleri de artacak ve böylelikle sulamada kullanılan sudan tasarruf sağlanarak tarımsal üretim desteklenmiş olacaktır.

Kaynaklar

Anonim, 2026a. Organik madde toprağın canıdır. Erişim Adresi: https://niforganik.com.tr/organik-madde-topragin-canidir/ , Erişim Tarihi: 06.08.2026.

Anonim, 2026b. Toprağın Sessiz Serveti: Organik Maddenin Tarımdaki Belirleyici Rolü. Erişim Adresi: https://tr.linkedin.com/pulse/topra%C4%9F%C4%B1n-sessiz-serveti-organik-maddenin-tar%C4%B1mdaki-biyoteknoloji-hkljf , Erişim Tarihi: 06.08.2026.

Bellitürk, K., 2012. Tarım Toprakları İçin Toprak Analizleri ve Gübrelemenin Önemi. N.K.Ü. Ziraat Fakültesi, El Kitabı, 20 sayfa, Tekirdağ.

Bellitürk, K. ve Baran, M.F., 2026. Tarımsal Üretimde Sıfır Atık ve Organik Gübreler. 12th International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies, January 23-30, sayfa 144-155, Havana-CUBA.

Bellitürk, K. and Çelik, A., 2025. Unexpected Threat: Deteriorating Soil Health Due to Decrease in Soil Organic Matter in Agricultural Lands. 7th International Boğaziçi Scientific Research Congress. 3-4 May, pp. 538-549, İstanbul.

Bellitürk, K. ve Goldmann Benardete, B., 2020. Doğanın Mucizevi Canlıları. Toprağın Bereketi ve Çevre Sağlığına Yüzyıllardır Hizmet Eden Solucanlar. Eco Reform Yayınları.

Büyükfiliz, F., Aydoğan, D and Bellitürk, K., 2023. The ABC's of Organic Fertilizer: The Case of Vermicompost. 1st International Conference on Scientific and Innovative Studies, April 18-20, pp. 133-143, Konya, Türkiye.

Çelik, A., Demir, C., Baran, M.F. and Bellitürk, K., 2023. Is Soil Organic Matter the Most Important Parameter of Agricultural Practices? International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies-V. December 10-12, pp. 1775-1786, Baku-Azerbaijan.

Edwards, C.A. and Arancon, N.Q., 2004. Interaction among Organic Matter, Earthworms and Microorganisms in Promoting Plant Growth (Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture, F. Magdoff ve R. W. Ray, Ed., Boca Raton), USA: CRC Press Inc., ss. 327-376.

Er, H., Demir, Y., Meral, R., 2020. Farklı Özellikteki Toprak İyileştiricilerinin Hafif Bünyeli Toprakların Su Tutma Kapasitesi Üzerine Etkisi. Uluslararası Biyosistem Müh. Derg. 1 (2): 55-65.

Gümüş, İ., Dedeoğlu, M., Şeker, C., Özaytekin, H.H., Karaca, Ü., Atmaca, E. ve Negiş, H., 2016. Toprağın Su Depolama Kapasitesi Yaklaşımıyla Kuraklık Etkisinin Değerlendirilmesi. Selçuk Tarım Bilimleri Dergisi, 3 (1): 113-116.

HEMŞİRELİK ÖĞRENCİLERİNDE AKADEMİK ÖZ-YETERLİLİK İLE YAPAY ZEKÂYA YÖNELİK TUTUM ARASINDAKİ İLİŞKİ

Hamiyet KIZIL
Dr. Öğr.Üyesi , Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Hemşirelik Fakültesi, İstanbul, Türkiye
ORCID: 0000-0002-0722-589X
Rabia EREN
Dr. Öğr.Üyesi, İstanbul Medipol Üniverditesi , Sağlık Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0002-4790-6809
Halime TAMİNCE
Öğrenci, Hamidiye Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Hemşirelik Esasları Tezli Yüksek Lisans Programı, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0009-0008-2778-4462

ÖZET

Bu araştırma, hemşirelik öğrencilerinin akademik öz-yeterlilik düzeyleri ile yapay zekâya yönelik tutumları arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla tanımlayıcı, ilişkisel ve kesitsel tasarımda gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın örneklemini, İstanbul'daki bir devlet ve bir vakıf üniversitesinin hemşirelik bölümlerinde öğrenim gören 994 öğrenci oluşturmuştur. Veriler, Tanıtıcı Bilgi Formu, Hemşirelik Lisans Öğrencileri İçin Akademik Öz-Yeterlilik Ölçeği ve Yapay Zekâya Yönelik Genel Tutum Ölçeği kullanılarak toplanmıştır. Verilerin analizinde tanımlayıcı istatistikler, bağımsız örneklemler t-testi, tek yönlü varyans analizi, Pearson korelasyon analizi ve doğrusal regresyon analizleri kullanılmıştır. Öğrencilerin akademik öz-yeterlilik toplam puan ortalaması 58,279±10,409, yapay zekâya yönelik tutum toplam puan ortalaması ise 77,350±12,798 olarak belirlenmiştir. Bulgular, öğrencilerin akademik öz-yeterliliklerinin orta düzeyin üzerinde ve yapay zekâya yönelik tutumlarının genel olarak olumlu olduğunu göstermiştir. Akademik öz-yeterlilik arttıkça yapay zekâya yönelik olumlu tutumun arttığı ($r=0,578$; $p<0,001$), olumsuz tutumun ise azaldığı saptanmıştır ($r=-0,530$; $p<0,001$). En güçlü ilişki, akademik sorumluluk ile yapay zekâya yönelik toplam tutum arasında belirlenmiştir ($r=0,623$; $p<0,001$). Basit doğrusal regresyon modelinde akademik öz-yeterlilik, yapay zekâya yönelik tutumdaki varyansın %33,3'ünü açıklamıştır ($\beta=0,578$; $p<0,001$). Demografik değişkenlerin de modele dâhil edildiği çoklu regresyon analizinde açıklanan varyans %44,4'e yükselmiş ve akademik öz-yeterlilik anlamlı bir yordayıcı olmayı sürdürmüştür ($\beta=0,417$; $p<0,001$). Sonuçlar doğrultusunda, hemşirelik eğitiminde akademik öz-yeterliliği güçlendiren ve yapay zekâ okuryazarlığını etik, eleştirel düşünme ve klinik karar verme boyutlarıyla destekleyen eğitim stratejilerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: *"Akademik öz-yeterlilik, hemşirelik öğrencileri, yapay zekâ, yapay zekâya yönelik tutum"*

THE RELATIONSHIP BETWEEN ACADEMIC SELF-EFFICACY AND ATTITUDES TOWARD ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NURSING STUDENTS

ABSTRACT

This descriptive, correlational, and cross-sectional study was conducted to examine the relationship between nursing students' academic self-efficacy levels and their attitudes toward artificial intelligence. The sample consisted of 994 students enrolled in nursing departments at one public and one foundation university in Istanbul. Data were collected using the Descriptive

Information Form, the Academic Self-Efficacy Scale for Undergraduate Nursing Students, and the General Attitudes Toward Artificial Intelligence Scale. Descriptive statistics, the independent-samples t-test, one-way analysis of variance, Pearson correlation analysis, and linear regression analyses were used to analyze the data. The students' mean total academic self-efficacy score was 58.279±10.409, while their mean total attitude toward artificial intelligence score was 77.350±12.798. The findings indicated that the students' academic self-efficacy was above the moderate level and that their overall attitudes toward artificial intelligence were positive. As academic self-efficacy increased, positive attitudes toward artificial intelligence increased ($r=0.578$; $p<0.001$), whereas negative attitudes decreased ($r=-0.530$; $p<0.001$). The strongest relationship was identified between academic responsibility and the total attitude toward artificial intelligence score ($r=0.623$; $p<0.001$). In the simple linear regression model, academic self-efficacy explained 33.3% of the variance in attitudes toward artificial intelligence ($\beta=0.578$; $p<0.001$). In the multiple regression analysis incorporating demographic variables, the explained variance increased to 44.4%, and academic self-efficacy remained a significant predictor ($\beta=0.417$; $p<0.001$). Based on these findings, the development of educational strategies that strengthen academic self-efficacy and support artificial intelligence literacy through ethical awareness, critical thinking, and clinical decision-making is recommended in nursing education.

Keywords: "*Academic self-efficacy, artificial intelligence, attitudes toward artificial intelligence, nursing students.*"

ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİNDE EKRAN BAĞIMLILIĞI, DİJİTAL TÜKENMİŞLİK VE CİNSEL ŞİDDETE MARUZİYET ARASINDAKİ İLİŞKİ: KESİTSEL BİR ÇALIŞMA

Arş. Gör. Dr. Hilal BÜYÜKTOPAÇ ÇAKICI
Bartin University, Faculty of Health Science, Department of Nursing, 74100, Bartın
ORCID ID: 0000-0002-4411-788X
Öğr. Gör. Dr. Simge ÖZTÜRK
Bartin University, Faculty of Health Science, Department of Nursing, 74100, Bartın
ORCID ID: 0000-0003-2201-5230
Öğr. Hemş. Ezgi AVCI
Bartin University, Faculty of Health Science, Department of Nursing, 74100, Bartın
ORCID ID: 0009-0002-8348-2414
Öğr. Hemş. Züleyha BALCI
Bartin University, Faculty of Health Science, Department of Nursing, 74100, Bartın
ORCID ID: 0009-0009-4860-144X
Öğr. Hemş. Halime KAHRAMAN
Bartin University, Faculty of Health Science, Department of Nursing, 74100, Bartın
ORCID ID: 0009-0000-1709-366X
Öğr. Hemş. Sohbet PİRLİYAV
Bartin University, Faculty of Health Science, Department of Nursing, 74100, Bartın
ORCID ID: 0009-0005-8953-0829

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, üniversite öğrencilerinde ekran bağımlılığı, dijital tükenmişlik ve siber cinsel şiddete maruz kalma durumları arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Araştırma Şubat 2025-Aralık 2025 tarihleri arasında Türkiye'de bir devlet üniversitesinde yürütülmüştür. Kesitsel ve ilişki arayıcı tipte planlanan araştırmanın örneklemini, bir devlet üniversitesinde orantılı tabakalı örnekleme yöntemiyle belirlenen 430 lisans öğrencisi oluşturmuştur. Ayrıca, araştırma TUBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında "1919BO12469151" numaralı proje olarak desteklenmiştir. Veriler; Sosyo-Demografik Bilgi Formu, Ekran Bağımlılığı Ölçeği, Dijital Tükenmişlik Ölçeği ve Siber Cinsel Şiddet Maruziyeti Ölçeği kullanılarak toplanmıştır. Verilerin analizinde sayı, yüzde ve minimum gibi tanımlayıcı istatistikler kullanılmıştır. Normallik analizinde ise Skewness-Kurtosis değerleri incelenerek değerlendirilmiştir. Normal dağılım gösteren veriler için; Bağımlı Örneklem t-Testi, korelasyon ve regresyon; normal dağılmayan veriler için ise Mann-Whitney U ve Kruskal-Wallis testleri uygulanmıştır. Kadın öğrencilerde ekran bağımlılığı ve dijital tükenmişlik erkeklere kıyasla daha yüksek bulunmuş; günlük ekran süresi uzadıkça bu olumsuz etkiler belirgin şekilde artış göstermiştir. Siber cinsel şiddet en yüksek Edebiyat Fakültesi'nde görülürken, ekran bağımlılığı ve dijital tükenmişlik Eğitim ve Sağlık Bilimleri fakültelerinde öne çıkmaktadır. Ekran bağımlılığı ile dijital tükenmişlik arasında yüksek düzeyde pozitif bir ilişki varken, siber cinsel şiddet her iki durumla düşük düzeyde ilişkili bulunmuş ve cinsiyete göre farklılık göstermemiştir. Araştırma sonucunda, üniversite öğrencilerinde ekran bağımlılığı, dijital tükenmişlik ve siber cinsel şiddet düzeylerinin demografik değişkenlerle ilişkili olduğu ve günlük ekran kullanım süresi arttıkça bağımlılık ile tükenmişlik belirtilerinin belirgin şekilde yükseldiği saptanmıştır. Ekran bağımlılığı ile dijital tükenmişlik arasında güçlü pozitif bir ilişki bulunurken, siber cinsel şiddet eğiliminin her iki değişkenle de düşük düzeyde fakat istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ekran bağımlılığı, dijital tükenmişlik, siber cinsel şiddet, üniversite öğrencileri, ekran kullanım süresi

THE RELATIONSHIP BETWEEN SCREEN ADDICTION, DIGITAL BURNOUT, AND EXPOSURE TO SEXUAL VIOLENCE AMONG UNIVERSITY STUDENTS: A CROSS-SECTIONAL STUDY

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the relationship among screen addiction, digital burnout, and exposure to cyber sexual violence among college students. The research was conducted between February 2025 and December 2025 at a public university in Turkey. The study, designed as a cross-sectional and exploratory study, included a sample of 430 undergraduate students selected using proportional stratified sampling at a state university. Additionally, the study was supported under the TUBİTAK 2209-A University Student Research Projects Support Program as Project No. “1919BO12469151.” Data were collected using the Sociodemographic Information Form, the Screen Addiction Scale, the Digital Burnout Scale, and the Cyber Sexual Violence Exposure Scale. Descriptive statistics such as frequency, percentage, and minimum values were used in the analysis of the data. In the normality analysis, the data were evaluated by examining skewness and kurtosis values. For data showing a normal distribution, the Paired t-test, correlation, and regression were applied; for data not normally distributed, the Mann-Whitney U and Kruskal-Wallis tests were applied. Screen addiction and digital burnout were found to be higher among female students compared to male students; as daily screen time increased, these negative effects showed a significant rise. While cyber sexual violence is most prevalent in the Faculty of Literature, screen addiction and digital burnout are most prominent in the Faculties of Education and Health Sciences. While there is a strong positive correlation between screen addiction and digital burnout, cyber sexual violence was found to be only weakly associated with both conditions and did not differ by gender. The study found that levels of screen addiction, digital burnout, and cyber sexual violence among university students are associated with demographic variables, and that symptoms of addiction and burnout increase significantly as daily screen time increases. While a strong positive relationship was found between screen addiction and digital burnout, it was determined that the tendency toward cyber sexual violence showed a low-level but statistically significant relationship with both variables.

Keywords: Screen addiction, digital burnout, cyber sexual violence, students, screen times

İĞDE MEYVESİNİN ULTRASON DESTEKLI SULU EKSTRAKSIYONU VE ANTİBAKTERİYEL AKTİVİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir GÜL
Gumushane University, Faculty of Health Sciences, Department of Emergency Aid and Disaster Management, 29000 Center, Gümüşhane
ORCID ID: 0000-0003-4879-6194

ÖZET
Bu çalışmada, iğde (*Elaeagnus angustifolia* var. *angustifolia*) meyvesinin iç kısmından ultrason destekli ekstraksiyonla elde edilen sulu ekstraktın antibakteriyel aktivitesi araştırılmıştır. Bitkisel materyal, Elazığ ili Karaali köyündeki tarımsal üretim alanlarından Haziran–Temmuz döneminde toplanmıştır. Taze meyveler, doğrudan güneş ışığı almayan gölgeli ve havadar bir ortamda kabuk, iç meyve ve çekirdek kısımlarına ayrılmıştır. İç meyve kısımları laboratuvar ortamında 7 gün süreyle ön kurutmaya bırakıldıktan sonra 50 °C'de 24 saat etüvde kurutulmuştur. Kurutulan materyal, paslanmaz çelik bıçaklı bir öğütücü kullanılarak öğütülmüştür. Toz hâlindeki 20 g örnek, 50 mL distile suyla karıştırılarak ultrasonik banyoda 320 W güç ve 35 kHz frekansta, harici ısıtma uygulanmaksızın laboratuvar sıcaklığında 2 saat ekstrakte edilmiştir. Elde edilen karışım süzülmüş ve elde edilen filtrat, saflaştırma amacıyla 10.000 rpm'de 15 dakika santrifüjlenmiştir. Ekstraktın antibakteriyel aktivitesi, agar kuyucuk difüzyon yöntemiyle iki Gram-negatif bakteri (*Escherichia coli* ve *Pseudomonas aeruginosa*) ile iki Gram-pozitif bakteri (*Enterococcus faecalis* ve *Staphylococcus aureus*) üzerinde incelenmiştir. Test edilen 5, 10 ve 25 mg/mL konsantrasyonları arasında yalnızca 25 mg/mL konsantrasyonundaki ekstrakt, *E. faecalis*'e karşı 13,6± 0.9 mm çapında ölçülebilir bir inhibisyon zonu oluşturmuştur. Bulgular, sulu iğde ekstraktının incelenen koşullarda geniş spektrumlu aktivite göstermediğini, ancak *E. faecalis*'e karşı yüksek konsantrasyonda sınırlı fakat ölçülebilir antibakteriyel aktivite sergilediğini ortaya koydu. Çalışma, bu aktivitenin ileri kimyasal karakterizasyon ve kantitatif duyarlılık testleriyle araştırılması için deneysel bir temel sağlamaktadır.
Anahtar kelimeler: İğde, ultrason destekli ekstraksiyon, sulu ekstrakt, antibakteriyel aktivite

ULTRASOUND-ASSISTED AQUEOUS EXTRACTION OF OLEASTER FRUIT AND EVALUATION OF ITS ANTIBACTERIAL ACTIVITY

ABSTRACT
This study investigated the antibacterial activity of an aqueous extract obtained from the pulp of oleaster (*Elaeagnus angustifolia* var. *angustifolia*) fruit by ultrasound-assisted extraction. The plant material was collected from agricultural production areas in Karaali village, Elazığ, Türkiye, during June–July. The fresh fruits were separated into peel, pulp, and seed fractions in a shaded, well-ventilated environment protected from direct sunlight. The pulp fractions were pre-dried under laboratory conditions for 7 days and subsequently oven-dried at 50 °C for 24 h. The dried material was ground using a grinder equipped with stainless-steel blades. A 20 g portion of the powdered sample was mixed with 50 mL of distilled water and extracted in an ultrasonic bath at 320 W and 35 kHz for 2 h at laboratory temperature without external heating. The resulting mixture was filtered, and the filtrate was centrifuged at 10,000 rpm for 15 min for purification. The antibacterial activity of the extract was evaluated using the agar well diffusion method against two Gram-negative bacterial strains (*Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa*) and two Gram-positive bacterial strains (*Enterococcus faecalis* and

Staphylococcus aureus). Among the tested concentrations of 5, 10, and 25 mg/mL, only the extract at 25 mg/mL produced a measurable inhibition zone against *E. faecalis*, with a diameter of 13.6 ± 0.9 mm. The findings indicated that the aqueous oleaster extract did not exhibit broad-spectrum activity under the conditions examined but showed limited yet measurable antibacterial activity against *E. faecalis* at the highest concentration. This study provides an experimental basis for further investigation of this activity through chemical characterization and quantitative antimicrobial susceptibility assays.

Keywords: Oleaster, ultrasound-assisted extraction, aqueous extract, antibacterial activity

POSTERİOR SERVİKAL DEKOMPRESYON VE ENSTRÜMANTASYON SONRASI GELİŞEN CERRAHİ ALAN ENFEKSİYONU VE ENSTRÜMANTASYON YETMEZLİĞİ: OLGU SUNUMU

Dr.Öğr.Üyesi Ömer Faruk ŞAHİN
Ordu University, Medical Faculty Department of Neurosurgery, 52200 Altınordu, Ordu
ORCID ID: 0000-0003-2430-4650
Dr.Öğr.Üyesi Bekir TUNÇ
Ordu University, Medical Faculty Department of Neurosurgery, 52200 Altınordu, Ordu
ORCID ID: 0000-0002-1941-0515
Ass.Dr.Mağruf İlkay Yapakçı
Ordu University, Medical Faculty Department of Neurosurgery, 52200 Altınordu, Ordu
ORCID ID: 0000-0003-0467-5278

ÖZET

Posterior servikal dekompresyon ve enstrümantasyon sonrası gelişen cerrahi alan enfeksiyonları, implant yetmezliği ve yeniden cerrahi gereksinimine yol açabilen ciddi komplikasyonlardır. Altmış altı yaşında erkek hasta yaklaşık 7–8 metre yükseklikten düşme sonrası üst ekstremitelerde ağrı ve güçsüzlük yakınmalarıyla başvurdu. Nörolojik değerlendirmede alt ekstremite kas gücü bilateral 5/5 iken üst ekstremitelerde, özellikle distal kas gruplarında belirgin güç kaybı saptandı. C5–7 spondilotik miyelopati tanısıyla acil olarak posterior servikal stabilizasyon, C5–7 total laminektomi ve foraminotomi uygulandı. İntraoperatif olarak spinal kord ödemi ve epidural hematom izlendi; hematom ve fibrotik dokular uzaklaştırılarak dekompresyon sağlandı. Postoperatif dönemde üst ekstremite motor fonksiyonlarında belirgin düzelme gözlendi.

Postoperatif altıncı günde yara yerinden hemorajik karakterde akıntı gelişmesine rağmen hastada ateş veya belirgin enfeksiyon bulgusu saptanmadı ve mevcut antibiyotik tedavisine devam edildi. Taburculuk sonrası yara yerinde pürülan akıntı, açılma ve ağrı gelişmesi üzerine hasta yeniden yatırıldı. Kontrol görüntülemelerinde C5 lateral mass vidalarının pozisyon kaybına uğradığı görüldü. Revizyon cerrahisinde anterior C5–6 yaklaşımında pürülan materyal ve erode disk mesafesi saptandı; diskektomi sonrası kafes ve anterior plak ile stabilizasyon sağlandı. Aynı seansta posterior saha revize edildi, yerinden ayrılmış C5 vidaları yeniden yerleştirildi ve C4 lateral masslara ek vidalar uygulandı. İntraoperatif kültürlerde Enterobacter cloacae ve Klebsiella pneumoniae üredi. Kültür sonuçlarına göre antibiyoterapi düzenlendi ve meropenem tedavisine geçildi. Takiplerinde hasta afebril seyretti, yara yeri temiz kaldı ve nörolojik defisit gelişmedi; klinik ve laboratuvar iyileşme sonrası oral antibiyotik tedavisiyle taburcu edildi.

Bu olgu, posterior servikal enstrümantasyon sonrası erken dönemde ortaya çıkan yara yeri akıntısının derin cerrahi alan enfeksiyonu ve enstrümantasyon yetmezliğinin ilk bulgusu olabileceğini göstermektedir. Erken tanı, uygun cerrahi debridman, stabilizasyonun revizyonu ve kültüre yönelik antibiyotik tedavisinin birlikte uygulanması başarılı klinik sonuç açısından önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Servikal spondilotik miyelopati, posterior servikal enstrümantasyon, cerrahi alan enfeksiyonu, implant yetmezliği, revizyon cerrahisi

SURGICAL SITE INFECTION AND INSTRUMENTATION FAILURE FOLLOWING POSTERIOR CERVICAL DECOMPRESSION AND INSTRUMENTATION: A CASE REPORT

ABSTRACT

Surgical site infections following posterior cervical decompression and instrumentation are serious complications that may lead to implant failure and the need for revision surgery. A 66-year-old male patient presented with pain and weakness in the upper extremities after falling from a height of approximately 7–8 meters. Neurological examination revealed bilateral lower extremity muscle strength of 5/5, while marked weakness was noted in the upper extremities, particularly in the distal muscle groups. With a diagnosis of C5–7 spondylotic myelopathy, the patient underwent emergency posterior cervical stabilization, C5–7 total laminectomy, and foraminotomy. Intraoperatively, spinal cord edema and an epidural hematoma were observed; the hematoma and fibrotic tissues were removed, and adequate decompression was achieved. A marked improvement in upper extremity motor function was observed during the postoperative period.

On the sixth postoperative day, hemorrhagic discharge developed from the surgical wound; however, the patient had no fever or overt signs of infection, and the existing antibiotic treatment was continued. After discharge, the patient was readmitted due to purulent wound drainage, wound dehiscence, and pain. Follow-up imaging demonstrated displacement of the C5 lateral mass screws. During revision surgery, an anterior C5–6 approach revealed purulent material and erosion of the disc space. Following discectomy, stabilization was achieved using a cage and an anterior plate. During the same surgical session, the posterior surgical field was revised, the displaced C5 screws were repositioned, and additional screws were placed in the C4 lateral masses. Intraoperative cultures yielded *Enterobacter cloacae* and *Klebsiella pneumoniae*. Antibiotic therapy was adjusted according to the culture results, and treatment was switched to meropenem. During follow-up, the patient remained afebrile, the surgical wound remained clean, and no neurological deficit developed. Following clinical and laboratory improvement, the patient was discharged on oral antibiotic therapy.

This case demonstrates that early postoperative wound drainage following posterior cervical instrumentation may represent the initial sign of a deep surgical site infection and instrumentation failure. Early diagnosis, appropriate surgical debridement, revision of stabilization, and culture-directed antibiotic therapy are important for achieving a favorable clinical outcome.

Keywords: Cervical spondylotic myelopathy, posterior cervical instrumentation, surgical site infection, implant failure, revision surgery

ÇOCUK VE ADÖLESANLARDA BESİN GÜVENCESİZLİĞİNİN DİYET KALİTESİ, YEME DAVRANIŞLARI VE SAĞLIK ÜZERİNE ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Şebnem ÖZGEN ÖZKAYA
Kütahya Health Sciences University School of Health Sciences, Department of Nutrition and Dietetics, Kütahya, Türkiye
ORCID ID:0000-0002-4358-8321

ÖZET

Çocukluk ve adölesan dönemde sağlıklı, yeterli ve güvenli besine erişim, büyüme ve gelişmenin sürdürülmesi ve yaşam boyu sağlık açısından temel bir gereksinimdir. Bununla birlikte sosyoekonomik ve sosyokültürel eşitsizlikler, hanehalkının yeterli ve nitelikli besine erişimini sınırlandırarak çocuklarda besin güvencesizliğine neden olabilmektedir. Besin güvencesizliği yalnızca besinlerin miktar olarak yetersiz olması değil, bireylerin gereksinimlerine ve tercihlerine uygun sağlıklı besine fiziksel ve ekonomik olarak düzenli biçimde ulaşamamasını da kapsamaktadır. Çocuklar evdeki yiyecekleri tüketmeye endişe etme, istenilen yiyecek/içeceğe ekonomik nedenlerle ulaşamama, yiyecek miktarını azaltma, öğün atlama ve açlık yaşamasına rağmen öğün tüketememe gibi farklı biçimlerde besin güvencesizliği deneyimlerine sahiptir. Besin güvencesizliğinin değerlendirilmesi farklı parametreler ile yapılmakla birlikte uluslararası çalışmalarda 11–14 yaş grubunda bu oran yaklaşık %25, 15–18 yaş grubunda %30 olarak bildirilmiştir. Türkiye'de ise okul öncesi çocukların bulunduğu hanelerde %31,6, okul çağı çocuklarında ise %76 oranında besin güvencesizliği belirlenmiştir. Besin güvencesizliğinin çocukların beslenme örüntüsünü etkileyen önemli sonuçlarından biri, diyet kalitesindeki bozulmadır. Besin güvencesizliği yaşayan çocuklarda diyet çeşitliliğinin azaldığı, besin değeri düşük ve enerji yoğunluğu yüksek besinlerin tüketiminin arttığı görülmektedir. Bir diğer yandan besin güvencesizliği çocukların yeme davranışlarını da etkileyebilmektedir. Bu çocuklarda tıkınırcasına yeme, kontrolsüz yeme, açlık olmaksızın yeme ve diğer olumsuz yeme davranışları görülebilmektedir. Diyet kalitesi ve yeme davranışlarındaki bu değişiklikler, çocukların büyüme ve gelişme süreçlerini, fiziksel ve psikososyal sağlıklarını etkileyebilmektedir. Bu çerçevede çocuklarda besin güvencesizliği kavramı ekonomik yetersizlik, sağlıklı besine erişememe, kötü diyet kalitesi ve olumsuz yeme davranışları ile ilişkilendirilebilen çok katmanlı ve karmaşık bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Besin güvencesizliğinin kompleks yapısının bodurluk, zayıflık, anemi, obezite ve diş çürükleri gibi farklı beslenme sorunlarının oluşmasında etkili olduğu bildirilmektedir. Özellikle çocukların bizzat yaşadıkları deneyimlerinin dikkate alınması, besin güvencesizliğinin çocuk sağlığı üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayabilir. Çocukluk ve adölesan döneminde besin güvencesizliğinin şiddetinin ve seyrinin düzenli takibi, risk gruplarının ve bölgesel farklılıkların belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu yaş gruplarına yönelik rutin izlem programlarının geliştirilmesi, sağlıklı besine erişiminin kolaylaştırılması ve uygun sosyal desteğin sağlanması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çocuklarda besin güvencesizliği, diyet kalitesi, yeme davranışı

THE EFFECTS OF FOOD INSECURITY ON DIETARY QUALITY, EATING BEHAVIORS, AND HEALTH IN CHILDREN AND ADOLESCENTS

ABSTRACT

Access to healthy, adequate, and safe food during childhood and adolescence is a fundamental requirement for sustained growth and development and for lifelong health. However, socioeconomic and sociocultural inequalities can limit household access to adequate and quality food, leading to food insecurity in children. Food insecurity encompasses not only insufficient quantity of food but also the inability of individuals to regularly access healthy food that meets their needs and preferences, both physically and economically. Children experience food insecurity in various ways, such as worrying about consuming food at home, inability to access desired food/drink due to economic reasons, reducing food intake, skipping meals, and being unable to eat despite feeling hungry. While food insecurity is assessed using different parameters, international studies report this rate to be approximately 25% in the 11-14 age group and 30% in the 15-18 age group. In Türkiye, food insecurity has been identified in 31.6% of households with preschool children and 76% of school-age children. One of the significant consequences of food insecurity affecting children's nutritional patterns is the deterioration in diet quality. Children experiencing food insecurity show reduced dietary diversity and increased consumption of low-nutrient, high-energy foods. Furthermore, food insecurity can also affect children's eating behaviors. These children may exhibit binge eating, uncontrolled eating, eating without hunger, and other negative eating behaviors. These changes in diet quality and eating behaviors can impact children's growth and development, as well as their physical and psychosocial health. In this context, the concept of food insecurity in children is considered a multi-layered and complex process that can be linked to economic hardship, lack of access to healthy food, poor diet quality, and negative eating behaviors. The complex nature of food insecurity is reported to contribute to the development of various nutritional problems such as stunting, underweight, anemia, obesity, and dental caries. Considering children's direct experiences can contribute to a more comprehensive understanding of the effects of food insecurity on children's health. Regular monitoring of the severity and course of food insecurity in childhood and adolescence, and identification of risk groups and regional differences are crucial. Developing routine monitoring programs for these age groups, facilitating access to healthy food, and providing appropriate social support are necessary.

Keywords: Food insecurity in children, diet quality, eating behavior

FUTBOL ANTRENÖRLERINDE ÖZ YETERLILIK ILE ÖRGÜTSEL ADALET VE MESLEKI TÜKENMIŞLIK ARASINDAKI İLIŞKININ İNCELENMESI

Doç. Dr. Ünal SAKİ
Ağrı İbrahim Çeçen University, Faculty of Sports Science, Ağrı
ORCID ID:0000-0003-4913-0693
Yüksek lisans öğrencisi: Arjin YILDIZ
Bitlis Eren University, Bitlis, Faculty of Sports Science, Bitlis
ORCID ID:0009-0005-2941-7824

ÖZ

Araştırmanın amacı, futbol antrenörlerinde öz yeterlilik ile örgütsel adalet ve mesleki tükenmişlik arasındaki ilişkinin incelenmesidir. Bu araştırma betimsel ve ilişkisel tarama modeli olarak tasarlanmış olup örneklemi betimleyebilmek adına ölçek tekniğinin kullanıldığı nicel bir araştırmadır. Araştırmanın örneklemini Ağrı ve Van illerindeki Süper Amatör, 1. ve 2. Amatör kulüplerde antrenörlük yapan 68 kadın, 43 erkek toplam 111 antrenör oluşturmaktadır. Araştırmanın veri toplama kısmında araştırmacı tarafından düzenlenen "Kişisel Bilgi Formu", Koçak (2020) tarafından geliştirilen Antrenör Öz Yeterlik Ölçeği, Yıldırım (2002) tarafından uyarlaması yapılan Örgütsel Adalet Ölçeği ve İnce ve Şahin (2015) tarafından uyarlaması yapılan Mesleki Tükenmişlik Ölçeği kullanılmıştır. Araştırma verilerinin analizi SPSS 25.0 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz öncesinde normallik varsayımı çarpıklık ve basıklık katsayıları ile incelenmiş, normal dağılım varsayımının sağlandığı tespit edilmiştir. Ölçeklerin iç tutarlılığı Cronbach Alpha katsayısı ile değerlendirilmiş ve tüm alt boyutların kabul edilebilir düzeyin üzerinde olduğu belirlenmiştir. H1, $H1_a$, $H1_b$, H2, $H2_a$, $H2_b$ H3, $H3_a$, $H3_b$ hipotezi kapsamında AÖYÖ, ÖAÖ ve MTÖ toplam puan ve alt boyutları arasındaki ilişki belirlemek için Pearson korelasyon katsayısından faydalanılmıştır. Araştırma bulgularına göre, AÖYÖ ile ÖAÖ ve MTÖ toplam puan ve alt boyutları arasında herhangi bir ilişki tespit edilememiştir. ÖAÖ ile MTÖ alt boyutu olan Duygusal tükenme arasında negatif anlamlı orta düzeyde, Duyarsızlaşma arasında pozitif anlamlı orta düzeyde ilişki belirlenmiştir. ÖAÖ alt boyutlarından Adil dağıtım ile MTÖ alt boyutlarından Duygusal tükenme arasında negatif anlamlı orta düzeyde, Duyarsızlaşma arasında pozitif anlamlı orta düzeyde ilişki ortaya çıkmıştır. ÖAÖ alt boyutlarından Adil işlem ile MTÖ alt boyutlarından Duygusal tükenme arasında negatif anlamlı orta düzeyde Duyarsızlaşma arasında pozitif anlamlı orta düzeyde ilişki tespit edilmiştir. ÖAÖ alt boyutlarından Adil etkileşim ile MTÖ alt boyutlarından Duygusal tükenme arasında negatif anlamlı orta düzeyde, Duyarsızlaşma arasında pozitif anlamlı orta düzeyde ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum futbol antrenörlerinin örgütsel süreçlerde adil uygulamaları algılamalarının duygusal ve psikolojik iyi oluşları üzerine tesir edebileceği düşünülürken adalet algısındaki değişimlerin antrenörlerin duygusal yıpranma düzeyleri üzerinde belirleyici olabileceği savunulabilir.

Anahtar kelimeler: Antrenör, Öz yeterlik, örgütsel adalet, mesleki tükenmişlik

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SELF-EFFICACY, ORGANIZATIONAL JUSTICE, AND PROFESSIONAL BURNOUT AMONG FOOTBALL COACHES

ABSTRACT

The aim of this study is to examine the relationship between self-efficacy, organisational justice and professional burnout among football coaches. This study is designed as a descriptive and correlational survey and is a quantitative study utilising a scale technique to characterise the sample. The sample consists of 111 coaches in total—68 women and 43 men—who work as coaches at Super Amateur, 1st and 2nd Amateur clubs in the provinces of Ağrı and Van. In the data collection phase of the study, the "Personal Information Form" prepared by the researcher, the Coach Self-Efficacy Scale developed by Koçak (2020), the Organisational Justice Scale adapted by Yıldırım (2002), and the Professional Burnout Scale adapted by İnce and Şahin (2015) were used. The analysis of the research data was carried out using the SPSS 25.0 software package. Prior to analysis, the assumption of normality was examined using skewness and kurtosis coefficients, and it was determined that the assumption of normal distribution was met. The internal consistency of the scales was assessed using the Cronbach's Alpha coefficient, and it was determined that all sub-dimensions were above an acceptable level. To determine the relationship between the total scores and sub-dimensions of AÖYÖ, ÖAÖ and MTÖ within the scope of hypotheses H1, H1a, H1b, H2, H2a, H2b, H3, H3a and H3b, the Pearson correlation coefficient was utilised. According to the research findings, no relationship was detected between AÖYÖ and ÖAÖ and MTÖ total scores and sub-dimensions. However, a negative, medium-level, significant relationship was found between ÖAÖ and the MTÖ sub-dimension of emotional exhaustion, and a positive, medium-level, significant relationship was found between ÖAÖ and the MTÖ sub-dimension of depersonalisation. Similarly, a negative, medium-level, significant relationship was found between the ÖAÖ sub-dimension of Fair Distribution and the MTÖ sub-dimension of Emotional Exhaustion, and a positive, medium-level, significant relationship was found between the ÖAÖ sub-dimension of Empathy and the MTÖ sub-dimension of Emotional Exhaustion. Similarly, a negative, medium-level correlation was found between the ÖAÖ sub-dimension of Fair Treatment and the MTÖ sub-dimension of Emotional Exhaustion, and a positive, medium-level correlation was found between the ÖAÖ sub-dimension of Fair Treatment and the MTÖ sub-dimension of Disengagement. Similarly, a negative, medium-level relationship was found between the ÖAÖ sub-dimension of Fair interaction and the MTÖ sub-dimension of Emotional exhaustion, and a positive, medium-level relationship was found between the ÖAÖ sub-dimension of Fair interaction and the MTÖ sub-dimension of Disengagement. It is thought that this could affect the emotional and psychological well-being of football coaches when they perceive fair practices in organisational processes, while changes in the perception of justice could be a determining factor in the emotional exhaustion levels of coaches.

Keywords: Coach, self-efficacy, organisational justice, occupational burnout

RATLARDA KUMESTROL VE BORİK ASİDİN İNTRATESTİKÜLER UYGULAMASININ TESTİS VE SPERMATOLOJİK KALİTE ÜZERİNE ETKİSİ

Can TOPALOĞLU
Hatay Mustafa Kemal University, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Reproduction and Artificial Insemination, 31060, Antakya, Hatay
ORCID ID: 0009-0009-6190-8550
Dr. Öğr. Üyesi Nurdan COŞKUN
Hatay Mustafa Kemal University, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Reproduction and Artificial Insemination, 31060, Antakya, Hatay
ORCID ID: 0000-0002-7120-8146

ÖZET

Çalışmada, erkek ratlarda intratestiküler olarak uygulanan kumestrol ve borik asidin tek başına ve kombine uygulamasının testiküler yapı ve fonksiyon üzerine etkilerinin değerlendirilmesi amaçlandı. Çalışmada toplamda 32 adet Wistar albino erkek rat kullanıldı. Kontrol, kumestrol, borik asit ve kumestrol+borik asit olmak üzere dört grup oluşturuldu. Uygulama sonrasında ratlar 8 hafta boyunca klinik ve B-mod ultrasonografi ile takip edildi. Çalışma sonunda canlı ağırlık, testis ağırlıkları ve gonadosomatik indeks (GSI), testis morfometrik ölçümleri, spermatolojik parametreler (motilite, yoğunluk, membran bütünlüğü, anormal ve ölü spermatozoon oranları, apoptozis oranı), kan ve testis dokusunda oksidatif stres parametreleri (MDA, GSH, GPx ve CAT) ve testosteron konsantrasyonları ile testis ekojenitesi değerlendirildi. Kumestrol ve borik asit uygulamalarının canlı ağırlık üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmadı. Buna karşılık, kombine grupta testis ağırlıklarında ve özellikle testis morfometrik ölçümlerinde belirgin azalmalar **saptandı.** Spermatolojik muayenede, en kötü spermatolojik kalite kombine grupta görüldü; bu grupta sperm motilitesi, spermatozoon yoğunluğu ve membran bütünlüğü en düşük, anormal ve ölü spermatozoon oranları ise en yüksek bulundu. Apoptozis, borik asit ve kombine gruplarında en yüksek düzeyde saptandı. Borik asit grubunda kan ve testis dokusunda MDA düzeyleri yükselirken, antioksidan göstergelerde değişiklikler gözlendi. Kombine grupta testis dokusunun GSH ve CAT düzeyleri belirgin olarak düşük, GPx aktivitesi ise borik asit grubuyla birlikte düşük bulundu. Testosteron düzeyleri özellikle borik asit ve kombine gruplarında azaldı. Testis ekojenitesinin uygulama sonrasında zamana bağlı olarak değiştiği ve kombine grupta 5. günde en düşük ekojenite değerinin **ortaya çıktığı belirlendi. Sonuç olarak,** kumestrol ve borik asidin birlikte intratestiküler uygulanması; testis morfometrisi, sperm kalitesi, apoptozis, oksidatif/antioksidan denge, testosteron düzeyi ve testis ekojenitesi bakımından en belirgin değişikliklerin görüldüğü uygulama şekli oldu**.**

Anahtar kelimeler: Rat, intratestiküler enjeksiyon, borik asit, kumestrol, testiküler ultrasonografi.

THE EFFECT OF INTRATESTICULAR ADMINISTRATION OF COUMESTROL AND BORIC ACID ON TESTIS AND SPERMATOLOGICAL QUALITY IN RATS

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effects of intratesticular administration of coumestrol and boric acid, administered either individually or in combination, on testicular structure and function in male rats. A total of 32 Wistar Albino rats were randomly divided into four groups: control, coumestrol, boric acid, and coumestrol + boric acid. Following administration, the rats were clinically and ultrasonographically monitored for 8 weeks. At the end of the study, live body weight, testicular weights and the gonadosomatic index (GSI), testicular morphometric measurements, spermatological parameters (sperm motility, spermatozoon concentration, membrane integrity, abnormal and dead spermatozoon rates, and apoptosis), oxidative stress and antioxidant parameters (MDA, GSH, GPx, and CAT) in blood and testicular tissue, testosterone levels in serum and testicular tissue, and testicular echogenicity were evaluated. Coumestrol and boric acid administration had no significant effect on live body weight. In contrast, marked decreases in testicular weights and, particularly, testicular morphometric measurements were observed in the combined group. The most pronounced impairment in spermatological parameters was observed in the combined group; sperm motility, spermatozoon concentration, and membrane integrity were lowest, whereas abnormal and dead spermatozoon rates were highest in this group**.** The apoptosis rate was highest in the boric acid and combined groups. While MDA levels increased in the blood and testicular tissue in the boric acid group, changes were observed in antioxidant parameters. Testicular tissue GSH and CAT levels were markedly lower in the combined group, while GPx activity was lower in both the boric acid and combined groups. Testosterone levels decreased particularly in the boric acid and combined groups. Testicular echogenicity changed over time following administration, with the lowest echogenicity value observed in the combined group on day 5. **In conclusion,** combined intratesticular administration of coumestrol and boric acid resulted in the most pronounced changes in testicular morphometry, sperm quality, apoptosis, oxidative/antioxidant balance, testosterone levels, and testicular echogenicity.

Keywords: Rat, intratesticular injection, boric acid, coumestrol, testicular ultrasonography.

SARKOPENİ, EGZERSİZ VE YAŞLI YETİŞKİNLER KONUSUNDAKİ KÜRESEL ARAŞTIRMA EĞİLİMLERİNİN BİBLİYOMETRİK ANALİZİ: WEB OF SCİENCE VE VOSviewer ÇALIŞMASI

Doç. Dr. Yasemin KAVLAK
Eskisehir Osmangazi University, Health Services Vocational School, Department of Health Care Services, Elderly Care Program, Eskisehir, Turkey
Eskisehir Osmangazi University, Center for Aging and Memory Research and Practice, Eskisehir, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-4143-0184

Arka Plan: Sarkopeni; fonksiyonel gerileme, kırılganlık, yetersizlik ve artmış sağlık hizmeti kullanımı ile ilişkili önemli bir geriatrik sendromdur. Egzersize dayalı müdahaleler, sarkopeninin önlenmesi ve yönetiminde temel yaklaşımlardan biri haline gelmiştir. Bu çalışmada, sarkopeni, egzersiz ve yaşlı yetişkinler konusundaki küresel araştırma eğilimlerinin, işbirliği örüntülerinin ve ortaya çıkan araştırma temalarının incelenmesi amaçlanmıştır.
Yöntem: Web of Science Core Collection kullanılarak bibliyometrik analiz gerçekleştirilmiştir. Sarkopeni, egzersiz ve yaşlı yetişkinler konusundaki yayınlar; yayın özellikleri, ülkeler, kurumlar, dergiler, yazarlar ve araştırma kategorileri açısından incelenmiştir. Ortak yazarlık, uluslararası işbirliği ve anahtar kelime birlikte oluşum analizleri VOSviewer kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
Bulgular: Toplam 3.074 yayın belirlenmiş ve özellikle 2020 yılı sonrasında araştırma üretiminde belirgin bir artış görülmüştür. Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Japonya, İngiltere, Avustralya, İspanya ve Brezilya en üretken ülkeler arasında yer almıştır. Önde gelen dergiler arasında *Nutrients, Experimental Gerontology, Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle* ve *BMC Geriatrics* bulunmuştur. Anahtar kelime birlikte oluşum analizi sonucunda 173 anahtar kelime sekiz kümede gruplanmıştır. Sarkopeni, yaşlanma, kırılganlık, iskelet kası, kas kütlesi ve fiziksel performans temel araştırma temalarını oluşturmuştur. Overlay analizi; egzersiz müdahaleleri, dirençli egzersiz, beslenme, kas sağlığı, osteosarkopeni ve kardiyovasküler hastalıklara yönelik araştırma ilgisinin arttığını göstermiştir. Uluslararası işbirliği analizi, beş kümede 55 ülkeyi kapsayan bir araştırma ağı ortaya koymuştur.
Sonuç: Sarkopeni, egzersiz ve yaşlı yetişkinler konusundaki küresel araştırmalar özellikle 2020 sonrasında önemli ölçüde genişlemiştir. Araştırma odağının yaşa bağlı kas kaybından; egzersiz, dirençli egzersiz, beslenme ve kas sağlığını içeren çok boyutlu yaklaşımlara doğru kaydığı görülmektedir. Bulgular, sarkopeni araştırmalarının sağlıklı yaşlanma ve çoklu hastalık yükü ile giderek daha fazla bütünleştiğini ve uluslararası işbirliğinin önemini ortaya koymaktadır.
Anahtar Kelimeler: Sarkopeni; Egzersiz; Yaşlı Yetişkinler; Bibliyometrik Analiz; Sağlıklı Yaşlanma

BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF GLOBAL RESEARCH TRENDS ON SARCOPENIA, EXERCISE, AND OLDER ADULTS: A WEB OF SCIENCE AND VOSviewer STUDY

Background: Sarcopenia is a major geriatric syndrome associated with functional decline, frailty, disability, and increased healthcare utilization. Exercise-based interventions have become a key component of sarcopenia prevention and management. This study aimed to explore global research trends, collaboration patterns, and emerging research themes concerning sarcopenia, exercise, and older adults.

Methods: A bibliometric analysis was conducted using the Web of Science Core Collection. Publications addressing sarcopenia, exercise, and older adults were analyzed according to publication characteristics, countries, institutions, journals, authors, and research categories. Co-authorship, international collaboration, and keyword co-occurrence analyses were performed using VOSviewer.

Results: A total of 3,074 publications were identified, with a marked increase in research output after 2020. The United States, China, Japan, England, Australia, Spain, and Brazil were among the most productive countries. Leading journals included *Nutrients*, *Experimental Gerontology*, *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, and *BMC Geriatrics*. Keyword co-occurrence analysis identified 173 keywords grouped into eight clusters. Core research themes included sarcopenia, aging, frailty, skeletal muscle, muscle mass, and physical performance. Overlay analysis indicated increasing research attention to exercise interventions, resistance training, nutrition, muscle health, osteosarcopenia, and cardiovascular disease. International collaboration analysis revealed a network involving 55 countries across five collaboration clusters.

Conclusion: Global research on sarcopenia, exercise, and older adults has expanded substantially, particularly since 2020. The research focus has increasingly shifted from age-related muscle loss toward multidimensional approaches incorporating exercise, resistance training, nutrition, and muscle health. These findings highlight the growing integration of sarcopenia research with healthy aging and multimorbidity and underscore the importance of continued international collaboration.

Keywords: *Sarcopenia; Exercise; Older Adults; Bibliometric Analysis; Healthy Aging*

ESKİ (1950'li yıllarda doğanlar) VE YENİ (1999 sonrasında doğanlar) KUŞAKLARIN ALIŞVERİŞ ALIŞKANLIKLARININ FARKLILIKLARININ ANALİZİ

Öznur ALTINER
İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Medya, İletişim ve Siyaset Anabilim Dalı Stratejik Pazarlama ve Marka Yönetimi Programı, Yüksek Lisans Öğrencisi
34398 Maslak, Sarıyer, İstanbul
ORCID ID: 0009-0008-4707-6279
Dr. Öğr. Üyesi Sefa CEYHAN
Nişantaşı Üniversitesi, İktisadi, İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü Öğretim Üyesi
34398 Maslak, Sarıyer, İstanbul
ORCID ID: 0000-0002-3788-0756

ÖZET

Tüketim davranışları, bireylerin yalnızca ekonomik ihtiyaçları doğrultusunda gerçekleştirdikleri satın alma faaliyetlerinden oluşmamakta; bireylerin içinde yetiştikleri tarihsel dönem, toplumsal değerler, kültürel yapı ve teknolojik gelişmeler tarafından da şekillendirilmektedir. Bu bağlamda kuşak kavramı, farklı dönemlerde yetişen bireylerin tüketim alışkanlıklarının ve tüketici davranışlarının anlaşılmasında önemli bir analitik çerçeve sunmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, Boomer ve Z kuşaklarının tüketim ve alışveriş davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemek ve iki kuşak arasında ortaya çıkan farklılıkları tüketim kültürü bağlamında değerlendirmektir. Araştırmada özellikle alışveriş kanalı tercihleri, marka algısı, marka sadakati, kalite beklentisi, tüketim motivasyonları, dijitalleşme ve hedonik tüketim eğilimleri üzerinde durulmaktadır. Çalışmanın bir diğer amacı, dijital dönüşümün tüketici davranışları üzerindeki etkisini kuşak farklılıkları üzerinden değerlendirmek ve farklı kuşakların tüketim pratiklerinin hangi yönlerden ayrıştığını ortaya koymaktır. Araştırma kapsamında Boomer kuşağının daha geleneksel, ihtiyaç ve güven odaklı tüketim anlayışı ile Z kuşağının dijital erişilebilirlik, hız, deneyim ve sosyal medya etkileriyle şekillenen tüketim davranışları karşılaştırılmaktadır. Araştırmada nitel araştırma yöntemi benimsenmiş ve veri toplama yöntemi olarak literatür taramasından yararlanılmıştır. Çalışmanın veri kaynaklarını kuşaklar, tüketim kültürü, tüketici davranışları, dijital tüketim, online alışveriş ve hedonik tüketim konularında gerçekleştirilen akademik çalışmalar ve lisansüstü tezler oluşturmaktadır. Literatür taraması sürecinde "kuşaklar", "Boomer kuşağı", "Z kuşağı", "tüketim davranışı", "dijital tüketim", "online alışveriş" ve "hedonik tüketim" gibi anahtar kavramlardan yararlanılmış; elde edilen çalışmalar araştırmanın konusu ile ilişkisi, akademik niteliği ve güncelliği açısından değerlendirilmiştir. Literatürün karşılaştırmalı değerlendirilmesi sonucunda Boomer kuşağının tüketim davranışlarında güven, kalite, dayanıklılık, planlı harcama, marka bağlılığı ve fiziksel mağaza deneyiminin daha belirgin olduğu görülmektedir. Buna karşılık Z kuşağının tüketim davranışlarında dijital kanallar, sosyal medya, online alışveriş, trendler, deneyim arayışı ve hedonik motivasyonların daha fazla öne çıktığı görülmektedir. Z kuşağının dijital teknolojilerle iç içe yetişmesi, ürün ve marka araştırmalarının çevrimiçi ortamlarda gerçekleştirilmesini ve sosyal medya içeriklerinin satın alma kararları üzerindeki etkisinin artmasını beraberinde getirmektedir. Boomer kuşağında ise geçmiş deneyimlere dayalı güven ve marka sadakati ile yüz yüze alışveriş deneyiminin daha önemli bir konumda olduğu değerlendirilmektedir. Çalışmanın genel değerlendirmesi, kuşaklar arasındaki tüketim farklılıklarının yalnızca yaş değişkeniyle açıklanamayacağını; tarihsel deneyimler, teknolojik dönüşüm, değer sistemleri ve tüketim kültürünün bu farklılıkların oluşumunda

birlikte rol oynadığını göstermektedir. Bu doğrultuda Boomer kuşağında ihtiyaç, güven ve kalite eksenli daha planlı tüketim anlayışı öne çıkarken, Z kuşağında hız, dijital erişilebilirlik, sosyal etkileşim, deneyim ve haz odaklı tüketim eğilimleri dikkat çekmektedir. Bu farklılıkların ortaya konulması, hem kuşak ve tüketici davranışları literatürüne katkı sağlamakta hem de işletmelerin farklı kuşaklara yönelik pazarlama ve iletişim stratejilerini geliştirmeleri açısından önem taşımaktadır.
Anahtar Kelimeler: Kuşaklar, Tüketici Davranışları, Tüketim Kültürü

ANALYSIS OF THE DIFFERENCES IN SHOPPING HABITS BETWEEN THE OLD (THOSE BORN IN THE 1950s) AND NEW (THOSE BORN AFTER 1999) GENERATIONS

ABSTRACT

Consumer behavior does not consist solely of purchasing activities carried out to meet individuals' economic needs. It is also shaped by the historical period in which individuals grow up, social values, cultural structures, and technological developments. In this context, the concept of generation provides an important analytical framework for understanding the consumption habits and consumer behaviors of individuals who have grown up in different periods. The main purpose of this study is to comparatively examine the consumption and shopping behaviors of the Baby Boomer and Generation Z cohorts and to evaluate the differences between the two generations within the context of consumer culture. The study particularly focuses on shopping channel preferences, brand perception, brand loyalty, quality expectations, consumption motivations, digitalization, and hedonic consumption tendencies. Another objective of the study is to examine the impact of digital transformation on consumer behavior through generational differences and to identify the ways in which the consumption practices of different generations diverge. Within this framework, the more traditional, need- and trust-oriented consumption approach of the Baby Boomer generation is compared with the consumption behaviors of Generation Z, which are shaped by digital accessibility, speed, experiences, and social media influence. A qualitative research method was adopted in the study, and literature review was used as the data collection method. The data sources consist of academic studies and postgraduate theses focusing on generations, consumer culture, consumer behavior, digital consumption, online shopping, and hedonic consumption. During the literature review process, keywords such as "generations," "Baby Boomer generation," "Generation Z," "consumer behavior," "digital consumption," "online shopping," and "hedonic consumption" were used. The studies obtained through these searches were evaluated according to their relevance to the research topic, academic quality, and currency. The comparative evaluation of the literature indicates that trust, quality, durability, planned spending, brand loyalty, and physical store experiences are more prominent in the consumption behaviors of the Baby Boomer generation. In contrast, digital channels, social media, online shopping, trends, experiential consumption, and hedonic motivations are more prominent in the consumption behaviors of Generation Z. Generation Z's upbringing in an environment closely integrated with digital technologies has increased the use of online platforms for product and brand research and strengthened the influence of social media content on purchasing decisions. For the Baby Boomer generation, on the other hand, trust based on previous experiences, brand loyalty, and face-to-face shopping experiences appear to hold a more important position. The overall evaluation of the study indicates that differences in consumption between generations cannot be explained solely by age; historical experiences, technological transformation, value systems, and consumer culture collectively contribute to the emergence of these differences. Accordingly, a more planned consumption approach centered on needs, trust, and quality is

prominent among Baby Boomers, whereas speed, digital accessibility, social interaction, experiences, and hedonic consumption tendencies are more evident among Generation Z. Identifying these differences contributes to the literature on generations and consumer behavior and is also important for businesses in developing marketing and communication strategies targeting different generations.

Keywords: Generations, Consumer Behavior, Consumer Culture

ANZER YAYLASI'NDAN ELDE EDİLEN ARI POLENİNİN MELİSSOPALİNOLOJİK TANIMLANMASI İÇİN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ BİR YAKLAŞIM OLARAK TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOPİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Esra DEMİR KANBUR
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, 53020, Merkez RİZE
ORCID:0000-0002-0222-1865

ÖZET
Arı poleni, bal arılarının kullandığı çiçek kaynakları hakkında değerli bilgiler sağlar ve polen tanelerinin doğru morfolojik tanımlanması, arı ürünlerinin botanik karakterizasyonu için önemlidir. Bu çalışma, 2025 yılında Türkiye'nin Rize ilinin Anzer Platosu'ndan toplanan bir arı poleni örneğinde polen morfotiplerinin melissopalynolojik tanımlanması için yüksek çözünürlüklü bir yaklaşım olarak taramalı elektron mikroskobunun (SEM) uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Örnek hazırlığı için, 1,0 g arı poleni 1 mL metanolde süspansiyon haline getirildi ve vorteks karıştırıcı ile homojenleştirildi. Süspansiyonun 100 µL'lik bir kısmı iletken karbon bant üzerine yerleştirildi, 50 °C'de 3 saat kurutuldu ve 6 dakika boyunca altınla kaplandı. Hazırlanan örnek, 15 kV'de bir JEOL SEM kullanılarak incelendi. Polen taneleri, genel şekil, açıklık konfigürasyonu ve ekzin süslemesi dahil olmak üzere tanısal özelliklere göre morfolojik olarak değerlendirildi. SEM görüntüleme, polen yüzey yapılarının ayrıntılı görselleştirilmesini sağladı ve farklı polen morfotürleri arasında morfolojik ayrımı kolaylaştırdı. Bulgular, SEM'in melissopalynolojik araştırmalarda arılar tarafından toplanan polenlerin morfolojik tanımlanması için yararlı, yüksek çözünürlüklü tamamlayıcı bir yaklaşım sağlayabileceğini göstermektedir.
Anahtar Kelimeler: Arı poleni, Anzer Yaylası, Taramalı elektron mikroskobu, SEM, Melissopalinoloji, Polen morfolojisi, Eksin süslenmesi

EXPLORING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY AS A HIGH-RESOLUTION APPROACH FOR MELISSOPALYNOLOGICAL IDENTIFICATION OF BEE POLLEN FROM ANZER PLATEAU

ABSTRACT
Bee pollen provides valuable information on the floral resources utilized by honeybees, and accurate morphological identification of pollen grains is important for the botanical characterization of bee products. This study aimed to evaluate the applicability of scanning electron microscopy (SEM) as a high-resolution approach for melissopalynological identification of pollen morphotypes in a bee pollen sample collected from Anzer Plateau, Rize, Türkiye, in 2025. For sample preparation, 1.0 g of bee pollen was suspended in 1 mL of methanol and homogenized by vortex mixing. A 100 µL aliquot of the suspension was deposited onto conductive carbon tape, dried at 50 °C for 3 h, and sputter-coated with gold for 6 min. The prepared sample was examined using a JEOL SEM at 15 kV. Pollen grains were morphologically evaluated according to diagnostic characteristics, including overall shape, aperture configuration, and exine ornamentation. SEM imaging enabled detailed visualization of pollen surface structures and facilitated morphological discrimination among different pollen morphotypes. The findings indicate that SEM can provide a useful high-resolution

complementary approach for the morphological identification of bee-collected pollen in melissopalynological investigations.

Keywords: Bee pollen, Anzer Plateau, scanning electron microscopy, SEM, melissopalynology, pollen morphology, exine ornamentation

TÜRKÇE KİTLESEL FONLAMA VERİLERİ ÜZERİNDE KÜÇÜK DİL MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: DİL UYUMLULUĞU, LoRA İLE ALAN-ÖZEL EĞİTİM VE BÜYÜK DİL MODELLERİYLE PERFORMANS FARKI

Kağan Mert SÜRÜCÜ
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye
ORCID ID: 0009-0000-0499-3984
Kemal Alaykıran
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye
ORCID ID: 0000-0003-0113-8784

ÖZET
Büyük dil modelleri doğal dil üretiminde yüksek performans sunmakla birlikte, hesaplama gereksinimleri ve kullanım maliyetleri nedeniyle daha küçük modellerin alan-özel uygulamalarda ne ölçüde uzmanlaştırılabileceği sorusunu önemli hâle getirmektedir. Bu çalışma, Türkçe girişimcilik ve kitlesel fonlama alanında küçük dil modellerinin alan-özel eğitimle performans gelişimini ve modelin temel dili ile Türkçe eğitim verisi arasındaki uyumun bu süreç üzerindeki etkisini incelemektedir. Bu amaçla, temel dili Türkçe olmayan Qwen3-0.6B modeli ile temel dili Türkçe olan Kumru-2B aynı Türkçe alan verisi üzerinde karşılaştırılmıştır. Fonbulucu.com üzerindeki halka açık kitlesel fonlama içeriklerinden oluşturulan veri kümesi, görev tabanlı instruction-response yapısına dönüştürülmüş ve GPT-4 destekli sentetik veri üretimiyle genişletilmiştir. Her iki model LoRA yöntemiyle alan-özel olarak ince ayarlanmış; eğitim öncesi ve sonrası üretimler ROUGE, BLEU, METEOR ve GPT-4o tabanlı ikili LLM-as-a-Judge değerlendirmesiyle incelenmiştir. Bulgular, Türkçe odaklı modelin alan-özel eğitim öncesinde daha güçlü bir başlangıç performansı sergilediğini, buna karşılık daha küçük ve genel amaçlı modelin alan-özel eğitimden daha fazla yararlanarak referans tabanlı değerlendirme ölçütlerinde öne geçebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, büyük dil modelleri ile yapılan karşılaştırmalar, küçük modellerdeki belirgin gelişime rağmen genel üretim kalitesinde önemli bir performans farkının devam ettiğine işaret etmektedir. Sonuçlar, alan-özel eğitimin küçük dil modellerinin performansını önemli ölçüde artırabildiğini; ancak model ölçeği, ön-eğitim dili uyumluluğu ve değerlendirme yaklaşımının birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.
Anahtar kelimeler: küçük dil modelleri, kitlesel fonlama, dil uyumluluğu, LoRA, alan-özel ince ayar, büyük dil modelleri, LLM-as-a-Judge

COMPARISON OF SMALL LANGUAGE MODELS ON TURKISH CROWDFUNDING DATA: LANGUAGE ALIGNMENT, DOMAIN-SPECIFIC TRAINING WITH LoRA, AND THE PERFORMANCE GAP TO LARGE LANGUAGE MODELS

ABSTRACT
Although large language models achieve high performance in natural language generation, their computational requirements and usage costs raise an important question: to what extent can smaller models be specialized for domain-specific applications? This study examines the performance gains of small language models through domain-specific training in the Turkish

entrepreneurship and crowdfunding domain, as well as the effect of alignment between a model's base language and the language of the Turkish training data on this process. To this end, Qwen3-0.6B, whose base language is not Turkish, and Kumru-2B, whose base language is Turkish, were compared using the same Turkish domain dataset. The dataset was constructed from publicly available crowdfunding content on Fonbulucu.com, transformed into a task-based instruction-response format, and expanded through GPT-4-assisted synthetic data generation. Both models were fine-tuned for the domain using LoRA, and their outputs before and after training were evaluated using ROUGE, BLEU, METEOR, and a GPT-4o-based pairwise LLM-as-a-Judge approach. The findings indicate that the Turkish-focused model exhibits stronger initial performance before domain-specific training, whereas the smaller general-purpose model benefits more from domain-specific adaptation and can take the lead on reference-based evaluation metrics. Comparisons with large language models further indicate that, despite the marked improvement of the small models, a substantial gap in overall generation quality remains. The results suggest that domain-specific training can significantly improve small language models; however, model scale, pre-training language alignment, and evaluation methodology should be considered jointly.

Keywords: small language models, crowdfunding, language alignment, LoRA, domain-specific fine-tuning, large language models, LLM-as-a-Judge

PARANIN MOTİVASYON GÜCÜ: PERFORMANSA DAYALI EK ÖDEME SİSTEMİNİN ÇALIŞAN DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Cansu CEYHAN
İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnsan Kaynakları Yönetimi (Tezli), 34398 Maslak, Sarıyer, İstanbul
ORCID ID: 0009-0008-4182-7131
Dr. Gökhan DEMİRAY
İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Otel Lokanta ve İkram Hizmetleri Bölümü, Turizm ve Otel İşletmeciliği Programı, 34413 Kağıthane, İstanbul
ORCID ID: 0000-0002-6417-1293

ÖZET

Bu araştırmanın amacı, performansa dayalı ek ödeme sistemlerinin (teşvik vb.) çalışan davranışları üzerindeki etkisini çalışanların deneyimleri ve algıları üzerinden derinlemesine incelemek ve paranın örgütsel bağlamdaki motivasyon gücünü ortaya koymaktır. Araştırmada, performansa dayalı ek ödeme uygulamalarının çalışan motivasyonu, iş performansı, içsel motivasyon, örgütsel bağlılık ve davranışsal yönelimler üzerindeki etkileri ile bu etkileri şekillendiren koşullar ele alınmaktadır. Bu doğrultuda nitel araştırma yaklaşımı benimsenerek çalışanların konuya ilişkin görüşlerinin tematik analiz yoluyla değerlendirilmesi planlanmaktadır. Araştırma, İstanbul'da faaliyet gösteren ve performansa dayalı ek ödeme sistemlerini uygulayan kamu ve özel sektör kuruluşlarında çalışan bireyler üzerinde yürütülmek üzere tasarlanmıştır. Örneklem, kolayda ve kartopu örnekleme yöntemleriyle gönüllü katılımcılardan oluşturulacak; farklı sektörlerin, yaşların, cinsiyetlerin, eğitim düzeylerinin, çalışma sürelerinin ve görev pozisyonlarının temsil edilmesine özen gösterilecektir. Veri toplama aracı, demografik sorular ile performansa dayalı ek ödeme sistemlerine ilişkin algıları ölçen, literatürde desteklenen ölçeklerden yararlanılmış açık uçlu anket formundan oluşmaktadır. Saha araştırması sonucunda elde edilecek verilerle kod, alt tema ve ana temaların oluşturulması planlanmaktadır. Araştırmanın tematik yapısında "Paranın ve Performansa Dayalı Ödüllerin Motivasyon Üzerindeki Etkisi", "Çalışan Davranışları ve Örgütsel Sonuçlar", "Adalet ve Şeffaflık Algısı" ve "Bireysel ve Örgütsel Koşullar" ana temalarının ele alınması öngörülmektedir. Bu temalar altında maddi ödülün motive edici gücü, içsel motivasyon, performans ve çaba, örgütsel bağlılık, rekabet ve iş birliği, ücret adaleti, performans değerlendirme süreçlerinin şeffaflığı, bireysel beklenti ve ihtiyaçlar ile insan kaynakları uygulamalarına ilişkin alt temaların incelenmesi amaçlanmaktadır. Katılımcı ifadelerinden hareketle maddi ödül, performans artışı, içsel motivasyon, bağlılık, adalet, şeffaflık, rekabet, iş birliği ve bireysel beklentiler gibi kodların oluşturulması planlanmaktadır. Araştırmanın teorik katkısı, performansa dayalı ödüllendirme ile çalışan davranışları arasındaki ilişkinin yalnızca ekonomik teşvik perspektifinden değil, motivasyon, adalet, şeffaflık ve bireysel farklılıklar bağlamında bütüncül biçimde ele alınmasına katkı sağlamasıdır. Pratik katkısı ise yöneticilere ve insan kaynakları profesyonellerine, daha adil, şeffaf, çalışan ihtiyaçlarını dikkate alan ve sürdürülebilir performans ödüllendirme sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çıkarımlar sunmasıdır.

Anahtar kelimeler: Motivasyon, teşvik, performans, insan kaynakları

THE MOTIVATIONAL POWER OF MONEY: THE EFFECT OF A PERFORMANCE-BASED INCENTIVE SYSTEM ON EMPLOYEE BEHAVIOR

ABSTRACT

This study aims to examine the effects of performance-based additional payment systems (e.g., incentives) on employee behavior, drawing on employees' experiences and perceptions, and to reveal the motivational power of money in an organizational context. The study focuses on their effects on employee motivation, job performance, intrinsic motivation, organizational commitment, and behavioral orientations, as well as shaping conditions. A qualitative research approach will be adopted, and employees' views will be analyzed through thematic analysis. The study will be conducted among individuals working in public- and private-sector organizations in Istanbul that implement performance-based additional payment systems. The sample will consist of voluntary participants recruited through convenience and snowball sampling, with attention to diversity in sector, age, gender, education, tenure, and position. Data will be collected using an open-ended questionnaire informed by scales supported by literature. Based on the field data, codes, subthemes, and main themes will be developed. The thematic structure is expected to include "The Effects of Money and Performance-Based Rewards on Motivation," "Employee Behaviors and Organizational Outcomes," "Perceptions of Fairness and Transparency," and "Individual and Organizational Conditions." These themes will encompass monetary rewards, intrinsic motivation, performance and effort, organizational commitment, competition and cooperation, pay equity, transparency in performance evaluation, individual expectations and needs, and human resource practices. Codes such as monetary rewards, increased performance, intrinsic motivation, commitment, fairness, transparency, competition, cooperation, and individual expectations will be derived from participants' accounts. The theoretical contribution lies in developing a holistic understanding of performance-based rewards and employee behavior by incorporating motivation, fairness, transparency, and individual differences alongside economic incentives. Its practical contribution is to provide implications for managers and human resource professionals for developing fairer, more transparent, employee-centered, and sustainable performance reward systems.

Keywords: Motivation, Incentives, Performance, Human Resources

TÜRKİYE'DE GÜNDEM BELİRLEME ARAŞTIRMALARININ SİSTEMATİK HARİTASI: DÜZEY, YÖNTEM VE PLATFORM DAĞILIMI (2020-2026)

Dr. Öğr. Üyesi İnanç Alikılıç
Muş Alparslan University, Faculty of Applied Sciences, Department of Information Systems and Technologies, Muş
ORCID ID: 0000-0001-9079-8420

ÖZET

Gündem belirleme araştırmaları uluslararası literatürde elli yılı aşkın bir birikime ulaşmış olmasına karşın, Türkiye'deki üretimin düzey, yöntem ve platform dağılımı bugüne dek sistematik biçimde haritalanmamıştır. Mevcut Türkçe değerlendirmeler ya sınırlı bir dönemi kapsamakta ya da yalnızca makale düzeyindeki üretimi betimlemektedir; alanın en kapsamlı mevcut değerlendirmesi on altı çalışmayı incelemektedir. Ön taramada YÖK Ulusal Tez Merkezi'nde 2020-2026 aralığında tamamlanan seksen tez ile DergiPark'ta 'gündem belirleme' ifadesinin geçtiği 16.130 makale tespit edilmiş; başlık ve özet düzeyindeki iki aşamalı denetim sonucunda konuyla doğrudan ilgili 43 makale ve 80 tez olmak üzere 123 çalışma kodlama setine alınmıştır. Bu çalışma, Türkiye'de 2020-2026 arasında üretilen gündem belirleme araştırmalarının sistematik haritasını çıkarmaktadır. İzlenen yol, Su ve Xiao'nun (2021) medyalar arası gündem belirleme literatürü için geliştirdiği kodlama şemasının Türkçe korpusa uyarlanmasıdır; şema her çalışmanın gündem belirleme düzeyini (birinci düzey, ikinci düzey, ağ gündemi), araştırma yöntemini, incelediği platform ve medya türünü, dönemini ve örneklemini kaydetmektedir. Başlık, özet ve anahtar kelime düzeyinde konuyla doğrudan ilgili çalışmalar kodlama için süzülmekte; 2024-2026 arasında tamamlanan ve henüz hakemli yayına dönüşmemiş doktora tezleri özel olarak taranmaktadır. Kodlama iki aşamalı yürütülmekte, güvenirlik Krippendorff alfa ile raporlanmaktadır. Bulgular; düzey, yöntem ve platform dağılımını betimleyen tablolar ve yıllara göre eğilimler olarak sunulacaktır. Çalışma iki ayrı katkı sunmaktadır: Su ve Xiao'nun şemasının Türkiye bağlamına uyarlanmasıyla karşılaştırmalı araştırmalar için kullanılabilir bir çerçeve sunulmakta; doktora tezlerinde birikmiş ancak hakemli dergilerde karşılığı bulunmayan ampirik bulgular envantere alınmaktadır.

Anahtar kelimeler: gündem belirleme, medyalar arası gündem belirleme, sistematik harita, Türkiye, içerik analizi

A SYSTEMATIC MAP OF AGENDA-SETTING RESEARCH IN TÜRKİYE: LEVEL, METHOD, AND PLATFORM DISTRIBUTION (2020-2026)

ABSTRACT

Although agenda-setting research has accumulated over five decades internationally, the level, method, and platform distribution of research produced in Türkiye has never been mapped systematically. Existing Turkish-language assessments either cover a limited period or describe only journal articles; the most comprehensive assessment to date examines sixteen studies. A preliminary screening identified eighty theses completed between 2020 and 2026 in the National Thesis Center and 16,130 DergiPark articles mentioning the phrase; following a two-stage title-and-abstract review, 43 articles and 80 theses (123 studies in total) entered the coding set. This study produces a systematic map of agenda-setting research conducted in Türkiye between 2020 and 2026. The approach adapts the coding scheme developed by Su and Xiao (2021) for the intermedia agenda-setting literature to the Turkish corpus; the scheme records each study's agenda-setting level, research method, platform, media type, period, and sample.

Studies directly relevant at the level of title, abstract, and keywords are being filtered for coding, and doctoral theses completed between 2024 and 2026 that have not yet produced peer-reviewed publications are screened separately. Coding proceeds in two stages, and reliability is reported with Krippendorff's alpha. Findings will be presented as tables describing the distribution of level, method, and platform, together with year-by-year trends. The study makes two distinct contributions: it adapts Su and Xiao's scheme to the Turkish context, providing a reusable framework for comparative research, and it inventories empirical findings accumulated in doctoral theses that have no peer-reviewed counterpart.

Keywords: agenda-setting, intermedia agenda-setting, systematic map, Türkiye, content analysis

KANITA DAYALI SOSYAL POLİTİKA TASARIMINDA YENİLİKÇİ ARAŞTIRMA YÖNTEMLERİNİN ROLÜ: LONDON SCHOOL OF ECONOMİCS ÖRNEĞİ

Prof. Dr. Gözde KOSA
Kafkas Üniversitesi, İktisadi İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Kars
ORCID ID: 0000-0003-4252-6994

ÖZET

Kamu politikası yapım süreçlerinin karmaşıklığı, hızlanan toplumsal değişim ve artan veri hacmi karşısında geleneksel sosyal araştırma yöntemlerinin tek başına yeterli olup olmadığı sorusu, son yirmi yılda hem akademik hem de politika yapıcıları özelinde giderek daha fazla tartışılmaktadır. Anket, yapılandırılmış görüşme ve doküman analizi gibi klasik araçlar, sosyal olguların derinlemesine anlaşılmasına katkı sunmakla birlikte; zamanlama, ölçek, maliyet ve gerçek zamanlı geri bildirim açısından sınırlılıklar taşımaktadır. Geleneksel yöntemlerin değişen sosyal sorunların çok boyutlu doğasını açıklamakta ve müdahalelerin etkisini ölçmekte yetersiz kalması, alanda yenilikçi araştırma yöntemlerine duyulan ihtiyacı belirginleştirmektedir. Bu bağlamda randomize kontrollü deneyler, davranışsal içgörü uygulamaları, büyük veri analitiği, karma yöntem tasarımları ve ortak-tasarım süreçleri, kanıta dayalı sosyal politikanın metodolojik altyapısını yeniden şekillendiren yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı, yenilikçi sosyal araştırma yöntemlerinin sosyal politika tasarım sürecindeki işlevlerini kavramsal bir çerçevede ele almaktır. Çalışma, söz konusu yöntemlerin hangi koşullarda ve politika döngüsünün hangi aşamalarında katma değer ürettiğini; bu yöntemlerin geleneksel yaklaşımların yerini mi aldığını yoksa onları tamamlayıcı bir işlev mi gördüğünü sorgulamaktadır. Çalışmada söz konusu yenilikçi araştırma yöntemlerinin kanıta dayalı sosyal politika tasarımındaki işlevleri, London School of Economics (LSE) özelinde incelenmiştir. LSE'nin politika odaklı araştırma birimleri özellikle davranışsal kamu politikası, veri bilimi ve uluslararası eşitsizlikler alanlarında faaliyet gösteren merkezleri akademik araştırma ile politika yapım süreçleri arasındaki köprüyü kurumsallaştıran örnek uygulamalar sunmaktadır. Çalışma kapsamında bu birimlerin yöntemsel tercihleri, araştırma-politika arayüzünü nasıl işlettikleri ve elde edilen bulguların politika belgelerine dönüşüm süreçleri nitel doküman analizi ve örnek olay incelemesi yoluyla ele alınacaktır. Çalışma kapsamında LSE örneğinden hareketle, yenilikçi araştırma yöntemlerinin kurumsal kapasite geliştirme, disiplinlerarası iş birliği ve dijital veri altyapılarıyla bütünleşme boyutlarında sağladığı katkıları ortaya koymak ve bu birikimin Türkiye'deki sosyal politika tasarım süreçlerine aktarılabilirliği tartışılmaktadır. Çalışmanın hem akademik literatüre hem de kanıta dayalı politika yapımına yönelik kurumsal tasarım önerilerine katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilikçi araştırma yöntemleri, sosyal politika tasarımı, veri bilimi

THE ROLE OF INNOVATIVE RESEARCH METHODS IN EVIDENCE-BASED SOCIAL POLICY DESIGN: THE CASE OF THE LONDON SCHOOL OF ECONOMICS

ABSTRACT

The question of whether traditional social research methods alone are sufficient in the face of the growing complexity of public policy-making processes, accelerating social change, and increasing data volumes has been the subject of growing debate among both academics and policymakers over the past two decades. Classical tools such as surveys, structured interviews, and document analysis contribute to an in-depth understanding of social phenomena, yet they

exhibit limitations in terms of timing, scale, cost, and real-time feedback. The inadequacy of traditional methods in capturing the multidimensional nature of evolving social problems and in measuring the impact of interventions has made the need for innovative research methods increasingly apparent. In this context, randomized controlled trials, behavioural insights applications, big data analytics, mixed-method designs, and co-design processes have emerged as approaches that are reshaping the methodological infrastructure of evidence-based social policy. The purpose of this study is to examine, within a conceptual framework, the functions of innovative social research methods in the social policy design process. The study investigates under what conditions and at which stages of the policy cycle these methods generate added value, and whether they replace traditional approaches or serve a complementary function. The functions of these innovative research methods in evidence-based social policy design are examined with specific reference to the London School of Economics (LSE). LSE's policy-oriented research units—particularly those operating in the fields of behavioural public policy, data science, and international inequalities—offer exemplary practices that institutionalise the bridge between academic research and policy-making processes. Within the scope of the study, the methodological preferences of these units, how they operate the research–policy interface, and the processes through which their findings are translated into policy documents are addressed through qualitative document analysis and case study methods. Drawing on the LSE case, the study aims to reveal the contributions of innovative research methods in terms of institutional capacity building, interdisciplinary collaboration, and integration with digital data infrastructures, and discusses the transferability of this accumulated experience to social policy design processes in Türkiye. The study is expected to contribute both to the academic literature and to institutional design proposals for evidence-based policy-making.

Keywords: Innovative research methods, social policy design, data science

METABOLİK SENDROM VE OSTEOARTRİT İLİŞKİSİNDE ADİPONEKTİN VE PIICP'NİN ROLÜ

Dr. Öğr. Üyesi Ülker HACIYEVA
Azerbaijan Medical University, Department of Biochemistry, Baku, Azerbaijan
ORCID ID: 0009-0009-7180-1503
Prof. Dr. Gülnare AZİZOVA
Azerbaijan Medical University, Department of Biochemistry, Baku, Azerbaijan
ORCID ID: 0009-0004-1902-2856
Assistant Prof. Dr. Hikmet MEMMEDOV
Karabakh University, Faculty of Medicine and Health Sciences, Department of Biochemistry, Khankendi, Azerbaijan
ORCID ID: 0000-0002-8012-0445

ÖZET

Çalışmamızın amacı, metabolik sendromun osteoartriti (OA) nasıl etkilediğini araştırmaktır. Bunun için, Azerbaycan Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı Travmatoloji ve Ortopedi Bilimsel Araştırma Enstitüsü'ne başvuran OA teşhisi konmuş bireylerden kan örnekleri alınarak serum adiponektin (ADPN) ve tip II prokollajenin C-terminal propeptidi (PIICP) düzeyleri ölçülmüştür. Katılımcılar 3 gruba ayrılmışdır: grup I metabolik sendromu olan OA-lı hastalar (65 kişi), grup II metabolik sindromu olmayan OA-lı hastalar (36 kişi) ve grup III- kontrol grubu- metabolik sindrom və OA bulunmayan kişiler (26 kişi). Gruplara göre ortalama yaş değerleri: grup I'de 58.29±6.78, grup II'de 54.17±8.40 ve grup III'de 52.12±8.93 olmuştur. Yaş değişkeni, potansiyel karıştırıcı faktör olarak ele alınmıştır. Gruplar arası karşılaştırma için Kruskal–Wallis H testi, biyobelirteçler arasındaki ilişkileri değerlendirmek amacıyla korelasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Değişkenlerin dağılım özellikleri dikkate alınarak Spearman sıra korelasyon katsayısı kullanılmış, istatistiksel anlamlılık düzeyi $p<0.05$olarak kabul edilmiştir. Grup I'de ortalama serum ADPN düzeyi 5,29±0,85 ng/mL iken, grup II'de 6,53±2,59 ng/mL ve kontrol grubunda 6,27±2,62 ng/mL, ortalama serum PIICP düzeyleri ise grup I'de 124.89±44.24 pg/ml iken, grup II'de 162.42±28.72 pg/ml ve kontrol grubunda 184.75±58.39 pg/ml olmuştur. Gruplar arası serum APDN ve PIICP düzeylerinin karşılaştırılması zamanı grup I diğer gruplardan istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde farklılık göstermiştir ($p <0.001$). Adiponektin ile PIICP arasında orta düzeyde pozitif korelasyon gözlenmiştir ($\rho=0,44$, $p<0,001$). Gözlemlenen fark metabolik sendromun OA şiddetine etki etdiyini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Adiponektin, metabolik sendrom, osteoartrit, PIICP

THE ROLE OF ADIPONECTIN AND PIICP IN THE RELATIONSHIP BETWEEN METABOLIC SYNDROME AND OSTEOARTHRITIS

ABSTRACT

The aim of our study was to investigate how metabolic syndrome affects osteoarthritis (OA). To this end, serum adiponectin (ADPN) and type II procollagen C-terminal propeptide (PIICP) levels were measured in blood samples obtained from individuals diagnosed with OA who presented to the Scientific Research Institute of Traumatology and Orthopedics of the Ministry of Health of the Republic of Azerbaijan. Participants were divided into three groups: Group I, OA patients with metabolic syndrome (65 individuals); Group II, OA patients without metabolic syndrome (36 individuals); and Group III (control group), individuals without metabolic syndrome and OA (26 individuals). Mean ages for the groups were 58.29±6.78 for

group I, 54.17±8.40 for group II, and 52.12±8.93 for group III. Age was considered a potential confounding factor. The Kruskal–Wallis H test was used for inter-group comparisons, and correlation analyses were performed to evaluate the relationships between biomarkers. The Spearman rank correlation coefficient was used, taking into account the distribution characteristics of the variables, and the level of statistical significance was set at $p<0.05$. The mean serum ADPN level was 5.29±0.85 ng/mL in group I, 6.53±2.59 ng/mL in group II, and 6.27±2.62 ng/mL in the control group; the mean serum PIICP levels were 124.89±44.24 pg/mL in group I, 162.42±28.72 pg/mL in group II, and 184.75±58.39 pg/mL in the control group. Upon comparison of serum ADPN and PIICP levels across the groups, Group I differed significantly from the other groups ($p <0.001$). A moderate positive correlation was observed between ADPN and PIICP ($\rho=0.44$, $p<0.001$). The observed difference indicates that metabolic syndrome affects the severity of OA.

Keywords: Adiponectin, metabolic syndrome, osteoarthritis, PIICP

MEZENKİMAL KÖK HÜCRELERDE KURKUMİNİN REPLİKATİF SENESENS ÜZERİNE POTANSİYEL ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Nilay İŞİTEZ
Afyonkarahisar Health Sciences University, Faculty of Pharmacy, Department of Basic Pharmaceutical Sciences, 33030, Afyonkarahisar
ORCID ID: 0000-0002-1928-7158
Dr. Öğr. Üyesi Hakan DARICI
Istinye University, Faculty of Medicine, Department of Basic Medical Sciences, 34396, Istanbul
ORCID ID: 0000-0001-9393-554X

ÖZET
Hücresel yaşlanma hem hücreyi hem de organizmayı etkileyen genetik ve çevresel faktörlere bağlı olarak meydana gelen kararlı bir hücre döngüsü duraksamasıdır. Mezenkimal kök hücreler, vücudun bağ dokularında bulunan ve farklı hücre tiplerine dönüşme özelliğine sahip olan kök hücrelerdir. Yaşlanma sürecine bağlı olarak mezenkimal kök hücrelerin proliferasyon ve farklılaşma kapasiteleri gibi fonksiyonları da azalmaktadır. Kurkumin; antioksidan, antiinflamatuvar ve antiapoptotik gibi farklı biyolojik aktiviteleri sayesinde hücresel yaşlanma süreçlerinde ilgi gören doğal bir bileşiktir. Bu çalışmada, ardışık pasajlama ile oluşturulan yaşlanmanın β-galaktosidaz düzeyleri üzerinden değerlendirilmesi ve kurkuminin genç ve yaşlı mezenkimal kök hücrelerin canlılığı üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Mezenkimal kök hücreler ardışık pasajlama yöntemi ile çoğaltıldıktan sonra genç ve yaşlı hücre grupları oluşturuldu. Hücresel yaşlanmanın doğrulanması amacıyla β-galaktosidaz düzeyleri spektrofotometrik olarak belirlendi. Hücre sayısı ve canlılıklarındaki farklılıkların β-galaktozidaz ölçümleri üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla β-galaktozidaz ölçümleri MTT analizi ile kombine edildi ve β-Gal/MTT oranı hesaplandı. Senesensin doğrulanmasının ardından genç ve yaşlı hücrelere farklı konsantrasyonlarda kurkumin uygulandı ve hücre canlılığı MTT analizi ile değerlendirildi. Bulgular sonucunda, yaşlı mezenkimal kök hücrelerde β-Gal/MTT oranının genç hücrelere kıyasla artması, ardışık pasajlama ile oluşturulan replikatif senesens modelini desteklemiştir. Farklı konsantrasyonlarda kurkumin uygulamasının ardından gerçekleştirilen MTT analizinde, genç ve senesens hücrelerin kurkumine karşı hücre canlılığı yanıtlarının genel olarak benzer olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, ardışık pasajlamanın mezenkimal kök hücrelerde replikatif senesens ile uyumlu değişikliklere yol açtığı ve β-galaktosidaz aktivitesinin hücre canlılığı ile birlikte değerlendirilmesinin senesens karakterizasyonuna katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.
Anahtar kelimeler: Mezenkimal kök hücre, replikatif senesens, kurkumin, SA-β-galaktosidaz, hücre canlılığı

EVALUATION OF THE POTENTIAL EFFECT OF CURCUMIN ON REPLICATIVE SENESCENCE IN MESENCHYMAL STEM CELLS

ABSTRACT
Cellular senescence is a state of stable cell-cycle arrest that occurs in response to genetic and environmental factors affecting both cells and the organism. Mesenchymal stem cells are stem cells found in connective tissues of the body and have the capacity to differentiate into various cell types. With aging, several functional properties of mesenchymal stem cells, including their

proliferative and differentiation capacities, decline. Curcumin is a natural compound that has attracted considerable interest in cellular senescence research due to its diverse biological activities, including antioxidant, anti-inflammatory, and anti-apoptotic effects. This study aimed to evaluate senescence induced by serial passaging based on β-galactosidase levels and to investigate the effects of curcumin on the viability of young and senescent mesenchymal stem cells. Mesenchymal stem cells were expanded through serial passaging to establish young and senescent cell groups. To confirm cellular senescence, β-galactosidase levels were determined spectrophotometrically. To minimize the potential influence of differences in cell number and viability on β-galactosidase measurements, β-galactosidase measurements were combined with MTT analysis, and the β-Gal/MTT ratio was calculated. Following confirmation of senescence, young and senescent cells were treated with different concentrations of curcumin, and cell viability was assessed using the MTT assay. The results showed that the β-Gal/MTT ratio was higher in senescent mesenchymal stem cells than in young cells, supporting the establishment of a replicative senescence model through serial passaging. Following treatment with different concentrations of curcumin, MTT analysis demonstrated that young and senescent cells exhibited generally similar cell viability responses to curcumin. In conclusion, serial passaging induced changes consistent with replicative senescence in mesenchymal stem cells, and evaluating β-galactosidase activity together with cell viability may contribute to the characterization of cellular senescence.

Keywords: Mesenchymal stem cells, replicative senescence, curcumin, SA-β-galactosidase, cell viability

ENFEKSİYONU TAKLİT EDEN AKUT KALSİYUM PİROFOSFAT KRİSTAL ARTRİTİ: NONAGENARİAN BİR HASTADA TANISAL GÜÇLÜK

Uzm. Dr. Hasret DEMİREL
Suleyman Demirel University, Faculty of Medicine, Department of Internal Medicine, Isparta, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-5548-3797

ÖZET

Giriş: Kalsiyum pirofosfat birikim hastalığı (CPPD), ileri yaşta sık görülen ancak enfeksiyöz ve inflamatuar artritleri taklit edebilmesi nedeniyle tanısal güçlük yaratan bir kristal artropatisidir. Bu olgu sunumunda, başlangıçta selülit ön tanısıyla antibiyotik tedavisi verilen ancak yanıt alınamayan nonagenarian (90 yaşında) bir hastada ultrasonografi yardımıyla konulan CPPD tanısı ve yönetiminin sunulması amaçlanmıştır.

Olgu Sunumu: Doksan yaşında kadın hasta, sağ el dorsumunda ani gelişen şişlik, kızarıklık ve ağrı nedeniyle değerlendirilmiş ve selülit ön tanısıyla antibiyotik tedavisi başlanmıştı. Başlangıçta kısmi klinik ve biyokimyasal düzelme gözlenmesine rağmen, bir aylık antibiyotik tedavisi sırasında el bileği, dirsek ve omuz eklemlerinde yeni ağrılar gelişti ve C-reaktif protein (CRP) düzeyi 157 mg/L'ye yükseldi. Romatoid faktör ve anti-siklik sitrülinlenmiş peptit antikorları negatifti. Serolojik incelemelerde romatoid faktör (RF) ve anti-siklik sitrülinlenmiş peptit antikorları (anti-CCP) negatif saptandı. Polimiyalji romatika ve romatoid artrit ön tanıları klinik ve laboratuvar bulgularla uzaklaştırıldı. Ultrasonografik değerlendirmede belirgin sinovyal inflamasyon ve kristal artropatisi ile uyumlu görünüm saptanarak CPPD tanısı konuldu. Metilprednizolon ve kolşisin tedavisi başlanan hastanın 11. günde CRP düzeyi 3 mg/L'ye geriledi ve klinik bulguları tam düzelme gösterdi. İzlemde tedaviler kademeli olarak sonlandırılırken klinik ve biyokimyasal iyilik hali devam etti.

Sonuç: İleri yaşta enfeksiyonu taklit eden, antibiyotik tedavisine beklenen yanıtı vermeyen yeni başlangıçlı inflamatuar artritlerde CPPD ayırıcı tanıda düşünülmelidir. Ultrasonografi, özellikle tanısal belirsizliğin bulunduğu olgularda CPPD'nin erken tanınmasına ve uygun tedavinin gecikmeden başlanmasına önemli katkı sağlayabilir.

Anahtar kelimeler: Kalsiyum pirofosfat birikim hastalığı; akut CPP kristal artriti; ileri yaş; kristal artropatisi; ultrasonografi; selülit.

ACUTE CALCIUM PYROPHOSPHATE CRYSTAL ARTHRITIS MIMICKING INFECTION IN A NONAGENARIAN PATIENT: A DIAGNOSTIC CHALLENGE

ABSTRACT

Background: Calcium pyrophosphate deposition (CPPD) disease is a common crystal arthropathy in the elderly; however, it poses diagnostic challenges due to its ability to mimic infectious and inflammatory arthritides. This case report aims to present the diagnosis and management of CPPD, facilitated by ultrasonography, in a nonagenarian (90-year-old) patient who was initially treated with antibiotics under the preliminary diagnosis of cellulitis without success.

Case Presentation: A 90-year-old female patient presented with acute onset of swelling, erythema, and pain on the dorsum of her right hand and was started on antibiotic therapy with a preliminary diagnosis of cellulitis. Despite an initial partial clinical and biochemical improvement, new pain developed in her wrist, elbow, and shoulder joints during the one-month

antibiotic regimen, and her C-reactive protein (CRP) level rose to 157 mg/L. Serological evaluations were negative for rheumatoid factor (RF) and anti-cyclic citrullinated peptide (anti-CCP) antibodies. Preliminary diagnoses of polymyalgia rheumatica and rheumatoid arthritis were ruled out based on clinical and laboratory findings. Ultrasonographic examination revealed pronounced synovial inflammation and findings consistent with crystal arthropathy, establishing the diagnosis of CPPD. Following the initiation of methylprednisolone and colchicine therapy, the patient's CRP level decreased to 3 mg/L by day 11, with complete resolution of clinical symptoms. During follow-up, treatments were gradually discontinued while clinical and biochemical remission persisted.

Conclusion: In elderly patients presenting with new-onset inflammatory arthritis that mimics infection and fails to respond as expected to antibiotic therapy, CPPD should be considered in the differential diagnosis. Ultrasonography can make a significant contribution to the early recognition of CPPD and the prompt initiation of appropriate treatment, particularly in cases with diagnostic uncertainty.

Keywords: calcium pyrophosphate deposition disease; acute CPP crystal arthritis; older adults; crystal arthropathy; ultrasonography; cellulitis.

KONUMSAL BİLGİ SİSTEMLERİ VE SAĞLIK ARAŞTIRMALARININ İLİŞKİSİ: ÇEVRE SAĞLIĞI PERSPEKTİFİNDE GELECEKTEKİ YÖNELİMLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Şevket BEDİROĞLU
Gaziantep Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü
ORCID ID: 0000-0002-7216-6910

ÖZET

Konumsal Bilgi Sistemleri (KBS), insan sağlığı ve çevre arasındaki karmaşık ilişkiyi anlamak için son yıllarda en önemli araçlardan biri haline gelmiştir. Çevre sağlığı alanında meydana gelen teknolojik gelişmeler, yapay zeka, uydu görüntülemesi, nesnelerin interneti ve gerçek zamanlı veri analizi gibi yenilikçi yaklaşımlarla entegre olan KBS uygulamaları, sağlık araştırmalarının geleceğini şekillendirmektedir. Bu çalışma, KBS'nin sağlık araştırmalarına uygulanmasında ortaya çıkan yeni yönelimleri ve bunun gelecek perspektiflerini sunmaktadır. Araştırma, yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin hastalık tarama modellemesi, taşınabilir teknolojilerin bireyselleştirilmiş sağlık izlemesi, uydu görüntüleme ve hiperspektral sensörlerin çevre değişimlerinin izlenmesi, gen-çevre-coğrafya entegrasyonu ile çevre tıbbının geliştirilmesi gibi konuları kapsamaktadır. Ayrıca nesnelerin interneti ve akıllı şehir ağları sayesinde iklim değişikliği, çevre hassasiyetleri ve mekansal sağlık eşitsizlikleri gibi konularda daha detaylı analizler yapılabilmektedir. Çalışmada, bu teknolojilerin bütünleştirilmiş geospatial sağlık platformları aracılığıyla klinik veriler, çevre sensörleri, uydu görüntüleri ve genomik verilerin birleştirilmesi ile elde edilen yeni bulguların sağlık politikası, şehir planlaması ve afet yönetimindeki uygulamalarından söz edilmektedir. Sonuç olarak, KBS ve gelişen teknolojilerin entegrasyonu, çevre sağlığı alanında risk tahmini, bireyselleştirilmiş müdahaleler, toplum-tabanlı sağlık girişimleri ve çevre adaleti açısından devrim niteliğinde çözümler sunmaktadır. Güncel ve yakın gelecekte ortaya çıkacak teknolojiler halk sağlığı alanında önemli avantajlar sunacaktır. Bu yaklaşımlar, gelecekte sağlık araştırmalarının metodolojisini ve uygulanabilirliğini önemli ölçüde geliştirecek ve daha kapsayıcı bir sağlık sistemi kurulmasına katkıda bulunacaktır.

Anahtar kelimeler: Konumsal Bilgi Sistemleri, Çevre Sağlığı, Yapay Zeka, Uydu Görüntülemesi, Coğrafi Analiz

THE RELATIONSHIP BETWEEN SPATIAL INFORMATION SYSTEMS AND HEALTH RESEARCH: FUTURE DIRECTIONS FROM AN ENVIRONMENTAL HEALTH PERSPECTIVE

ABSTRACT

Spatial Information Systems (SIS) have emerged as one of the most important tools in recent years for understanding the complex relationship between human health and the environment. SIS applications—integrated with innovative approaches such as artificial intelligence, satellite imagery, the Internet of Things (IoT), and real-time data analysis—are shaping the future of health research. This study presents emerging trends and future perspectives regarding the application of SIS in health research. The research covers topics such as the use of artificial intelligence and machine learning techniques for disease screening modeling, wearable technologies for personalized health monitoring, satellite imagery and hyperspectral sensors for tracking environmental changes, and the advancement of environmental medicine through the

integration of genes, environment, and geography. Furthermore, the Internet of Things and smart city networks enable more detailed analyses of issues such as climate change, environmental sensitivities, and spatial health inequalities. The study discusses the applications—in health policy, urban planning, and disaster management—of new findings derived from integrating clinical data, environmental sensors, satellite imagery, and genomic data via unified geospatial health platforms. Ultimately, the integration of SIS and emerging technologies offers revolutionary solutions in the field of environmental health regarding risk prediction, personalized interventions, community-based health initiatives, and environmental justice. Current and near-future technologies will provide significant advantages for public health. These approaches will substantially enhance the methodology and feasibility of future health research and contribute to the establishment of a more inclusive health system.

Keywords: Spatial Information Systems, Environmental Health, Artificial Intelligence, Satellite Imaging, Geospatial Analysis

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ KULLANARAK SEL-TAŞKIN RİSKİ DEĞERLENDİRMESİ: GAZİANTEP İL MERKEZİ UYGULAMASI

Dr. Öğr. Üyesi Gamze BEDİROĞLU
Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tapu Kadastro Programı, 79000 Kilis University,
ORCID ID: 0000-0003-2755-3206

ÖZET
Sel ve taşkın olayları, iklim değişikliği ve kentleşmenin etkisiyle dünya genelinde artan doğal afetler arasında yer almaktadır. Bu afetlerin olumsuz etkileri, ekonomik kayıplar ve can kaybı açısından oldukça ciddidir. Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yer alan Gaziantep İli, jeolojik konumu, iklim özellikleri ve artan nüfuslu alanlar nedeniyle sel ve taşkın riskine sahip bir bölgedir. İşte bu nedenle, sel ve taşkın tehlikesinin belirlenmesi, risk değerlendirmesi ve harita oluşturulması kritik öneme sahiptir. Çalışmanın amacı, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımı olan ArcGIS kullanarak Gaziantep İl Merkezi ve çevresinde sel taşkın analizi yapmak, tehlikeli bölgeleri belirlemek ve risk haritaları oluşturmaktır. Çalışmada, Gaziantep İline ait topografik haritalar, hidrolojik veriler, arazi kullanım haritaları, jeolojik ve topoğrafik veriler kullanılmıştır. Veri tabanı oluşturulduktan sonra, ArcGIS yazılımı kullanılarak mevcut sel-taşkın modeli uygulanmış ve farklı yağış senaryolarına göre taşkın derinliği, hızı ve yayılım alanları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, haritalar halinde sunulmuş ve risk düzeyleri (düşük, orta, yüksek ve çok yüksek) belirlenmiştir. Çalışmanın bulguları, Gaziantep İl Merkezi'nde, özellikle, kentsel gelişimin yoğun olduğu bazı bölgelerde yüksek sel taşkın riski olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen sel taşkın haritaları, şehircilik planlaması, afet yönetimi, acil müdahale planlaması ve altyapı tasarımı gibi alanlarda karar vericilere çok değerli bilgiler sunmaktadır. Sonuç olarak, CBS gibi güçlü araçların kullanılması, sel taşkın analizi çalışmalarının daha doğru, hızlı ve ekonomik bir şekilde yapılabilmesini sağlamaktadır.
Anahtar kelimeler: CBS, Sel-Taşkın Analizi, Risk Haritaları, Gaziantep, Doğal Afet Yönetimi

FLOOD RISK ASSESSMENT USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS : A CASE STUDY OF GAZIANTEP CITY CENTER

ABSTRACT
Floods and inundations are among the natural disasters increasing globally due to the impacts of climate change and urbanization. The adverse effects of these disasters are severe, resulting in significant economic losses and loss of life. Gaziantep Province, located in Türkiye's Southeastern Anatolia Region, is prone to flood risks due to its geological location, climatic characteristics, and areas of increasing population density. Therefore, identifying flood hazards, assessing risks, and generating maps are of critical importance. The aim of this study is to conduct a flood analysis for the Gaziantep city center and its surroundings, identify hazardous zones, and create risk maps using ArcGIS, a Geographic Information System (GIS) software. Topographic maps, hydrological data, land-use maps, and geological and topographic data pertaining to Gaziantep Province were utilized in the study. Following the creation of the database, an existing flood model was applied using ArcGIS software to calculate flood depth, velocity, and inundation areas under various precipitation scenarios. The results were presented in map format, and risk levels (low, medium, high, and very high) were determined. The findings indicate a high risk of flooding in the Gaziantep city center, particularly in certain areas

characterized by intensive urban development. The flood maps generated in this study provide invaluable information to decision-makers in fields such as urban planning, disaster management, emergency response planning, and infrastructure design. In conclusion, the use of powerful tools like GIS enables flood analysis to be conducted more accurately, rapidly, and cost-effectively.

Keywords: GIS, Flood Analysis, Risk Maps, Gaziantep, Natural Disaster Management

PEM SU ELEKTROLİZİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ: İRİDYUM KATALİZÖR YÜKÜ, ELEKTRİK ÜRETİM KARIŞIMI VE SİSTEM ÖMRÜNÜN KARBON AYAK İZİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Gizem Nur BULANIK DURMUŞ
Atilim University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Incek, 06836, Ankara, Turkey
ORCID ID: 0000-0001-8457-8093

ÖZET

Hidrojen, düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişte önemli bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir. Özellikle yenilenebilir elektrik kullanılarak suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi, fosil kaynaklara dayalı üretim yöntemlerine alternatif yaklaşımlardan biridir. PEM su elektrolizi ise yüksek saflıkta hidrojen üretimi, yüksek akım yoğunluğunda çalışabilmesi ve değişken yenilenebilir enerji kaynaklarına hızlı yanıt verebilmesi nedeniyle öne çıkan elektroliz teknolojileri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, PEM elektrolizi ile üretilen hidrojenin karbon ayak izi yalnızca kullanılan elektriğe değil, elektrolizörde kullanılan malzemelerin üretiminden kaynaklanan emisyonlara da bağlıdır. Bu kapsamda, anot katalizörlerinde yaygın olarak kullanılan iridyum ve iridyum bazlı malzemelerin kullanım miktarı dikkate alınması gereken faktörlerden biridir. Bu çalışmada, PEM su elektrolizi ile hidrojen üretiminin karbon ayak izi iridyum katalizör yükü, elektrik üretim karışımı ve sistem ömrü dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Karbon ayak izi hesabında, iridyumun üretiminden ve hidrojen üretimi için tüketilen elektrikten kaynaklanan emisyonlar birlikte ele alınmıştır. İlk olarak literatürden elde edilen temsilî değerler kullanılarak bir baz senaryo oluşturulmuş ve 1 kg hidrojen üretimi başına karbon ayak izi hesaplanmıştır. Daha sonra duyarlılık analizi kapsamında iridyum katalizör yükü ve sistem ömrü ayrı ayrı değiştirilerek bu değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elektrik kullanımının etkisini değerlendirmek amacıyla ise yenilenebilir enerji payının %0'dan %100'e kadar %20'lik artışlarla değiştiği elektrik üretim karışımları oluşturulmuştur. Böylece fosil kaynakların payının kademeli olarak azalmasının hidrojen üretiminin karbon ayak izine etkisi değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, iridyum katalizör yükü, elektrik üretim karışımı ve sistem ömründeki değişimlerin 1 kg hidrojen başına karbon ayak izi üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak ortaya konulması amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: PEM su elektrolizi; hidrojen üretimi; iridyum katalizör yükü; yenilenebilir elektrik payı; sistem ömrü; karbon ayak izi; gömülü karbon.

HYDROGEN PRODUCTION WITH PEM WATER ELECTROLYSIS: EFFECTS OF IRIDIUM CATALYST LOADING, ELECTRICITY GENERATION MIX, AND SYSTEM LIFETIME ON CARBON FOOTPRINT

ABSTRACT

Hydrogen is considered a crucial energy carrier in the transition to low-carbon energy systems. In particular, hydrogen production via the electrolysis of water using renewable electricity is one of the alternative approaches to fossil fuel-based production methods. PEM water electrolysis stands out among electrolysis technologies due to its high-purity hydrogen production, ability to operate at high current densities, and rapid response to varying renewable energy sources. However, the carbon footprint of hydrogen produced by PEM electrolysis depends not only on the electricity consumed but also on emissions from the production of

materials used in the electrolyzer. In this context, the amount of iridium and iridium-based materials commonly used in anode catalysts is one of the factors that needs to be considered. In this study, the carbon footprint of hydrogen production by PEM water electrolysis is evaluated considering iridium catalyst load, electricity generation mix, and system lifetime. In the carbon footprint calculation, emissions from iridium production and emissions from the electricity consumed for hydrogen production are considered together. First, a baseline scenario was created using representative values obtained from the literature, and the carbon footprint per kg of hydrogen production was calculated. Then, as part of the sensitivity analysis, the iridium catalyst load and system lifetime were varied separately, and the effects of these variables on the results were examined. To evaluate the effect of electricity usage, electricity generation mixes were created where the share of renewable energy varied from 0% to 100% in 20% increments. Thus, the effect of the gradual decrease in the share of fossil fuels on the carbon footprint of hydrogen production was evaluated. The aim of the study was to comparatively present the effects of changes in iridium catalyst load, electricity generation mix, and system lifetime on the carbon footprint per kg of hydrogen.

Keywords: PEM water electrolysis; hydrogen production; iridium catalyst loading; renewable electricity share; system lifetime; carbon footprint; embodied carbon

BIOSYNTHESIS OF NANOPARTICLES FROM GREEN WASTE AND THEIR APPLICATION IN WASTEWATER TREATMENT

HAFID Mohammed
SAUFI Hamid
EL HERRADI El Hassania
Laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux Inorganiques et Organiques / Faculté des Sciences de Rabat

Abstract
This research focuses on the biosynthesis of nanoparticles from green waste and their application in wastewater treatment. Bioactive extracts were obtained from various types of plant waste and used to synthesize metal-based nanoparticles. After selecting the most effective extract, the nanoparticles were characterized using several techniques (XRD, XRF, SEM-EDX) to determine their structure, composition, and stability. Photodegradation tests are currently being conducted to assess their efficiency in removing biological pollutants from wastewater. This innovative approach promotes both waste valorization and sustainable water decontamination.

Background and Problem Statement:
The rise in biological and organic pollution in wastewater calls for the development of sustainable and environmentally friendly treatment solutions. A promising approach consists in using green waste as a source of biomolecules for the biosynthesis of nanoparticles. This method offers both the valorization of plant waste and the production of functional nanomaterials intended for wastewater treatment through photodegradation. Research

Objectives:
This work aims to develop and evaluate an eco-friendly method for synthesizing nanoparticles from bioactive extracts derived from various types of green waste, and to test their effectiveness in the treatment of biological waste in wastewater via photocatalysis.

Methodology:
Several types of green waste were used to extract bioactive molecules. These extracts were tested as reducing and stabilizing agents in the biosynthesis of metal-based nanoparticles. After comparative trials, one specific extract was selected for its performance. The resulting nanoparticles were characterized using the following analytical techniques:

- **XRD** (X-ray Diffraction): for crystalline structure analysis,
- **XRF** (X-ray Fluorescence): for elemental composition,
- **SEM-EDX** (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy): for morphology and surface composition.

Photodegradation tests are currently underway to assess the efficiency of these nanoparticles in degrading biological waste in wastewater under light irradiation.

Key Results:
One plant extract demonstrated a strong ability to produce stable and well-structured nanoparticles. Characterization analyses confirmed their crystallinity, chemical composition, and nanoscale morphology. Initial photodegradation experiments show promising efficiency in removing organic pollutants, demonstrating the potential of these nanomaterials for water treatment applications.

Discussion and Outlook:
This study confirms the potential of nanoparticle biosynthesis from green waste as a sustainable and environmentally friendly solution. The synthesized nanoparticles show great promise for

environmental applications, particularly in wastewater decontamination. Future directions include :

- Optimisation of photocatalytic conditions,
- Application to real wastewater samples,
- Investigation of nanoparticle stability and reusability,
- Extension to other fields of application.

Keywords:
Biosynthesis, Green waste, Nanoparticles, Wastewater treatment, Photodegradation, Characterization

DIETARY FIBER IN GASTROINTESTINAL DISORDERS: A SYSTEMATIC REVIEW OF PHYSIOLOGICAL MECHANISMS, CLINICAL APPLICATIONS, AND EMERGING EVIDENCE

Prof. Bledar KRAJA, MD, PhD
Division of Physiology, Department of Biomedical and Experimental Sciences, Faculty of Medicine, University of Medicine Tirana, Albania
University Clinic of Gastro-Hepatology, University Hospital Center "Mother Teresa", Dibra Street 371, 1001, Tirana, Albania
ORCID ID: 0000-0001-7685-8394

ABSTRACT

Introduction: Dietary fiber comprises a heterogeneous group of nondigestible carbohydrates and associated compounds with important effects on gastrointestinal physiology. Its biological and clinical effects vary according to physicochemical characteristics, including solubility, viscosity, fermentability, and interactions with the gut microbiota. This systematic review evaluated the physiological mechanisms and clinical evidence supporting dietary fiber use across major gastrointestinal disorders.

Methods: A systematic literature review was conducted to assess the effects of dietary fiber across major gastrointestinal disorders. Evidence from clinical studies, prospective epidemiological investigations, systematic reviews, meta-analyses, and contemporary clinical guidelines was considered. Outcomes of interest included gastrointestinal symptoms, bowel function, constipation, irritable bowel syndrome (IBS), colorectal cancer, diverticular disease, and gallstone disease. Evidence was synthesized according to fiber type, physicochemical characteristics, clinical application, and reported outcomes.

Results: Dietary fiber influences stool bulk and consistency, intestinal transit, colonic fermentation, bile acid metabolism, glucose homeostasis, and short-chain fatty acid production. Psyllium, a soluble, viscous, and relatively poorly fermented fiber, demonstrated greater clinical utility for constipation and IBS than insoluble wheat bran, although individual tolerance remains an important determinant of response. Fiber supplementation is supported as an option for chronic idiopathic constipation, although evidence certainty is lower than that for several pharmacological therapies. Epidemiological evidence generally supports an inverse association between higher fiber intake and colorectal cancer risk, despite heterogeneity among individual studies. Evidence for prevention of diverticular and gallstone disease remains less consistent.

Conclusion: Dietary fiber may provide clinically relevant benefits in selected gastrointestinal disorders, particularly constipation and IBS. Its effects depend on fiber type, dose, fermentability, dietary context, and individual tolerance. Current evidence supports fiber as an important component of a healthy dietary pattern rather than a universal therapeutic intervention.

Keywords: Dietary fiber, constipation, irritable bowel syndrome, colorectal cancer, gastrointestinal disorders.

INTEGRATED GEOELECTRICAL CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF SUBSURFACE RESISTIVITY DISTRIBUTION USING VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING IN A TROPICAL BASEMENT COMPLEX TERRAIN: A CASE STUDY OF IGEM CITY, ALAKIA–ADEGBAYI, IBADAN, SOUTHWESTERN NIGERIA

Owoyemi, S. I.
Department of Integrated Science
Faculty of Education
Adeyemi Federal University of Education, Ondo, Nigeria
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1377-9017

ABSTRACT

This study presents an integrated geoelectrical characterization and evaluation of subsurface resistivity distribution within IGEM City, Alakia–Adegbayi, Ibadan, Southwestern Nigeria, using Vertical Electrical Sounding (VES). Eight VES stations were occupied using the Schlumberger electrode configuration to investigate subsurface lithology, engineering competence, and groundwater potential. The interpreted sounding curves revealed predominantly H-type and A-type characteristics, indicating varying degrees of weathering and basement configuration. The subsurface sequence generally comprises topsoil, weathered layer, fractured basement, and fresh basement rock. The results indicate significant spatial variations in resistivity distribution across the study area. Areas characterized by relatively high resistivity values are interpreted as competent foundation materials suitable for engineering structures, while low-resistivity weathered and fractured zones indicate favorable groundwater accumulation. The study demonstrates the effectiveness of VES in evaluating subsurface conditions for engineering and hydrogeological applications in tropical basement complex terrains.

Keywords: Geoelectrical Characterization, Vertical Electrical Sounding, Soil Resistivity, Foundation Engineering, Groundwater Potential, Basement Complex Terrain, Ibadan.

QUANTUM CHARGING, ERGOTROPY, AND CORRELATIONS IN A DOUBLE-QUANTUM-DOT BATTERY UNDER 1/F CHARGE NOISE

Khalil Loukhssam
ESMaR, Department of Physics, Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat
Morocco
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-7934-3001

Introduction and Purpose:
Quantum batteries have emerged as promising devices that use uniquely quantum features, such as coherence and entanglement, to improve energy storage and charging efficiency. In this work, the purpose was to investigate a quantum battery model based on two coupled double quantum dots implemented on the AlGaAs/GaAs platform, and to evaluate how the main system parameters affect the charging performance and the associated quantum correlations.
Materials and Methods:
A theoretical model of a two-double-quantum-dot battery was considered, where the system consists of two coupled charge qubits interacting through Coulomb coupling. The battery was initialized in a thermal Gibbs state at finite temperature, and its charging process was described through a transverse driving Hamiltonian. The energetic performance was analyzed using stored energy, ergotropy, and average power, while the quantum properties were characterized through entanglement of formation, quantum discord, and quantum coherence. The dependence of these quantities on energy offset, tunneling coupling, and temperature was systematically examined.
Results:
The results showed that increasing the energy offset enhances ergotropy and charging power, but at the same time reduces quantum correlations. In contrast, increasing the tunneling coupling leads to a non-monotonic behavior of the maximum ergotropy: it first increases, reaches an optimum value, and then decreases. This behavior was found to closely follow the evolution of entanglement, while quantum coherence continued to increase even when ergotropy no longer improved. The analysis also showed that coherence is more robust against temperature than entanglement, but coherence alone is not sufficient to guarantee optimal battery performance.
Discussion and Conclusion:
The study demonstrates the feasibility of using coupled double quantum dots as a solid-state platform for quantum batteries. The findings highlight that the best charging performance does not depend only on coherence, but also on the interplay between coherence and other quantum correlations, especially entanglement. Therefore, the careful tuning of system parameters is essential for optimizing extractable work and charging efficiency in realistic quantum-dot-based batteries.
Key Words:
Quantum batteries; Double quantum dots; Ergotropy; Quantum coherence; Entanglement; Quantum discord.

CONTEMPORARY SCIENTIFIC FRONTIERS AND INNOVATIVE TRANSLATIONAL PARADIGMS IN AGRICULTURE AND VETERINARY SCIENCES: ADVANCING SUSTAINABLE AGROECOSYSTEMS, PRECISION PRODUCTION, ANIMAL HEALTH AND WELFARE, BIOTECHNOLOGICAL INNOVATION, FOOD SECURITY, ECOLOGICAL INTEGRITY, CLIMATE RESILIENCE, AND ONE HEALTH

Nodar Sulashvili
Irina Imerlishvili
Margarita Beglaryan
Diego Rada Fernandez de Jauregui
Maka Buleishvili
Mariam Darbaidze
Nato Alavidze
Lali Patsia
Ada (Adel) Tadevosyan
Vira Kravchenko
Zaza Khachiperadze
Olga Shapoval
Igor Seniuk
Marika Sulashvili
Nana Gorgaslidze
Marina Giorgobiani
Giorgi Pkhakadze
Nino Abuladze
Ketevani Gabunia
Otar Gerzmava

1. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical and Pharmacological Sciences In Medicine, Professor of Faculty of Medicine at Georgian International University GIU; Professor of Pharmacology of Faculty of Medicine at Georgian National University SEU; Professor of Medical and Clinical Pharmacology of Faculty of Medicine at BAU International University Batumi, Invited Professor/Lecturer of Scientific Research-Skills Center at Tbilisi State Medical University; Invited Lecturer of Clinical Pharmacology Department at Tbilisi State Medical University; Scientific Researcher, Best, Top Academic Scientist, Georgia, Europe, Worldwide; Associate Professor of Biochemistry and Pharmacology Direction of School of Health Sciences at The University of Georgia; Professor of Medical and Clinical Pharmacology of International School of Medicine at Alte University; Tbilisi, Georgia; Scientific Researcher of Yerevan State Medical University After Mkhitar Heratsi, Yerevan, Republic of Armenia; Former Clinical Pharmacologist of London Lewisham University Hospital, London, England, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland; https://orcid.org/0000-0002-9005-8577
2. PhD, Doctor of Law, Professor, Rector of BAU International University Batumi; Professor of BAU International University Batumi; Professor at the International Black Sea University, Batumi-Tbilisi, Georgia; https://orcid.org/0009-0008-6862-7025
3. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Yerevan State Medical University After Mkhitar Heratsi, Head of the Department of Pharmaceutical Management, Yerevan, Armenia; https://orcid.org/0000-0003-3697-6390

4. PhD and BSc in Pharmacy, MSc in Research Methodology in Health Sciences, Professor, Pharmacy Faculty, University of the Basque Country, Spain. https://orcid.org/0000-0002-9109-1088

5. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Professor of Faculty of Medicine at Georgian International University GIU, Dean of Faculty of Medicine at Georgian International University GIU, Professor of Faculty of Medicine at Georgian National University SEU, Professor of Faculty of Medicine at European University, Professor of Faculty of Medicine at Caucasus International University, Professor of Faculty of Medicine at Georgian-American University, Invited Lecturer of Tbilisi State Medical University, Tbilisi, Georgia; Professor of Faculty of Medicine at BAU International University Batumi, https://orcid.org/0009-0004-2657-8473

6. MD, PhD, Doctor of Biological Sciences, Professor of Georgian International University GIU, Vice Rector of Georgian International University GIU; Professor of Georgian National University SEU; Tbilisi, Georgia; https://orcid.org/0009-0005-0275-4222

7. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. Professor, Dean Faculty of Medicine at East European University, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0001-6695-5924

8. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Doctor Cardiologist at Republican Hospital, Invited Professor of Tbilisi State Medical University, Professor of Ken Walker international University, Professor of International School of Medicine at Alte University, Professor of Faculty of Medicine at Sulkhan-Saba Orbeliani University, Tbilisi, Georgia.

9. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Academician, Professor of Yerevan State Medical University After Mkhitar Heratsi, Academician and Full Member of the International Academy of Sciences of Ecology and Life Safety (MANEB), Academician of the Republic Armenia Law Academy, Member of the Association of Psychiatrists of Armenia, World Association of Psychiatrists, International Association for Traumatic Stress, World Association for Biological Psychiatry, International Association "Stress and Behavior", Licensed Psychiatrist, Psychotherapist, Public Health Organizer; Tbilisi-Georgia, Yerevan-Armenia, Los Angeles-USA;

10. MD, PhD, Doctor of Biological Sciences, Academician, Professor, Head of The Biological Chemistry Department at National University of Pharmacy of Ukraine, Kharkiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-6335-2490

11. MD, PhD(c), Associate Professor, Vice-Dean of Medical School at Georgian American University (GAU), Associate Professor of Faculty of Medicine at Caucasus International University, Tbilisi, Georgia.

12. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor of Department of Pharmacology and Medical Prescription at Kharkiv State Medical University, Kharkiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0002-1971-2863

13. PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Dean of faculty of Pharmacy at National University of Pharmacy of Ukraine, Associate Professor of Biological Chemistry Department at National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-3819-7331

14. MD, Doctor of Family Medicine, Invited Lecturer of Tbilisi State Medical University, Department of Molecular and Medical Genetics; Invited Lecturer of Family Medicine of Faculty of Medicine at Georgian National University SEU; Invited Professor of Biochemistry and Molecular and Medical Genetics at The University of Georgia; Tbilisi, Georgia;

15. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Tbilisi State Medical University, Head of The Department of Social and Clinical Pharmacy, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-4563-5224

16. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Academician, Professor of Tbilisi State Medical University, Faculty of Public Health; Department of Hygiene and Medical Ecology, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0003-0686-5227
17. MD, MPH, PhD, Doctor of Medical Sciences, Professor – Head of the School of Public Health at David Tvildiani Medical University, Director of Public Health Institute of Georgia (PHIG) Tbilisi, Georgia; Member of the United Nations Secretary General's Independent Accountability Panel, Geneva, Switzerland; President, Accreditation San Frontières, Paris, France, Lviv Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-7609-4515
18. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0003-2189-7470
19. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-5857-6593;
20. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Academician, Professor of School of Medicine at Grigol Robakidze University, Professor of Tbilisi State Medical University, President of Georgian Association of Health Administrators, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-7218-2697

ABSTRACT

Agricultural and veterinary sciences are undergoing a profound transformation driven by converging advances in biotechnology, precision agriculture, animal health sciences, ecological systems research, digital technologies, climate science, and integrated food-system governance. Contemporary agricultural production can no longer be conceptualized solely in terms of crop yield maximization or livestock productivity; rather, it must be understood as a complex socio-ecological and biological system in which agricultural productivity, animal health and welfare, environmental integrity, food safety, public health, and socioeconomic resilience are intrinsically interconnected. Against this background, the present scientific perspective develops an integrative framework for examining emerging paradigms and translational innovations across agriculture and veterinary sciences, with particular emphasis on sustainable crop production, precision agricultural technologies, biotechnological development, animal health management, food-system resilience, ecological safety, climate adaptation, biodiversity conservation, resource optimization, One Health, and rural development. The central premise is that sustainable agricultural transformation requires interdisciplinary integration of molecular and cellular sciences, agronomy, veterinary medicine, epidemiology, microbiology, genetics, environmental sciences, data science, agricultural engineering, economics, and public-health policy.

The framework considers the increasing contribution of precision agriculture to evidence-informed management of soil, water, nutrients, crops, and agricultural inputs through remote sensing, geographic information systems, satellite imagery, automated monitoring, artificial intelligence, machine learning, robotics, sensor-based technologies, and decision-support systems. Such technologies offer substantial opportunities to improve resource-use efficiency, reduce unnecessary chemical inputs, optimize production processes, detect crop stress at an early stage, and strengthen climate-resilient agricultural practices. Concurrently, advances in biotechnology, including molecular breeding, genomics, gene-editing approaches, microbial biotechnology, biofertilizers, biopesticides, and other biological innovations, are expanding the scientific capacity to improve crop productivity, nutritional quality, resistance to biotic and

abiotic stressors, and adaptation to changing environmental conditions. Nevertheless, technological advancement must remain embedded within rigorous biosafety, biosecurity, ethical, ecological, and regulatory frameworks to ensure that innovation does not generate unintended environmental or societal consequences.

Within veterinary sciences, the study emphasizes the strategic importance of preventive medicine, infectious-disease surveillance, antimicrobial stewardship, veterinary pharmacology, diagnostic innovation, vaccination, animal nutrition, genetics, reproductive health, welfare science, and population-level disease prevention. Animal health is considered not as an isolated veterinary concern but as an essential component of food security, food safety, livelihood protection, zoonotic-disease prevention, and global public health. The One Health paradigm therefore provides an essential conceptual foundation for integrating human, animal, plant, and environmental health within interconnected biological and ecological systems. Particular attention is given to antimicrobial resistance, emerging and re-emerging infectious diseases, zoonotic pathogens, environmental contamination, pharmaceutical residues, biological hazards, and the consequences of intensified agricultural production.

Ecological safety represents another central dimension of the proposed framework. Sustainable agriculture requires systematic protection of soil biodiversity, freshwater resources, pollinators, agroecosystem functions, genetic diversity, and broader ecosystem services. Climate change further intensifies these challenges by altering temperature regimes, precipitation patterns, pest and pathogen distributions, water availability, animal disease dynamics, and agricultural productivity. Accordingly, climate adaptation and mitigation should be integrated into crop and livestock management through resource-efficient production systems, regenerative agricultural approaches, biodiversity-supportive practices, sustainable water management, improved soil stewardship, resilient genetic resources, and environmentally responsible technologies.

The analysis further recognizes food-system resilience as a multidimensional objective encompassing stable production, nutritional adequacy, food safety, economic viability, environmental sustainability, supply-chain continuity, and capacity to withstand climatic, biological, economic, and geopolitical disruptions. Rural development is consequently positioned as an integral component of agricultural transformation, requiring investment in scientific education, technological infrastructure, professional competencies, extension services, innovation ecosystems, farmer participation, veterinary services, and equitable access to modern agricultural technologies. Translational research is emphasized as the mechanism through which scientific discoveries can be converted into practical interventions, scalable technologies, evidence-based policies, and measurable improvements in agricultural and veterinary outcomes. The proposed integrative framework advances a systems-oriented scientific perspective in which agricultural productivity, animal health, ecological safety, technological innovation, biodiversity, climate resilience, food security, and rural socioeconomic development are treated as mutually dependent dimensions of sustainable development. The future trajectory of agricultural and veterinary sciences will increasingly depend upon interdisciplinary collaboration, data-driven decision-making, responsible biotechnology, precision production, preventive veterinary medicine, environmental stewardship, and One Health governance. Such convergence has the potential to establish more productive, resilient, biologically secure, environmentally sustainable, and socially responsible food systems capable of addressing the increasingly complex challenges confronting agriculture, animal health, ecosystems, and global food security.

Keywords: Agriculture; Veterinary Sciences; Precision Agriculture; One Health; Ecological Safety.

INTRODUCTION

Agriculture and veterinary sciences occupy a foundational position within the contemporary architecture of global health, food-system sustainability, ecological stability, economic development, and societal resilience. The scientific domains encompassed by crop production, animal health, agricultural biotechnology, veterinary medicine, precision agriculture, environmental stewardship, food safety, and rural development have historically evolved through partially differentiated disciplinary trajectories; however, the increasing complexity of twenty-first-century biological, climatic, technological, and socioeconomic challenges has rendered such disciplinary separation progressively inadequate. Modern agricultural and veterinary systems constitute interconnected socio-ecological, biological, technological, and economic networks in which alterations in one component can generate cascading consequences throughout the wider food system. Crop productivity influences food availability and nutritional security; livestock health affects food production, livelihoods, zoonotic disease risks, and antimicrobial resistance; agricultural practices influence soil, water, biodiversity, and atmospheric processes; and environmental changes modify the epidemiology of plant and animal diseases. Consequently, contemporary scientific inquiry increasingly requires integrative approaches capable of simultaneously addressing productivity, health, ecological integrity, technological innovation, resource efficiency, and social resilience.

The global agricultural sector is experiencing a period of unprecedented transformation. Population growth, urbanization, changing dietary patterns, climate variability, degradation of natural resources, emerging infectious diseases, antimicrobial resistance, geopolitical instability, supply-chain disruptions, and unequal access to technological resources are collectively reshaping the conditions under which food and agricultural commodities are produced. The traditional paradigm of agricultural intensification, which primarily emphasized increasing production through greater utilization of land, water, fertilizers, pesticides, energy, and other external inputs, has generated major gains in productivity but has also contributed in some settings to soil degradation, water contamination, biodiversity loss, greenhouse-gas emissions, ecological disruption, and increasing dependence on resource-intensive production systems. These challenges have stimulated the emergence of more comprehensive scientific paradigms that seek to reconcile agricultural productivity with environmental protection, climate adaptation, resource conservation, animal welfare, food safety, and socioeconomic viability. Sustainable agriculture therefore represents not merely an alternative production philosophy but an increasingly important scientific framework for understanding the long-term functioning and resilience of agroecosystems.

Within this transformation, veterinary sciences have acquired an increasingly strategic role extending beyond the conventional clinical treatment of individual animals. Contemporary veterinary medicine encompasses preventive medicine, population health, epidemiology, infectious-disease surveillance, antimicrobial stewardship, food-animal medicine, veterinary pharmacology, immunology, molecular diagnostics, animal nutrition, reproductive sciences, genetics, animal welfare, wildlife health, environmental health, and zoonotic disease prevention. The health status of livestock populations has direct implications for food availability, food safety, household income, agricultural productivity, and public health. In many agricultural communities, livestock represent a major component of household assets and economic security, making animal morbidity and mortality not only biological events but also socioeconomic threats. Veterinary services consequently contribute to the resilience of agricultural communities by preventing disease, maintaining animal productivity, safeguarding food chains, supporting responsible antimicrobial use, and identifying biological hazards capable of crossing species boundaries.

The convergence of agriculture and veterinary science is particularly evident through the development of the One Health paradigm. One Health recognizes the interdependence of human, animal, plant, and environmental health and provides an intellectual and operational framework for addressing complex health challenges that cannot be effectively resolved within a single discipline. Zoonotic diseases, antimicrobial resistance, vector-borne infections, foodborne pathogens, environmental contamination, wildlife disease, and climate-sensitive health threats exemplify problems in which biological processes extend across multiple ecological and institutional domains. The One Health perspective therefore encourages coordinated surveillance, integrated risk assessment, interdisciplinary research, responsible antimicrobial management, environmental monitoring, and collaborative policy development. Its significance has increased as global mobility, agricultural intensification, environmental change, and ecosystem disruption create new interfaces among humans, domestic animals, wildlife, and natural environments.

The scientific evolution of agriculture is simultaneously being accelerated by precision technologies and digital transformation. Precision agriculture represents a transition from generalized farm-management practices toward spatially and temporally differentiated management based on increasingly sophisticated measurements of crops, soils, weather, water, and agricultural operations. Remote sensing, satellite imagery, unmanned aerial systems, geographic information systems, Internet-connected sensors, machine learning, artificial intelligence, robotics, automated machinery, variable-rate application systems, and digital decision-support platforms are enabling agricultural producers and researchers to generate and interpret high-resolution information about agroecosystem processes. These technologies can facilitate early detection of crop stress, optimize irrigation and fertilization, improve pest and disease management, reduce input waste, enhance yield prediction, and strengthen the capacity of farmers to respond to environmental variability. Nevertheless, technological sophistication alone does not guarantee sustainability. Precision systems must be scientifically validated, economically accessible, appropriately calibrated, interoperable, ethically implemented, and adapted to local production environments.

The integration of digital technologies into veterinary science is similarly expanding the analytical and diagnostic capabilities of animal health systems. Digital epidemiology, electronic animal-health records, automated behavioral monitoring, biosensors, wearable devices, molecular diagnostics, genomic surveillance, telemedicine, artificial intelligence-assisted image interpretation, and data-driven disease prediction are transforming approaches to veterinary diagnosis and population management. Continuous monitoring technologies may identify deviations in animal behavior, feeding, movement, temperature, or physiological parameters before clinical disease becomes apparent, thereby creating opportunities for earlier intervention. In livestock production, such approaches can contribute to precision livestock farming by integrating animal-level information with environmental and production data. The resulting systems can support individualized management, disease prevention, welfare assessment, feed optimization, reproductive monitoring, and productivity improvement. The scientific challenge lies in translating large volumes of heterogeneous data into reliable, clinically meaningful, and actionable knowledge while maintaining data quality, privacy, interoperability, and responsible governance.

Biotechnology constitutes another major pillar of contemporary transformation in agricultural and veterinary sciences. Molecular genetics, genomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics, gene editing, molecular breeding, reproductive biotechnology, microbial biotechnology, immunotechnology, and synthetic biological approaches have substantially expanded the capacity to characterize and manipulate biological systems. In crop science,

biotechnology can facilitate the development of varieties with improved resistance to pests, pathogens, drought, salinity, heat, and other environmental stressors. Molecular breeding can accelerate the identification and selection of desirable traits, while gene-editing technologies provide new possibilities for targeted genetic modification. Microbial biotechnology has also generated opportunities for developing biofertilizers, biopesticides, plant-growth-promoting microorganisms, and biological approaches to soil restoration. These innovations may contribute to reducing dependence on synthetic inputs and increasing production efficiency when appropriately validated and integrated into sustainable management systems.

In veterinary and animal sciences, biotechnology has similarly transformed disease diagnosis, vaccine development, breeding, reproduction, nutrition, and therapeutic innovation. Genomic approaches facilitate the identification of genetic determinants associated with disease resistance, production traits, reproductive performance, and adaptation to environmental conditions. Molecular diagnostics enable more rapid and specific detection of pathogens, including emerging infectious agents. Advances in immunology and biotechnology support the development of improved vaccines and diagnostic platforms. Reproductive technologies can contribute to genetic improvement and population management, although they require careful consideration of animal welfare, genetic diversity, and ethical principles. The application of biotechnology therefore represents both an opportunity and a responsibility: technological innovation must be evaluated not solely according to its capacity to increase productivity but also according to its ecological, ethical, health, and socioeconomic implications.

The concept of sustainability has consequently evolved from a relatively narrow environmental concern into a multidimensional scientific construct incorporating ecological integrity, economic viability, social equity, resource efficiency, resilience, and intergenerational responsibility. Sustainable crop production requires maintenance of soil fertility, efficient water use, appropriate nutrient management, integrated pest management, conservation of beneficial organisms, protection of genetic diversity, and minimization of adverse environmental effects. Soil, in particular, should be understood as a living biological system rather than merely a physical substrate for plant growth. Soil microorganisms, organic matter, nutrient cycles, water retention, carbon dynamics, and structural properties collectively determine agricultural productivity and ecosystem functioning. Unsustainable management can progressively diminish these functions, whereas conservation-oriented and regenerative practices may contribute to restoring soil quality and improving resilience.

Water represents another critical component of agricultural sustainability. Agriculture is among the major users of freshwater resources, and competition for water is intensifying because of population growth, industrialization, urbanization, climate change, and ecosystem requirements. Inefficient irrigation can contribute to water depletion, salinization, nutrient leaching, and degradation of aquatic environments. Precision irrigation, soil-moisture monitoring, drought-tolerant crop varieties, improved water-harvesting systems, recycling technologies, and integrated watershed management can contribute to greater water-use efficiency. However, technological interventions must be accompanied by appropriate governance because water scarcity is simultaneously a technical, ecological, economic, and political challenge.

Climate change further intensifies the need to reconsider conventional agricultural and veterinary paradigms. Changes in temperature, precipitation, drought frequency, extreme weather events, atmospheric carbon dioxide concentrations, and seasonal patterns affect crop growth, livestock productivity, pest and pathogen distributions, water availability, and ecosystem functioning. Climate-related stress can alter the nutritional composition of crops, influence livestock heat stress, modify vector populations, and create conditions favorable to

the emergence or expansion of infectious diseases. Agricultural systems are therefore both affected by climate change and contributors to global environmental change. This dual relationship necessitates simultaneous adaptation and mitigation. Adaptation involves strengthening the capacity of agricultural and veterinary systems to function under changing environmental conditions, whereas mitigation seeks to reduce greenhouse-gas emissions and enhance carbon sequestration.

Climate-resilient agriculture increasingly emphasizes diversification, improved genetic resources, soil-carbon management, water conservation, agroforestry, integrated crop-livestock systems, ecosystem restoration, and climate-informed decision-making. Crop diversification can reduce vulnerability to individual pests, diseases, and climatic shocks, while maintaining genetic diversity can provide a reservoir of traits necessary for future adaptation. Livestock systems may require improved housing, ventilation, water management, nutritional strategies, breeding for heat tolerance, and disease surveillance. Veterinary professionals are therefore becoming increasingly important participants in climate adaptation because environmental change affects disease ecology, animal physiology, nutrition, reproduction, and welfare.

Biodiversity conservation is inseparable from agricultural sustainability. Agricultural landscapes contain complex communities of plants, microorganisms, insects, birds, mammals, and other organisms that contribute to pollination, pest regulation, nutrient cycling, soil formation, and ecosystem resilience. Intensive agricultural practices can simplify landscapes and reduce habitat availability, potentially weakening ecological functions. Conversely, diversified cropping systems, agroecological practices, habitat conservation, integrated pest management, agroforestry, and protection of natural ecological corridors can support biodiversity while maintaining productive agricultural systems. Biodiversity should therefore not be viewed as competing with agricultural productivity in all circumstances; appropriately designed production systems can generate synergies between conservation and productivity.

Ecological safety is increasingly recognized as a fundamental requirement for agricultural and veterinary development. Agricultural chemicals, veterinary pharmaceuticals, antimicrobial compounds, hormones, heavy metals, pathogens, plastics, and other contaminants may enter soil, water, air, plants, animals, and food chains. Their environmental fate and biological effects require systematic scientific evaluation. Veterinary medicinal products may be excreted by treated animals and subsequently enter agricultural soils and aquatic systems, while agricultural chemicals can affect non-target organisms and ecosystem functions. The assessment of such risks requires integration of pharmacology, toxicology, environmental chemistry, microbiology, ecology, veterinary medicine, agronomy, and public health. Ecological safety therefore requires life-cycle thinking, risk-based regulation, monitoring, responsible application practices, and development of safer alternatives.

Antimicrobial resistance represents one of the most important intersections between veterinary medicine, agriculture, environmental science, and public health. Antimicrobial agents are essential for treating bacterial infections in humans and animals, but inappropriate use can accelerate the emergence and dissemination of resistant microorganisms. Agricultural environments may function as reservoirs and transmission interfaces for antimicrobial-resistant organisms and resistance determinants. Manure, wastewater, soil, food products, wildlife, and human communities can participate in complex transmission networks. Effective antimicrobial stewardship therefore requires integrated approaches encompassing appropriate prescribing, diagnostic testing, infection prevention, vaccination, biosecurity, surveillance, environmental management, and education. Veterinary professionals have a central role in promoting responsible antimicrobial use within animal production systems, while agricultural and

environmental scientists contribute essential knowledge concerning environmental persistence and transmission.

Food safety constitutes another central dimension of integrated agricultural and veterinary science. Foodborne pathogens, chemical residues, mycotoxins, heavy metals, veterinary drug residues, pesticide residues, contaminants, and emerging biological hazards can compromise public health and undermine consumer confidence. Ensuring food safety requires intervention across the entire production chain, from soil and seed selection to animal husbandry, veterinary care, harvesting, processing, storage, transportation, retail, and consumption. Veterinary inspection, laboratory diagnostics, agricultural monitoring, hazard analysis, traceability, and regulatory surveillance must operate within coordinated food-safety systems. The emergence of molecular detection technologies and digital traceability platforms creates new opportunities for identifying hazards more rapidly and improving transparency across complex supply chains.

Food-system resilience has consequently become a major scientific and policy objective. A resilient food system must possess the capacity to absorb disturbances, adapt to changing conditions, maintain essential functions, and recover from shocks. Contemporary disruptions may arise from climate extremes, infectious disease outbreaks, geopolitical conflict, market instability, energy shortages, transportation failures, cyber threats, or sudden changes in consumer demand. Agricultural resilience therefore depends on biological diversity, infrastructure, knowledge, financial capacity, institutional coordination, technological adaptability, and social capital. Resilience cannot be reduced to maintaining maximum production under normal conditions; it requires the capacity to sustain essential food-system functions under abnormal and unpredictable circumstances.

The transformation of agricultural systems also has profound implications for rural development. Rural communities are frequently the primary custodians of agricultural landscapes and natural resources, yet they may face limited access to capital, advanced technologies, veterinary services, education, infrastructure, markets, and research-based extension. Technological innovation that remains inaccessible to smallholders can potentially widen socioeconomic inequalities rather than reduce them. Sustainable agricultural transformation must therefore consider affordability, usability, local knowledge, education, infrastructure, institutional support, and equitable access. Digital agriculture, for example, offers substantial benefits but can create new forms of technological exclusion where connectivity, equipment, technical literacy, or financial resources are limited. Scientific progress must therefore be accompanied by mechanisms for knowledge transfer and inclusive capacity building.

Agricultural extension and professional education represent essential mechanisms for translating scientific knowledge into practical outcomes. Farmers, veterinarians, agronomists, agricultural engineers, laboratory specialists, food-safety professionals, environmental scientists, policymakers, and other stakeholders require continuously updated competencies because the knowledge base underlying modern agriculture is rapidly expanding. Contemporary professional education should increasingly emphasize systems thinking, data interpretation, evidence-based decision-making, biotechnology literacy, ecological awareness, animal welfare, antimicrobial stewardship, risk assessment, and interdisciplinary collaboration. The traditional separation between academic disciplines can limit the ability of professionals to recognize interactions across biological and environmental systems. Interdisciplinary education is therefore increasingly important for developing professionals capable of responding to complex agricultural and veterinary challenges.

Translational science provides a particularly valuable conceptual bridge between discovery and implementation. Agricultural and veterinary research generates substantial quantities of

knowledge at molecular, cellular, organismal, population, ecosystem, and socioeconomic levels, but scientific discoveries do not automatically translate into practical improvements. Translation requires validation, field testing, stakeholder engagement, economic assessment, regulatory evaluation, implementation science, and continuous feedback. A biotechnology developed in a laboratory may require years of testing before becoming a practical agricultural intervention. A veterinary diagnostic technology must demonstrate analytical validity, clinical utility, affordability, and operational feasibility. Similarly, a precision-agriculture platform must be evaluated under diverse climatic, soil, farm-size, and socioeconomic conditions before its broader effectiveness can be established.

Evidence-based agricultural and veterinary decision-making is consequently becoming increasingly important. Scientific interventions should be evaluated using robust experimental designs, epidemiological methods, longitudinal observations, risk assessments, economic analyses, and reproducible data practices. Artificial intelligence and machine learning may enhance prediction and pattern recognition, but algorithmic outputs remain dependent on data quality, representativeness, model validation, and appropriate interpretation. Digital systems should therefore complement rather than replace professional scientific judgment. The integration of computational methods with domain expertise is likely to be particularly important in complex environments characterized by heterogeneous biological and ecological processes.

The role of agricultural and veterinary sciences is also changing in response to global demographic and nutritional transitions. Increasing urbanization and income growth in many regions are modifying dietary patterns and increasing demand for animal-derived foods, fruits, vegetables, and processed agricultural commodities. At the same time, concerns regarding malnutrition, obesity, micronutrient deficiencies, food affordability, and dietary sustainability are generating new expectations for agricultural systems. Agricultural science must therefore consider not only how much food is produced but also its nutritional quality, safety, accessibility, affordability, environmental footprint, and contribution to healthy diets. Crop breeding programs increasingly incorporate nutritional traits, while livestock science considers animal health, product quality, feed efficiency, and environmental performance.

The relationship between agricultural productivity and environmental sustainability must therefore be approached through systems optimization rather than simplistic opposition. High productivity per unit of land can, under certain conditions, reduce pressure to convert additional natural ecosystems into agricultural land. However, productivity gains achieved through excessive chemical use, soil degradation, water depletion, or biodiversity loss may undermine long-term sustainability. The relevant scientific objective is consequently to optimize productivity while maintaining ecological functions and resource stocks. This requires context-specific assessment because the optimal balance among production, conservation, and socioeconomic objectives varies according to climate, soil, farm structure, market conditions, technology, and local institutions.

Veterinary animal-welfare science adds another important dimension to this systems perspective. Animal health and animal welfare are closely related but conceptually distinct constructs. Healthy animals may still experience poor welfare under inadequate housing, nutrition, handling, transport, or environmental conditions, while welfare-oriented systems can contribute to disease prevention and productivity. Modern livestock science increasingly integrates behavioral indicators, physiological measures, environmental assessment, nutritional status, morbidity, mortality, and management practices to evaluate welfare. The ethical treatment of animals is increasingly recognized as an important component of responsible agricultural production and food-system governance.

The increasing complexity of agricultural and veterinary systems also requires strengthened biosecurity. Globalization of trade, movement of animals and agricultural products, climate change, habitat disruption, and increasing human-animal-environment interfaces can facilitate the introduction and dissemination of pathogens. Biosecurity encompasses measures designed to prevent pathogen introduction, reduce transmission, and contain outbreaks. Farm-level hygiene, quarantine, vaccination, vector control, animal movement management, surveillance, diagnostic testing, and rapid response mechanisms are critical components. At the broader system level, biosecurity requires coordination among farmers, veterinarians, laboratories, public-health authorities, border agencies, environmental institutions, and international organizations.

Emerging infectious diseases illustrate the necessity of this integrated approach. Pathogens may evolve through mutation, recombination, host adaptation, ecological shifts, or changing patterns of human and animal interaction. Wildlife populations can serve as reservoirs, while agricultural systems may create amplification opportunities under particular conditions. Climate change can alter the geographic distribution of vectors and pathogens, while international trade can accelerate their movement across borders. Veterinary epidemiology, wildlife health, environmental surveillance, molecular biology, genomics, and public-health systems must therefore interact to identify emerging threats at an early stage.

The development of resilient agricultural systems also depends on genetic diversity. Modern breeding has produced major productivity improvements, but narrowing genetic diversity can increase vulnerability to novel pathogens, pests, and environmental stresses. Conservation of traditional varieties, indigenous livestock breeds, wild relatives, microbial diversity, and genetic resources therefore constitutes a strategic component of global agricultural security. Advances in genomics can support characterization and conservation of genetic resources while enabling the identification of traits associated with resilience, disease resistance, nutritional quality, and environmental adaptation.

Resource optimization extends beyond water and nutrients to include energy, land, labor, capital, biological inputs, and information. Agricultural production systems are increasingly evaluated according to input-output efficiency and environmental performance. Digital technologies can improve resource allocation, while circular agricultural approaches seek to recover nutrients and energy from agricultural residues and wastes. Integrated crop-livestock systems can create opportunities for nutrient cycling, while appropriate utilization of agricultural by-products can reduce waste and support resource efficiency. Such systems require careful evaluation because poorly managed recycling may increase pathogen transmission, contaminant accumulation, or nutrient losses.

Agricultural waste management is therefore an important component of ecological safety. Organic residues, manure, wastewater, plastics, packaging materials, chemical containers, and processing by-products can generate environmental hazards if improperly managed. Scientific approaches to waste valorization seek to transform some waste streams into useful products such as compost, bioenergy, biofertilizers, or other value-added materials. However, environmental safety must remain central to such approaches because biological wastes may contain pathogens, antimicrobial-resistant organisms, pharmaceuticals, heavy metals, or other contaminants. Appropriate treatment, monitoring, and regulatory standards are necessary to ensure that circularity does not unintentionally transfer hazards between environmental compartments.

The agricultural and veterinary sciences are also increasingly influenced by advances in systems biology and multi-omics. Genomic, transcriptomic, proteomic, metabolomic, microbiomic, and phenomic data can reveal biological interactions that were previously difficult to characterize.

In crop science, these approaches can elucidate plant responses to environmental stress and interactions with soil microorganisms. In veterinary medicine, they can support investigation of host-pathogen interactions, disease susceptibility, immune responses, and nutritional physiology. The integration of high-dimensional biological data with environmental and phenotypic information has the potential to accelerate precision breeding, disease prediction, personalized animal nutrition, and targeted interventions.

Microbiome research represents a particularly promising frontier at the intersection of agriculture, veterinary medicine, and environmental science. Soil microbiomes influence nutrient cycling, plant health, organic matter decomposition, and disease suppression. Animal microbiomes influence digestion, immunity, metabolism, and susceptibility to disease. Environmental microbial communities participate in contaminant transformation and nutrient cycles. Understanding these microbial ecosystems may facilitate development of targeted biological interventions that improve productivity while reducing reliance on synthetic chemicals. However, translation from microbiome research to agricultural practice requires rigorous understanding of ecological stability, context dependence, safety, and long-term consequences.

The scientific architecture of future agriculture will therefore likely be increasingly data-intensive, biologically informed, and environmentally integrated. Sensors, genomic platforms, remote sensing, artificial intelligence, automated systems, and advanced analytics can generate unprecedented amounts of information, but information abundance does not automatically produce knowledge. Scientific value depends on accurate measurement, appropriate experimental design, analytical validity, reproducibility, interoperability, and meaningful interpretation. Data governance and cybersecurity are also becoming relevant as agricultural systems become increasingly connected. Protecting data integrity and ensuring appropriate ownership and access will be important considerations in the digital transformation of agriculture.

The integration of agricultural and veterinary sciences also has implications for national and global policy. Food security, animal health, environmental protection, climate adaptation, antimicrobial resistance, and biodiversity conservation frequently cross administrative boundaries. Policies developed in isolation can generate unintended consequences elsewhere in the system. For example, measures aimed at increasing livestock production may influence antimicrobial use, environmental emissions, animal welfare, and zoonotic risks. Similarly, pesticide regulations may affect crop productivity, pollinator health, food safety, and farmer livelihoods. Integrated policy analysis is therefore required to evaluate trade-offs and identify interventions capable of producing multiple benefits.

Scientific governance should also incorporate precaution, proportionality, transparency, and evidence-based regulation. Emerging technologies such as gene editing, artificial intelligence, autonomous machinery, advanced biological products, and novel veterinary therapeutics create opportunities while raising legitimate questions regarding safety, ethics, equity, and accountability. Regulatory frameworks must remain scientifically rigorous without unnecessarily obstructing beneficial innovation. This requires continuous dialogue among scientists, regulators, agricultural producers, veterinarians, industry representatives, environmental organizations, and the public.

The economic dimension of agricultural innovation cannot be overlooked. Technologies must generate sufficient value to justify adoption, and their benefits must be assessed over appropriate time horizons. A practice that requires substantial initial investment but generates long-term soil restoration may be economically advantageous even if short-term profitability is lower. Conversely, a technology that increases immediate yield but accelerates resource

depletion may create hidden long-term costs. Economic evaluation should therefore incorporate environmental externalities, health consequences, resource depletion, and resilience benefits whenever possible. Such comprehensive evaluation can support more rational agricultural investment and policy decisions.

Smallholder farmers require particular attention within global agricultural transformation. Many agricultural communities operate under conditions of limited capital, uncertain markets, climate variability, and restricted access to veterinary and extension services. Technologies designed primarily for highly capitalized industrial systems may not be directly transferable to smaller production environments. Innovation should therefore include low-cost sensors, mobile advisory systems, community-based veterinary services, locally adapted crop varieties, cooperative models, and participatory research. Local knowledge should not be treated as a substitute for scientific evidence but as a valuable source of contextual understanding that can improve the applicability of scientific interventions.

Gender, education, labor, and social structures also influence agricultural resilience and technology adoption. Agricultural transformation is ultimately implemented by people, and the success of technological and biological innovations depends on human capacity to understand, finance, operate, maintain, and adapt them. Professional development, lifelong learning, extension systems, and accessible scientific communication are therefore central to implementation. Agricultural and veterinary universities have an important responsibility to prepare graduates for multidisciplinary practice in which biological science, technology, environmental stewardship, economics, ethics, and communication converge.

The future of veterinary medicine will likewise require broader competencies. Veterinarians increasingly function at the intersection of clinical practice, public health, food safety, epidemiology, animal production, environmental science, and policy. Veterinary education must consequently incorporate molecular diagnostics, epidemiological modeling, antimicrobial stewardship, One Health, animal welfare, environmental risk assessment, digital technologies, and evidence-based practice. Similar interdisciplinary integration is needed in agricultural education, where agronomists and crop scientists must increasingly understand climate science, microbiology, precision technology, ecological systems, and data analytics.

The development of sustainable agricultural systems ultimately requires moving beyond fragmented intervention toward integrated systems thinking. Crops, animals, soil, water, microorganisms, climate, technology, markets, communities, and institutions interact dynamically. Interventions that improve one component may negatively affect another if broader system relationships are ignored. Conversely, well-designed interventions can create synergistic benefits. Crop-livestock integration, for example, can improve nutrient cycling when appropriately managed; biodiversity-supportive farming can enhance ecological services; precision technologies can improve resource efficiency; veterinary preventive medicine can reduce disease-related production losses; and One Health surveillance can simultaneously protect animal and human populations.

This integrated scientific perspective provides the conceptual foundation for examining contemporary advances across agricultural and veterinary sciences as interconnected components of a larger sustainability transition. Sustainable crop production, animal health, precision agriculture, biotechnology, ecological safety, climate adaptation, biodiversity conservation, resource optimization, food-system resilience, One Health, and rural development should not be regarded as independent research themes. Rather, they represent interdependent dimensions of a complex system whose stability depends on interactions among biological, technological, environmental, economic, and social processes. The scientific

challenge is to identify approaches that simultaneously improve productivity, health, resilience, and ecological integrity while minimizing unintended consequences.

The concept of translational innovation is particularly important within this framework because the ultimate value of scientific discovery is realized through responsible application. Laboratory findings must be translated into validated technologies; technologies must be translated into accessible practices; practices must be evaluated under real-world conditions; and successful interventions must be incorporated into education, policy, and institutional systems. This translation process requires collaboration across disciplines and sectors and should be guided by measurable outcomes. Agricultural and veterinary research therefore increasingly requires partnerships among universities, research institutes, farmers, veterinary services, technology developers, biotechnology companies, food industries, environmental institutions, policymakers, and communities.

The transformation of agriculture and veterinary sciences represents a major scientific opportunity to redefine the relationship between productivity, health, technology, and ecological sustainability. The central challenge is not simply to produce more food or develop more sophisticated technologies, but to construct agricultural and veterinary systems capable of sustaining biological productivity while preserving the environmental and social foundations upon which that productivity depends. Such systems must be adaptive rather than static, preventive rather than exclusively reactive, evidence-based rather than assumption-driven, and interdisciplinary rather than fragmented. They must incorporate technological innovation without neglecting ecological limits, increase productivity without compromising animal welfare, enhance food availability without sacrificing food safety, and promote economic development without generating unacceptable environmental costs.

The contemporary agricultural and veterinary sciences are evolving toward an integrative paradigm characterized by convergence among precision technologies, biotechnology, environmental sciences, animal health, crop science, epidemiology, data science, food safety, climate science, and One Health. This convergence offers the possibility of developing agricultural systems that are more precise, productive, resilient, resource-efficient, biologically secure, environmentally responsible, and socially inclusive. However, realizing this potential requires sustained scientific investigation, interdisciplinary collaboration, robust regulatory frameworks, professional education, technological accessibility, responsible innovation, and continuous evaluation of ecological and societal consequences. The future trajectory of global food and agricultural systems will depend increasingly on the capacity of science to integrate these dimensions rather than address them in isolation.

The contemporary scientific agenda in agriculture and veterinary sciences should be directed toward generating actionable knowledge capable of simultaneously addressing production efficiency, animal and plant health, environmental integrity, climate resilience, food safety, biodiversity, resource conservation, and human well-being. The integration of sustainable crop production with advanced veterinary health management, precision agriculture, biotechnology, ecological risk assessment, climate adaptation, and One Health provides a scientifically coherent pathway toward this objective. Such an approach recognizes that the sustainability of agriculture cannot be separated from the health of animals, people, ecosystems, and communities. It further recognizes that technological progress must be evaluated within the ecological and socioeconomic systems in which it operates. Through this integrated perspective, agricultural and veterinary sciences can contribute not only to increased productivity but also to the development of resilient food systems, healthier animal populations, protected ecosystems, sustainable rural economies, and a more secure global food future.

BACKGROUND

Agriculture and veterinary sciences have progressively evolved from relatively specialized academic and professional disciplines into interconnected components of a broader scientific system concerned with food production, biological health, environmental sustainability, ecosystem resilience, and human well-being. The historical development of modern agriculture was strongly influenced by the objective of increasing crop and livestock productivity through mechanization, genetic improvement, irrigation, fertilization, chemical protection, improved animal nutrition, veterinary therapeutics, and intensive production systems. These developments contributed substantially to global increases in food availability and agricultural efficiency. Nevertheless, the ecological and biological consequences associated with intensive production, together with accelerating climate change, natural-resource depletion, biodiversity decline, emerging infectious diseases, antimicrobial resistance, environmental contamination, and socioeconomic inequalities, have generated a fundamental need to reconsider conventional models of agricultural and veterinary development. Contemporary scientific thinking increasingly recognizes that the long-term sustainability of agricultural production depends on the simultaneous maintenance of productive capacity, ecosystem integrity, animal health and welfare, food safety, public health, resource efficiency, and socioeconomic resilience.

The conceptual foundations of sustainable agriculture emerged partly in response to the environmental consequences associated with twentieth-century agricultural intensification. Although intensified production generated substantial increases in yield per unit of land, it also created pressures on soil fertility, freshwater systems, biodiversity, and ecosystem functioning in many production environments. Excessive or poorly managed fertilizer application may contribute to nutrient runoff and eutrophication, inappropriate pesticide use can affect non-target organisms, intensive irrigation may accelerate water depletion and salinization, and repeated monocropping can reduce biological and genetic diversity. These processes demonstrate that agricultural productivity cannot be evaluated independently from the ecological systems that sustain it. Soil, water, microorganisms, pollinators, beneficial insects, genetic resources, and surrounding ecosystems constitute essential components of agricultural production rather than external environmental considerations. Sustainable agricultural science therefore increasingly seeks to optimize productivity while preserving the biological, chemical, and physical processes necessary for long-term agroecosystem functionality.

The scientific understanding of agricultural ecosystems has also expanded considerably through developments in agroecology, soil science, plant physiology, microbiology, genetics, ecology, environmental chemistry, and systems biology. Agroecosystems are now increasingly examined as dynamic biological systems in which energy flows, nutrient cycles, species interactions, microbial communities, climatic conditions, and management practices interact continuously. This systems perspective challenges linear assumptions concerning agricultural inputs and outputs and emphasizes feedback relationships among environmental and production variables. Soil microorganisms influence nutrient availability and plant health; plant diversity influences pest and disease dynamics; livestock influence nutrient cycling and landscape management; water availability affects crop physiology and microbial activity; and climate conditions influence both plant and animal health. The integration of these relationships is therefore essential for designing production systems that are simultaneously productive, resilient, and environmentally responsible.

Crop production remains one of the central pillars of global food security, but the scientific requirements for sustainable crop production have become increasingly complex. Agricultural systems must provide adequate quantities of safe and nutritious food while responding to changing climatic conditions, declining natural-resource availability, emerging pests and

pathogens, and evolving socioeconomic requirements. Conventional approaches based predominantly on increasing external inputs may not provide a universally sustainable pathway. Contemporary crop science increasingly emphasizes integrated nutrient management, conservation agriculture, crop diversification, integrated pest management, soil-health preservation, water-use efficiency, biological control, improved genetic resources, agroforestry, and regenerative practices. These approaches aim to enhance biological productivity while reducing environmental pressures and improving the capacity of agricultural systems to withstand disturbances.

The development of climate-resilient agriculture has become particularly important because climate change influences nearly every component of agricultural production. Increasing temperatures can affect crop phenology, photosynthesis, reproductive success, and yield. Altered precipitation patterns can generate drought, flooding, or irregular water availability. Extreme weather events can cause direct crop destruction, soil erosion, infrastructure damage, livestock mortality, and disruption of agricultural supply chains. Climate change may also alter the geographical distribution and seasonal dynamics of agricultural pests, pathogens, and vectors. Consequently, agricultural adaptation increasingly requires integration of climate science with crop physiology, genetics, soil management, hydrology, pest management, and agricultural engineering. Resilience is not simply the ability to tolerate a single climatic event; it represents the broader capacity of agricultural systems to maintain essential functions under persistent uncertainty and environmental change.

Genetic improvement represents an important component of agricultural adaptation. Crop varieties possessing tolerance to drought, heat, salinity, pathogens, pests, and nutrient limitations can reduce vulnerability to environmental stress. Advances in genomics and molecular breeding have substantially expanded the ability to identify genetic determinants associated with desirable traits. Genomic selection, marker-assisted selection, high-throughput phenotyping, and increasingly sophisticated molecular approaches can accelerate breeding programs and enable more precise utilization of genetic diversity. At the same time, conservation of traditional varieties and wild relatives remains essential because genetic resources provide the raw material for future adaptation. Agricultural resilience therefore requires both technological innovation and preservation of biological diversity.

Biotechnology has emerged as one of the most influential scientific domains contributing to agricultural transformation. Modern agricultural biotechnology extends beyond genetically modified crops and encompasses molecular breeding, genome editing, microbial biotechnology, tissue culture, molecular diagnostics, biofertilizers, biopesticides, plant-growth-promoting microorganisms, reproductive technologies, and systems biology. These approaches can contribute to improving productivity, nutritional quality, resistance to environmental stress, and resource-use efficiency. However, biotechnology must be evaluated within comprehensive biosafety and ecological frameworks. The release or widespread application of biological technologies requires assessment of potential effects on non-target organisms, genetic diversity, ecosystem interactions, food safety, and socioeconomic structures. Responsible biotechnology therefore requires scientific evidence, regulatory oversight, transparent risk assessment, and continuous environmental monitoring.

Microbial biotechnology is particularly relevant to sustainable agriculture because microorganisms play fundamental roles in soil fertility, nutrient cycling, plant health, and ecosystem functioning. Beneficial microorganisms can contribute to nitrogen fixation, phosphorus mobilization, production of plant-growth-promoting compounds, suppression of pathogens, and decomposition of organic matter. Biofertilizers and microbial biocontrol agents may reduce reliance on synthetic agricultural inputs under appropriate conditions. Nevertheless,

microbial interventions are context dependent because their effectiveness can vary according to soil properties, climatic conditions, crop genotype, microbial communities, and agricultural management. Consequently, translational research is required to determine when and where biological products can reliably produce agronomic and ecological benefits.

Precision agriculture represents another major transformation in contemporary agricultural science. Traditional agricultural management frequently applies inputs uniformly across fields despite substantial spatial and temporal heterogeneity. Precision agriculture seeks to overcome this limitation through measurement, monitoring, analysis, and site-specific management. Satellite imagery, remote sensing, unmanned aerial systems, geographic information systems, soil sensors, weather stations, yield monitors, variable-rate technologies, automated machinery, and digital decision-support systems provide increasingly detailed information concerning agricultural conditions. Artificial intelligence and machine-learning algorithms can analyze complex datasets and identify patterns that may not be readily recognized through conventional observation. These technologies have the potential to improve fertilizer efficiency, irrigation management, pest detection, disease diagnosis, yield forecasting, and resource allocation.

The scientific significance of precision agriculture extends beyond technological novelty. Its principal value lies in enabling more precise matching of agricultural interventions to biological and environmental requirements. Early detection of crop stress can permit targeted intervention before substantial yield losses occur. Soil sensors can improve irrigation scheduling and reduce unnecessary water application. Remote sensing can identify spatial variability in crop development and support differentiated management. Variable-rate fertilizer application can potentially reduce nutrient losses while maintaining crop productivity. However, precision agriculture also introduces new challenges concerning data quality, infrastructure, farmer training, interoperability, cybersecurity, algorithmic reliability, and economic accessibility. The benefits of digital agriculture may be distributed unevenly if technologies remain financially or technically inaccessible to smaller producers.

Artificial intelligence is increasingly becoming a component of agricultural decision-making. Machine-learning systems can be trained to classify crop diseases, predict yields, estimate soil properties, identify weeds, optimize irrigation, and forecast environmental risks. In livestock systems, artificial intelligence can analyze animal behavior, movement, feeding patterns, physiological measurements, and production data. These applications may support earlier detection of disease and improved management. However, agricultural artificial intelligence requires careful validation because models trained in one geographical, climatic, or production context may not generalize effectively to another. Transparent validation, uncertainty estimation, explainability, representative datasets, and professional oversight are therefore essential to responsible application.

Veterinary sciences have undergone a parallel transformation. Historically centered on diagnosis and treatment of individual animals, veterinary medicine has increasingly developed into a multidisciplinary field incorporating population medicine, epidemiology, preventive medicine, animal production, public health, food safety, wildlife health, environmental health, biotechnology, and animal welfare. This evolution reflects recognition that animal health has consequences extending far beyond individual animals. Disease outbreaks can disrupt food production, reduce household income, affect trade, threaten food safety, and create zoonotic risks. Preventive veterinary medicine is consequently an important component of agricultural resilience.

Animal health is fundamentally connected with agricultural productivity. Disease can reduce growth, reproductive performance, milk production, meat production, egg production, working capacity, and survival. Subclinical disease may produce substantial economic losses even when

visible clinical symptoms are limited. Veterinary preventive programs involving vaccination, biosecurity, nutrition, parasite control, reproductive management, diagnostic surveillance, and appropriate therapeutics can reduce these losses. The scientific emphasis is increasingly shifting from reactive treatment toward prevention, early detection, population health management, and risk reduction.

Animal welfare has also become an increasingly important dimension of contemporary veterinary and agricultural science. Scientific assessment of welfare incorporates physiological, behavioral, nutritional, health-related, and environmental indicators. Housing conditions, stocking density, transport, handling, nutrition, thermal environment, disease burden, and opportunities for species-appropriate behavior can influence welfare outcomes. Improved welfare can also have implications for disease prevention, productivity, product quality, and public confidence in agricultural systems. Consequently, responsible livestock production requires simultaneous consideration of health, welfare, productivity, environmental sustainability, and ethical standards.

Veterinary pharmacology and antimicrobial stewardship constitute critical areas at the intersection of animal health and public health. Antimicrobial agents remain indispensable for the treatment of bacterial infections in animals, but inappropriate use may contribute to the emergence and dissemination of antimicrobial resistance. Veterinary prescribing decisions should therefore be guided by accurate diagnosis, appropriate antimicrobial selection, evidence-based dosing, duration optimization, susceptibility testing where feasible, and consideration of alternatives such as vaccination and improved biosecurity. Antimicrobial stewardship must extend beyond clinical practice to include surveillance of resistance patterns, monitoring of antimicrobial consumption, environmental assessment, and professional education.

Antimicrobial resistance demonstrates particularly clearly why agriculture, veterinary medicine, environmental science, and human medicine cannot be treated as independent domains. Resistant microorganisms and resistance genes can circulate through animal populations, agricultural environments, food chains, water systems, wildlife, and human communities. Manure and wastewater may contribute to environmental dissemination when antimicrobial residues or resistant organisms are present. The environmental dimension of antimicrobial resistance has therefore become increasingly important in scientific and policy discussions. Integrated surveillance and coordinated intervention are required to understand and mitigate these complex transmission pathways.

The One Health framework provides a conceptual basis for addressing these interconnections. One Health recognizes that human health, animal health, plant health, and environmental health are interconnected within shared ecosystems. Its significance is particularly apparent in relation to zoonotic diseases, antimicrobial resistance, foodborne pathogens, vector-borne diseases, environmental contamination, and emerging infectious threats. Agricultural and veterinary sciences provide essential components of One Health because livestock, companion animals, wildlife, crops, soil, water, and humans interact continuously within ecological and socioeconomic systems.

Zoonotic disease emergence is influenced by a combination of biological, ecological, climatic, and socioeconomic factors. Habitat alteration, agricultural expansion, wildlife contact, livestock intensification, animal movement, global trade, and climatic changes can alter opportunities for pathogen transmission. Veterinary surveillance can identify disease events in animal populations before they become substantial threats to human populations. Wildlife monitoring can provide information about pathogen reservoirs, while environmental surveillance can identify contamination pathways. Molecular epidemiology and genomic technologies can further support investigation of pathogen evolution and transmission.

Food safety provides another major justification for integrated agricultural and veterinary systems. Food products can become contaminated with pathogens, chemical residues, veterinary medicines, pesticides, mycotoxins, heavy metals, or other hazards during production, processing, storage, transportation, or distribution. Veterinary services play important roles in monitoring animal diseases, inspecting food-producing animals, assessing residues, and supporting food-safety systems. Agricultural science contributes knowledge concerning pesticide use, soil contamination, crop pathogens, mycotoxin management, irrigation water, and post-harvest handling. Food safety therefore represents a continuum extending from environmental conditions and agricultural practices to consumer health.

Ecological safety encompasses a broader assessment of the environmental consequences of agricultural and veterinary interventions. Agricultural chemicals may affect soil organisms, aquatic ecosystems, pollinators, birds, and other non-target species. Veterinary pharmaceuticals may enter manure, soil, surface water, and groundwater following excretion and waste disposal. Persistent contaminants may accumulate within environmental compartments and potentially enter food chains. Ecotoxicological assessment is therefore necessary to determine environmental exposure, persistence, transformation, bioaccumulation, and biological effects. Ecological safety requires that production systems be designed not only to prevent direct human toxicity but also to maintain ecosystem functions.

Biodiversity conservation has become increasingly integrated into agricultural sustainability because biological diversity supports ecosystem services essential for food production. Pollinators contribute to reproduction of many crops, natural enemies regulate pests, soil organisms support nutrient cycling, and diverse plant communities can stabilize ecosystems. Loss of biodiversity can reduce ecological resilience and increase dependence on external inputs. Agricultural landscapes that incorporate habitat diversity, agroforestry, crop rotation, mixed cropping, ecological corridors, and conservation areas may provide opportunities to maintain biodiversity while supporting production.

The relationship between agriculture and biodiversity is nevertheless complex. Agricultural land expansion can be a major driver of habitat conversion, while agricultural intensification can reduce within-landscape diversity. At the same time, abandonment of certain traditional agricultural landscapes can also alter biodiversity patterns. Scientific management therefore requires landscape-specific evaluation rather than universal assumptions. Conservation strategies should consider production needs, ecological characteristics, cultural practices, socioeconomic conditions, and long-term ecosystem dynamics.

Soil health has emerged as a central concept linking productivity and ecological sustainability. Healthy soils support plant growth, water infiltration, nutrient cycling, carbon storage, and biological diversity. Soil degradation can reduce agricultural productivity and increase vulnerability to drought and erosion. Organic matter management, reduced disturbance, crop diversification, cover crops, appropriate nutrient application, biological amendments, and integrated crop-livestock systems may contribute to soil-health improvement. The scientific assessment of soil health increasingly combines physical, chemical, and biological indicators rather than relying exclusively on conventional fertility measurements.

Carbon management represents another important component of agricultural sustainability. Agricultural soils can function as carbon reservoirs when appropriately managed, while certain production processes generate greenhouse-gas emissions. Livestock systems contribute methane and nitrous oxide emissions through biological and management processes, while fertilizer production and use can generate additional emissions. Mitigation strategies include improved feed efficiency, manure management, optimized fertilizer application, soil-carbon enhancement, agroforestry, renewable energy integration, and improved production efficiency.

However, mitigation measures should be evaluated against potential trade-offs with food production, biodiversity, animal welfare, and farmer livelihoods.

Resource optimization extends across water, land, nutrients, energy, biological inputs, labor, and financial capital. The objective is not merely to minimize inputs but to improve the efficiency with which resources are transformed into socially valuable outputs while maintaining ecological functions. Precision agriculture may reduce unnecessary input application, while integrated systems may improve nutrient cycling. Circular agricultural approaches seek to recover value from residues and waste streams. Renewable energy can reduce dependence on fossil fuels, while improved logistics and storage can reduce post-harvest losses. Resource optimization should therefore be considered across the complete agricultural value chain.

Post-harvest losses and food waste represent significant inefficiencies within food systems. Agricultural production cannot contribute fully to food security if substantial quantities of food are lost during harvesting, storage, processing, transportation, or retail. Improved storage technologies, cold-chain infrastructure, packaging, pest control, quality monitoring, processing technologies, and digital supply-chain management may reduce these losses. Veterinary and agricultural sciences contribute through preservation of animal and crop health before harvest and through quality and safety management after production.

Food-system resilience has become increasingly important as agricultural systems face multiple simultaneous disturbances. Climate extremes can occur alongside disease outbreaks, market instability, energy disruptions, geopolitical events, or supply-chain constraints. Resilience requires diversification of production, genetic resources, infrastructure, knowledge, markets, and supply pathways. Local and regional food production may contribute to resilience under some circumstances, while international trade can provide access to diversified sources of food and agricultural inputs. The optimal balance depends on geography, infrastructure, economics, and policy.

Rural development constitutes the socioeconomic foundation of sustainable agriculture. Farmers and rural communities are central actors in the implementation of agricultural technologies and environmental practices. Yet rural populations may face structural limitations involving infrastructure, finance, market access, education, healthcare, veterinary services, digital connectivity, and extension support. Sustainable agricultural transformation therefore requires not only technological innovation but also investment in human capital and institutional capacity. Scientific knowledge must be translated into practical solutions that are affordable, culturally appropriate, technically feasible, and adapted to local conditions.

Agricultural extension services have historically served as important mechanisms for transferring knowledge from research institutions to producers. Their role is becoming increasingly complex as farmers require information concerning climate adaptation, digital technologies, integrated pest management, animal health, antimicrobial stewardship, biotechnology, environmental regulation, and market conditions. Modern extension systems increasingly combine face-to-face professional support with digital platforms, mobile applications, remote sensing, decision-support tools, and participatory approaches. Effective knowledge transfer requires two-way communication in which local experience contributes to the refinement of scientific recommendations.

Education and professional competency development are similarly important in veterinary sciences. Modern veterinarians require competencies extending beyond clinical diagnosis and treatment. Epidemiology, public health, laboratory science, antimicrobial stewardship, animal welfare, food safety, environmental health, data analysis, biotechnology, and One Health principles are increasingly relevant to professional practice. Agricultural professionals likewise

require interdisciplinary competencies spanning crop science, soil management, environmental protection, digital technology, biotechnology, economics, and climate adaptation. Universities and research institutions therefore have a major responsibility to prepare professionals for increasingly integrated scientific environments.

Research methodology has also become more interdisciplinary. Complex agricultural and veterinary questions frequently require combinations of field experiments, laboratory studies, molecular analyses, epidemiological investigations, remote sensing, longitudinal monitoring, statistical modeling, economic analysis, and qualitative research. Integration of these methods can provide more comprehensive understanding than reliance on a single methodological approach. Big-data analytics and artificial intelligence may complement conventional statistical methods, but robust experimental design and domain expertise remain essential for distinguishing meaningful biological signals from statistical artifacts.

Translational research is particularly important because a substantial gap can exist between scientific discovery and practical implementation. Laboratory-based innovations may fail under field conditions because of environmental variability, economic constraints, technical limitations, or differences in biological systems. Translational agricultural and veterinary research therefore requires iterative movement between laboratory, experimental, field, clinical, and policy environments. Stakeholder engagement should occur throughout the research process so that scientific questions and technological solutions address genuine production and health needs.

Regulatory science represents another critical component of agricultural and veterinary innovation. Biotechnology, veterinary pharmaceuticals, pesticides, biological products, animal feeds, food technologies, and digital systems may require regulatory evaluation before widespread implementation. Regulation should protect public health, animal health, environmental integrity, and consumer interests while allowing responsible scientific innovation. Evidence-based regulatory systems require reliable data, standardized testing, risk assessment, monitoring, and transparent decision-making.

Biosecurity has gained increasing importance in both crop and animal production. In livestock systems, biosecurity measures can reduce pathogen introduction and transmission through quarantine, hygiene, vaccination, controlled animal movement, vector management, and environmental sanitation. In crop systems, biosecurity encompasses surveillance of pests and pathogens, quarantine, seed health, resistant varieties, and responsible movement of biological material. Global trade and transportation increase the importance of coordinated surveillance because biological threats can cross national borders rapidly.

The environmental dimension of biosecurity is also significant. Pathogens and invasive species can persist in soil, water, wildlife, and agricultural environments, creating reservoirs that complicate eradication. Climate change may alter these environmental niches and facilitate the expansion of organisms into previously unsuitable regions. Integrated environmental surveillance can therefore support early detection and risk assessment. Molecular diagnostics and genomic surveillance increasingly allow identification and characterization of pathogens with greater speed and precision.

The growing importance of ecological and biological surveillance illustrates the transition from reactive to anticipatory approaches. Traditional agricultural and veterinary systems often responded after disease, pest infestation, or environmental degradation became apparent. Modern systems increasingly seek early-warning indicators capable of identifying risks before major impacts occur. Sensor networks, remote sensing, genomic surveillance, environmental sampling, predictive modeling, and integrated databases can support this transition. The ultimate objective is to enable preventive intervention rather than costly crisis response.

The concept of resilience therefore extends beyond the capacity of individual crops or animals to tolerate stress. Resilient agricultural systems include resilient ecosystems, resilient infrastructure, resilient institutions, resilient supply chains, resilient professional workforces, and resilient rural communities. Such resilience depends on diversity, redundancy, adaptive capacity, learning, innovation, and effective governance. Agricultural and veterinary sciences contribute to these dimensions through biological research, technological development, preventive medicine, environmental management, and knowledge generation.

The increasing complexity of agricultural systems also creates a need for ethical reflection. Biotechnology, animal experimentation, gene editing, intensive livestock production, artificial intelligence, data collection, environmental interventions, and genetic selection raise questions concerning animal welfare, ecological integrity, equity, ownership, privacy, and social responsibility. Scientific innovation should therefore be accompanied by ethical analysis and stakeholder engagement. Responsible innovation requires anticipation of potential consequences, inclusion of diverse perspectives, reflexivity concerning scientific assumptions, and mechanisms for accountability.

Equity is particularly important in technological transformation. Advanced precision-agriculture equipment, genomic technologies, automated systems, and digital platforms may provide significant benefits but may remain inaccessible to resource-limited farmers. If technological adoption becomes concentrated among large producers, disparities in productivity and market access could increase. Inclusive innovation therefore requires attention to cost, scalability, interoperability, technical support, financing mechanisms, and local capacity. Technologies should be evaluated not only according to technical performance but also according to distributional effects.

The global nature of food systems reinforces the need for international scientific cooperation. Crop diseases, animal diseases, antimicrobial resistance, invasive species, climate change, food contamination, and supply-chain disruptions cross national boundaries. International collaboration facilitates sharing of surveillance information, genetic resources, scientific expertise, diagnostic methods, regulatory knowledge, and emergency-response capacity. Harmonized standards and interoperable surveillance systems can strengthen global preparedness while allowing adaptation to regional circumstances.

Agriculture and veterinary sciences are consequently positioned at the center of several major global scientific transitions. The transition toward sustainable food production requires integration of biological productivity and ecological stewardship. The digital transition requires integration of data science and agricultural expertise. The biotechnology transition requires integration of molecular innovation and responsible risk governance. The One Health transition requires integration of human, animal, plant, and environmental health. The climate transition requires integration of adaptation, mitigation, resilience, and resource conservation. These transformations are not independent; they interact and frequently reinforce one another.

The development of sustainable crop production, for example, can contribute to ecological safety by reducing unnecessary chemical inputs, while precision agriculture can improve resource efficiency and climate resilience. Biotechnology can generate stress-tolerant crops, while biodiversity conservation can preserve genetic resources required for future breeding. Veterinary preventive medicine can reduce disease-related losses and antimicrobial consumption, while improved animal welfare can contribute to sustainable livestock production. One Health surveillance can detect zoonotic and antimicrobial-resistance threats, while environmental monitoring can identify contamination pathways. The greatest scientific potential therefore emerges when these approaches are integrated rather than implemented independently.

The concept of translational innovation provides an overarching mechanism for connecting scientific discovery with agricultural and veterinary practice. Scientific findings must be converted into validated technologies, evidence-based protocols, professional competencies, practical interventions, regulatory standards, and policy instruments. Translation requires multidisciplinary teams capable of understanding biological mechanisms, technological systems, production environments, economic conditions, environmental consequences, and social realities. Successful translation is therefore not merely a technological process but an institutional and societal process.

The future development of agriculture and veterinary sciences will increasingly depend on the capacity to integrate high-resolution biological information with ecological and socioeconomic knowledge. Genomic information can be combined with phenotypic measurements, environmental data, production records, and epidemiological observations. Precision agriculture can integrate soil, weather, crop, and economic information. Precision livestock farming can integrate animal physiology, behavior, nutrition, disease status, and environmental conditions. Such integration creates opportunities for more individualized and predictive management, but it also requires advanced analytical infrastructures and scientifically trained professionals.

A critical background principle for this emerging paradigm is that productivity and sustainability should not be treated as mutually exclusive objectives. The challenge is to develop production systems in which productivity gains arise from improved knowledge, biological efficiency, resource optimization, preventive health, genetic adaptation, and technological precision rather than from unsustainable expansion of external inputs. Agricultural intensification may therefore be reconceptualized as knowledge-intensive rather than simply input-intensive. Precision management, improved genetics, biological control, efficient irrigation, integrated nutrient management, preventive veterinary medicine, and digital decision support can collectively contribute to this transition.

The scientific rationale for an integrated agricultural and veterinary framework is therefore grounded in the recognition that food production, animal health, ecological integrity, environmental safety, climate resilience, biodiversity, resource management, and rural development are interdependent. Crop and livestock systems are embedded within ecosystems and socioeconomic structures, and interventions at one level can influence outcomes at multiple others. An agricultural technology may affect biodiversity; a veterinary pharmaceutical may influence environmental microbial communities; climate change may alter animal disease patterns; agricultural intensification may modify zoonotic interfaces; and socioeconomic conditions may determine whether scientific innovations are adopted effectively.

Against this background, the emerging paradigm of agricultural and veterinary sciences can be characterized by convergence, integration, prevention, precision, sustainability, and translation. Convergence refers to the increasing interaction among disciplines that were previously considered separate. Integration refers to the coordinated consideration of production, health, environment, technology, and society. Prevention emphasizes anticipation and risk reduction rather than exclusive reliance on treatment or remediation. Precision refers to increasingly individualized management based on high-resolution information. Sustainability requires preservation of ecological and socioeconomic foundations over time. Translation ensures that scientific discoveries become practical improvements.

This scientific evolution creates an imperative for research frameworks that move beyond isolated disciplinary questions and address the complexity of contemporary agricultural systems. Such frameworks should incorporate experimental and observational evidence, technological innovation, environmental assessment, epidemiological surveillance, economic

evaluation, ethical analysis, and stakeholder participation. They should also recognize regional variation and avoid assuming that a single technological or management strategy will produce equivalent outcomes across different ecological and socioeconomic contexts.

The integration of agriculture and veterinary sciences within a One Health and ecological-safety framework is particularly important for developing resilient food systems. Healthy crops, healthy animals, healthy environments, and healthy communities are interconnected elements of food-system stability. Protecting one component while neglecting others may generate vulnerabilities that become evident only after major disturbances. Conversely, coordinated interventions can create synergistic benefits by reducing disease, conserving resources, protecting biodiversity, improving productivity, strengthening livelihoods, and enhancing food safety.

The contemporary scientific challenge is therefore not simply to expand the technological capacity of agricultural and veterinary systems but to ensure that such capacity is directed toward sustainable and responsible objectives. The most meaningful advances will be those capable of producing measurable improvements in productivity, animal health, crop health, food safety, environmental quality, resource efficiency, climate resilience, biodiversity, and rural well-being simultaneously or through carefully managed trade-offs. This requires a transition from fragmented optimization toward systems-level optimization, supported by interdisciplinary evidence and continuous monitoring.

The background to contemporary agricultural and veterinary science is defined by the convergence of multiple global pressures and multiple scientific opportunities. Climate change demands adaptation and mitigation; biodiversity decline demands ecological stewardship; food insecurity demands resilient production; antimicrobial resistance demands integrated health governance; emerging diseases demand One Health surveillance; technological transformation demands digital and scientific competencies; and rural socioeconomic challenges demand inclusive innovation. None of these challenges can be adequately addressed through isolated disciplinary action. Their interconnected nature requires a comprehensive scientific framework capable of integrating sustainable crop production, animal health, precision agriculture, biotechnology, food-system resilience, ecological safety, climate adaptation, biodiversity conservation, resource optimization, One Health, and rural development.

The resulting scientific agenda is fundamentally translational and systems oriented. It seeks to connect molecular discoveries with field applications, digital technologies with professional judgment, veterinary medicine with public health, crop production with ecological conservation, and agricultural innovation with rural development. Such integration offers a pathway toward agricultural and veterinary systems that are more productive without being environmentally destructive, technologically advanced without becoming socially exclusive, biologically innovative without compromising safety, and resilient without sacrificing ecological integrity. The future sustainability of global food systems will ultimately depend on the capacity of agricultural and veterinary sciences to operate as interconnected components of a unified scientific endeavor directed toward the health of crops, animals, ecosystems, communities, and future generations.

GOAL

The primary goal of this integrative scientific investigation is to critically examine contemporary advances, emerging paradigms, and translational innovations across agricultural and veterinary sciences, with particular emphasis on their interconnected contributions to sustainable crop production, animal health and welfare, precision agriculture, biotechnology, food-system resilience, ecological safety, climate adaptation, biodiversity conservation,

resource optimization, One Health, and rural development. The study further aims to synthesize interdisciplinary scientific knowledge and technological developments into a coherent systems-oriented framework capable of strengthening productivity, environmental sustainability, disease prevention, resource efficiency, food safety, climate resilience, and socioeconomic viability. Particular attention is directed toward the translational integration of advanced agricultural technologies, veterinary preventive medicine, genomics, biotechnology, digital decision-support systems, precision production, ecological management, and One Health principles. Ultimately, the investigation seeks to identify strategic scientific priorities and evidence-informed pathways through which innovation, interdisciplinary collaboration, responsible technology deployment, and sustainable governance can collectively enhance the resilience, efficiency, safety, and long-term sustainability of interconnected agricultural, veterinary, ecological, and rural development systems.

METHODOLOGY

This study employs an integrative, interdisciplinary, and systems-oriented methodological framework designed to synthesize contemporary scientific knowledge concerning agricultural and veterinary sciences and their intersections with environmental sustainability, technological innovation, food security, animal health, and One Health. The methodological approach combines critical literature synthesis, comparative scientific analysis, conceptual integration, and translational interpretation of evidence derived from agricultural sciences, veterinary medicine, biotechnology, environmental sciences, precision agriculture, ecological research, food systems science, and rural development. Particular emphasis is placed on peer-reviewed scientific literature, authoritative international scientific reports, contemporary technological developments, and evidence addressing sustainable crop production, precision production systems, animal health and welfare, biotechnology, climate adaptation, biodiversity conservation, resource optimization, ecological safety, antimicrobial stewardship, food-system resilience, and One Health.

The analytical process evaluates scientific developments according to their biological, technological, ecological, epidemiological, socioeconomic, and translational significance. Evidence is comparatively examined to identify convergent findings, emerging research paradigms, technological opportunities, persistent limitations, implementation barriers, and knowledge gaps. Particular attention is given to the capacity of precision agriculture, artificial intelligence, remote sensing, geographic information systems, genomics, molecular breeding, gene-editing technologies, microbial biotechnology, digital veterinary diagnostics, disease surveillance, and data-driven decision-support systems to improve productivity while reducing environmental pressures and strengthening resilience.

A systems-thinking perspective is applied to interpret interactions among crops, livestock, soil, water, microorganisms, ecosystems, climate conditions, agricultural communities, food chains, and human populations. The methodology consequently avoids treating agricultural production and veterinary health as isolated domains and instead evaluates them as interconnected components of complex agroecological and socioeconomic systems. One Health principles provide an overarching analytical perspective for examining zoonotic disease prevention, antimicrobial resistance, food safety, environmental health, animal welfare, and population health.

The synthesis further incorporates translational analysis to assess how scientific discoveries can be converted into practical agricultural, veterinary, environmental, technological, and policy interventions. Evidence is interpreted in relation to sustainability, scalability, economic feasibility, ethical responsibility, regulatory governance, equity, and applicability across

diverse production systems. Through this methodological framework, the study develops an evidence-informed conceptual synthesis intended to identify scientifically credible pathways for integrating innovation, ecological stewardship, animal and human health protection, climate resilience, resource efficiency, and sustainable rural development.

RESEARCH AND FINDINGS

The integrated analysis demonstrates that contemporary agricultural and veterinary sciences are undergoing a profound transition from predominantly sector-specific, production-oriented paradigms toward interconnected, data-intensive, biologically informed, environmentally responsible, and translational systems. The findings indicate that agricultural productivity, animal health, environmental integrity, food-system resilience, and rural socioeconomic development can no longer be conceptualized as independent scientific or policy domains. Rather, they constitute mutually dependent components of complex agroecosystems in which biological processes, technological infrastructures, climatic pressures, ecological conditions, economic incentives, and human decision-making continuously interact. This convergence represents one of the most consequential developments in contemporary agricultural and veterinary science because it redefines scientific progress not merely in terms of increased production, but in terms of the capacity of agricultural systems to produce safe and nutritious food while maintaining ecosystem functionality, protecting animal and human health, conserving biological diversity, optimizing finite resources, and adapting to increasingly dynamic environmental conditions.

A central finding is that sustainable agricultural intensification increasingly depends upon the simultaneous optimization of productivity, resource efficiency, ecological compatibility, and resilience. Conventional approaches that maximize yield through increased application of fertilizers, pesticides, irrigation, mechanization, and other external inputs may produce substantial short-term gains, but their long-term effectiveness is constrained by soil degradation, water scarcity, biodiversity loss, chemical contamination, greenhouse-gas emissions, pest resistance, declining ecosystem services, and increasing production costs. Contemporary scientific approaches therefore increasingly emphasize precision, prevention, biological regulation, circularity, and context-specific management. Sustainable crop production is emerging as a multidimensional objective requiring integration of soil health, plant genetics, microbiome interactions, water management, nutrient cycling, integrated pest management, climate adaptation, landscape ecology, and socioeconomic feasibility.

The findings further indicate that soil must be regarded as a dynamic biological system rather than merely a physical substrate for crop production. Soil structure, organic matter, microbial diversity, nutrient availability, water-holding capacity, carbon dynamics, and biological activity collectively determine agricultural productivity and ecosystem resilience. The scientific transition toward soil-health-centered agriculture has consequently strengthened the importance of conservation practices, crop rotation, cover crops, reduced tillage, organic amendments, biological fertilizers, integrated nutrient management, and microbial interventions. These approaches have the potential to enhance nutrient-use efficiency while reducing erosion, nutrient leakage, and dependence on environmentally intensive inputs. The emerging evidence also supports greater recognition of soil microbiomes as functional determinants of plant health, nutrient acquisition, stress tolerance, and disease resistance.

An important finding concerns the increasing significance of plant–microbe interactions. Advances in molecular biology, metagenomics, transcriptomics, metabolomics, and microbial ecology have expanded scientific understanding of the rhizosphere as a highly dynamic interface where plants, microorganisms, minerals, water, and environmental factors interact.

Beneficial microorganisms, including nitrogen-fixing bacteria, phosphate-solubilizing microorganisms, mycorrhizal fungi, and other plant-growth-promoting microorganisms, are increasingly investigated as biological tools for improving nutrient acquisition, stimulating plant growth, enhancing stress tolerance, and suppressing pathogens. Microbial biotechnology therefore represents an important translational bridge between fundamental biological research and sustainable agricultural production. However, the findings also indicate that successful field implementation requires greater attention to environmental variability, microbial establishment, formulation stability, ecological compatibility, regulatory standards, and reproducibility under heterogeneous production conditions.

Crop genetic improvement constitutes another major domain of scientific transformation. Conventional breeding remains highly important, but genomics-assisted selection, marker-assisted breeding, genomic prediction, high-throughput phenotyping, transcriptomic analysis, and gene-editing technologies are expanding the capacity to develop crop varieties adapted to specific environmental conditions. Contemporary breeding objectives increasingly extend beyond maximum yield toward drought tolerance, salinity tolerance, heat resilience, nutrient-use efficiency, pest and disease resistance, nutritional quality, reduced input requirements, and adaptation to changing climatic conditions. The findings suggest that this shift is particularly important because climate change creates heterogeneous and rapidly evolving selection pressures that cannot always be addressed effectively through conventional breeding cycles alone.

Gene-editing technologies represent a particularly significant emerging paradigm because they can facilitate targeted modification of traits associated with disease resistance, nutritional quality, stress tolerance, and productivity. Nevertheless, the analysis demonstrates that technological capability does not automatically translate into socially or environmentally optimal outcomes. Regulatory frameworks, biosafety evaluation, ecological risk assessment, consumer acceptance, intellectual-property considerations, equitable access, and transparent governance remain critical determinants of responsible biotechnology deployment. Scientific advancement therefore requires simultaneous development of technical capacity and institutional mechanisms capable of evaluating risks and benefits within specific ecological and socioeconomic contexts.

Precision agriculture emerges from the findings as one of the most transformative technological developments in modern agricultural science. The integration of satellite imagery, unmanned aerial systems, geographic information systems, proximal sensing, soil sensors, weather stations, machine learning, artificial intelligence, robotics, automated machinery, and digital decision-support platforms enables agricultural management at increasingly fine spatial and temporal scales. Rather than applying inputs uniformly across fields, precision agriculture facilitates differentiated management according to variability in soil characteristics, crop growth, moisture status, nutrient availability, pest pressure, and environmental conditions. This transition from average-based management toward site-specific management has substantial implications for fertilizer efficiency, irrigation optimization, pesticide reduction, crop monitoring, yield forecasting, and environmental protection.

The findings demonstrate that remote sensing is particularly valuable for large-scale agricultural monitoring. Multispectral and hyperspectral imagery can provide information concerning vegetation vigor, canopy structure, water stress, nutrient status, disease symptoms, and spatial variability. When integrated with geographic information systems and ground-based observations, remotely sensed data can contribute to early identification of agricultural stressors and facilitate targeted intervention. However, the analysis also identifies important limitations, including cloud interference, sensor calibration, heterogeneous field conditions, insufficient

ground-truth data, computational requirements, interoperability challenges, and unequal access to advanced technologies. Consequently, precision agriculture should not be interpreted as a purely technological solution but as an integrated management framework requiring technical infrastructure, skilled personnel, reliable data, and appropriate institutional support.

Artificial intelligence and machine learning are increasingly positioned as analytical engines capable of transforming complex agricultural datasets into actionable information. Predictive models can support yield estimation, disease recognition, pest forecasting, irrigation scheduling, fertilizer optimization, livestock monitoring, and climate-risk assessment. Computer vision can facilitate automated detection of plant diseases and phenotypic characteristics, while predictive analytics can assist producers in anticipating environmental or biological events. The findings indicate that the greatest value of artificial intelligence may arise not from replacing agricultural expertise but from augmenting human decision-making through rapid processing of multidimensional information. Nevertheless, algorithmic accuracy depends heavily on data quality, representativeness, model validation, contextual adaptation, and transparency. Models developed under one agroecological condition may perform poorly under another, highlighting the need for locally validated and continuously updated analytical systems.

Digitalization is similarly transforming veterinary science. Electronic animal-health records, digital identification systems, wearable sensors, automated monitoring technologies, telemedicine, imaging systems, and artificial-intelligence-supported diagnostics are expanding the capacity for continuous surveillance of animal health. Instead of relying predominantly on episodic clinical observation, contemporary veterinary systems increasingly enable real-time or near-real-time detection of physiological and behavioral abnormalities. Changes in movement, feeding, temperature, rumination, respiration, milk production, or other measurable indicators can potentially identify disease at earlier stages. Earlier detection may reduce morbidity, mortality, treatment costs, antimicrobial use, and production losses while simultaneously improving animal welfare.

A particularly important finding is the increasing convergence of veterinary medicine with preventive population health. Veterinary science has historically encompassed diagnosis and treatment of individual animals, but contemporary challenges require broader emphasis on herd health, epidemiology, biosecurity, vaccination, nutrition, genetic health, environmental management, disease surveillance, and preventive intervention. The findings demonstrate that population-level disease prevention is generally more sustainable than exclusive dependence on therapeutic intervention after disease emergence. This is particularly relevant in intensive production systems where infectious diseases can spread rapidly and generate substantial economic, welfare, and public-health consequences.

Veterinary epidemiology has therefore become increasingly important within integrated agricultural systems. Disease surveillance networks, laboratory diagnostics, molecular epidemiology, genomic sequencing, serological monitoring, and spatial epidemiological models facilitate identification and tracking of infectious threats. These approaches are particularly valuable for emerging and re-emerging diseases, zoonotic pathogens, transboundary animal diseases, and diseases influenced by changing environmental conditions. Climate-related changes in temperature, precipitation, vector distribution, wildlife movement, and land use may modify disease ecology, requiring veterinary surveillance systems to become more anticipatory and geographically adaptive.

The findings strongly reinforce the relevance of One Health as an organizing scientific paradigm. Human health, animal health, plant health, environmental health, and ecosystem integrity are interconnected through shared biological, ecological, and socioeconomic

pathways. Zoonotic diseases represent one of the clearest manifestations of this interdependence, but the One Health framework extends beyond zoonoses to antimicrobial resistance, food safety, environmental contamination, ecosystem disruption, occupational health, nutrition, and climate-related health risks. The analysis indicates that agricultural and veterinary sciences can provide major contributions to One Health by reducing disease transmission, improving food safety, strengthening surveillance, optimizing antimicrobial use, protecting biodiversity, and supporting resilient food systems.

Antimicrobial resistance emerges as a particularly critical area of convergence. The extensive and sometimes inappropriate use of antimicrobial agents in human medicine, veterinary medicine, and agriculture creates selective pressures that can facilitate emergence and dissemination of resistant microorganisms. Resistant organisms and resistance determinants may circulate among animals, humans, food products, soil, water, and other environmental compartments. The findings therefore support integrated antimicrobial stewardship involving veterinarians, physicians, pharmacists, microbiologists, agricultural specialists, environmental scientists, producers, regulators, and public-health authorities. Veterinary antimicrobial stewardship should encompass evidence-based prescribing, diagnostic confirmation where appropriate, appropriate dosing and duration, vaccination, biosecurity, disease prevention, husbandry improvement, and monitoring of antimicrobial consumption and resistance patterns.

The research synthesis indicates that vaccination constitutes one of the most effective preventive tools available to veterinary medicine. Effective vaccination programs reduce disease incidence, mortality, production losses, and antimicrobial requirements while improving herd-level resilience. Advances in molecular vaccinology, recombinant technologies, vector-based platforms, adjuvant systems, and genomic surveillance are creating opportunities for more targeted veterinary vaccines. However, vaccination effectiveness depends on pathogen characteristics, immune status, maternal antibodies, administration practices, cold-chain integrity, epidemiological conditions, and population coverage. Consequently, vaccination should be incorporated into comprehensive herd-health strategies rather than regarded as an isolated intervention.

Animal nutrition represents another critical interface between productivity, health, welfare, environmental sustainability, and economic performance. Precision nutrition seeks to align nutrient supply more closely with physiological requirements, production stage, genetic characteristics, health status, and environmental conditions. Improved feed formulation can reduce nutrient wastage and excretion while maintaining productivity. Feed additives, enzymes, probiotics, prebiotics, microbial technologies, alternative protein sources, and improved forage systems are increasingly investigated for their potential to improve feed efficiency and animal health. The findings suggest that nutritional optimization may also contribute to environmental objectives by reducing resource requirements and greenhouse-gas intensity per unit of animal-derived food.

Animal welfare is increasingly recognized as an integral component of sustainable veterinary and agricultural systems. Productivity alone is an insufficient measure of production-system performance when achieved at the expense of animal health or behavioral integrity. Contemporary welfare science incorporates physiological health, pain and injury prevention, nutritional adequacy, environmental conditions, behavioral expression, social interaction, and humane handling. The findings indicate that welfare-oriented management can have reciprocal benefits for productivity and disease prevention because stress, poor housing, inadequate nutrition, overcrowding, and inappropriate handling can increase susceptibility to disease and compromise performance.

Food safety represents another major area in which agricultural and veterinary sciences intersect with public health. Biological hazards, chemical residues, veterinary drug residues, pesticides, mycotoxins, heavy metals, environmental contaminants, and emerging hazards can enter food systems through multiple pathways. The findings emphasize that food safety must therefore be addressed throughout the production chain, beginning with soil, water, seed, animal feed, animal health, agricultural inputs, processing, transportation, storage, and retail distribution. Veterinary inspection, laboratory surveillance, residue monitoring, traceability systems, hazard analysis, and risk-based regulation are critical components of integrated food-safety governance.

The analysis also identifies increasing concern regarding environmental residues and agricultural contaminants. Excessive fertilizer application, pesticide use, inappropriate disposal of veterinary pharmaceuticals, manure contamination, heavy metals, plastics, and other pollutants can affect soil, water, microorganisms, wildlife, and human populations. Ecological safety consequently requires a transition from reactive contamination management toward preventive environmental risk assessment. Life-cycle thinking, environmental monitoring, safer chemical alternatives, integrated pest management, circular nutrient systems, and improved waste management can contribute to reducing environmental burdens associated with agricultural and veterinary production.

Integrated pest management emerges as an important example of prevention-oriented agricultural science. Rather than relying exclusively on chemical pesticides, integrated pest management combines biological control, cultural practices, resistant cultivars, physical interventions, monitoring, and selective chemical treatment when economically and ecologically justified. This approach can reduce pesticide dependence, slow resistance development, protect beneficial organisms, and decrease chemical residues. The findings indicate that successful implementation depends heavily on producer knowledge, accurate pest monitoring, extension services, economic incentives, and availability of effective biological and nonchemical alternatives.

Climate change constitutes a cross-cutting determinant of agricultural and veterinary vulnerability. Increasing temperatures, altered precipitation regimes, droughts, floods, extreme weather events, changing pest distributions, altered pathogen ecology, heat stress, and water scarcity directly affect crops and livestock. The findings demonstrate that climate adaptation cannot be separated from agricultural sustainability because production systems must simultaneously maintain productivity and withstand increasingly variable environmental conditions. Crop diversification, drought-tolerant varieties, water-efficient irrigation, soil-carbon management, agroforestry, improved livestock housing, heat-abatement strategies, disease surveillance, and climate-informed production planning represent important adaptive pathways.

Climate resilience also requires anticipatory rather than exclusively reactive management. Weather forecasting, climate modeling, remote sensing, early-warning systems, and risk-based decision-support tools can assist farmers and veterinary professionals in identifying emerging hazards before substantial losses occur. Integration of climatic, biological, and production data can potentially support dynamic management strategies. Nevertheless, the findings indicate that climate-resilience technologies must be adapted to local ecological and socioeconomic circumstances because the vulnerabilities of smallholder systems, intensive commercial operations, pastoral systems, and mixed farming systems differ considerably.

Biodiversity conservation emerges as another essential dimension of sustainable agricultural development. Agricultural expansion, monoculture, habitat fragmentation, pesticide exposure, soil degradation, invasive species, and climate change can reduce biodiversity and weaken

ecosystem functions. At the same time, biodiversity can provide ecosystem services essential to agriculture, including pollination, biological pest control, nutrient cycling, soil formation, water regulation, and genetic resources. The findings therefore support agricultural models that recognize biodiversity as productive infrastructure rather than as an external environmental consideration.

Agroecological approaches are particularly relevant in this context because they seek to utilize ecological processes as components of agricultural management. Crop diversification, agroforestry, integrated crop–livestock systems, ecological pest regulation, biological nutrient cycling, and landscape-level habitat management can increase functional diversity and potentially improve system resilience. The findings do not suggest that one agricultural model is universally optimal; rather, they support context-specific combinations of ecological knowledge, conventional agronomic expertise, biotechnology, and precision technologies.

Resource optimization represents a major common objective across agricultural and veterinary systems. Water, soil nutrients, energy, land, feed, labor, and genetic resources are finite or increasingly constrained. Precision irrigation can reduce unnecessary water application; variable-rate fertilization can improve nutrient-use efficiency; optimized feed formulation can reduce nutrient losses; digital logistics can reduce waste; and circular agricultural systems can recover nutrients from organic residues. The findings indicate that resource efficiency is simultaneously an environmental, economic, and food-security objective. Reducing unnecessary resource consumption can improve profitability while decreasing ecological pressure.

Water management is particularly important because agriculture remains a major user of freshwater resources. Irrigation efficiency, soil-moisture monitoring, deficit-irrigation strategies, drought-resistant crops, rainwater harvesting, improved watershed management, and wastewater treatment and reuse can contribute to water security. However, the analysis emphasizes that technological irrigation efficiency alone cannot resolve broader water-governance problems. Sustainable water management requires integration of hydrological science, agricultural planning, ecosystem requirements, infrastructure, regulatory frameworks, and equitable allocation mechanisms.

Food-system resilience constitutes a broader finding that extends beyond farm-level productivity. Contemporary food systems are exposed to climatic shocks, geopolitical instability, economic volatility, disease outbreaks, supply-chain disruption, input shortages, and changing consumer demands. Resilient systems require diversification of production, markets, supply chains, genetic resources, inputs, and knowledge systems. Local and regional production capacities can complement international trade, while digital traceability and forecasting systems can improve supply-chain visibility. The findings indicate that resilience is best understood as the capacity to absorb disturbances, maintain essential functions, adapt to changing conditions, and transform when existing structures become unsustainable.

Rural development is identified as an indispensable component of agricultural transformation. Technological innovation cannot achieve sustainable agricultural development if rural communities lack access to education, infrastructure, financing, markets, digital connectivity, veterinary services, extension systems, and appropriate technologies. Smallholders may face particularly significant barriers to adoption of precision equipment, advanced biotechnology, digital platforms, and modern laboratory services. The findings therefore emphasize that innovation policy must consider technological accessibility and socioeconomic inclusion. Otherwise, technological progress may increase rather than decrease disparities between highly capitalized producers and resource-constrained farming communities.

Agricultural extension and professional education emerge as important mechanisms for translating scientific knowledge into practice. Farmers and veterinary professionals must increasingly understand digital technologies, data interpretation, biotechnology, climate science, environmental management, biosecurity, antimicrobial stewardship, and One Health principles. Traditional disciplinary education may therefore require expansion toward interdisciplinary competency development. The emerging professional profile of agricultural and veterinary specialists is increasingly characterized by scientific literacy, digital competence, analytical reasoning, communication skills, ethical awareness, and capacity for multidisciplinary collaboration.

The findings further demonstrate that translational research is essential for narrowing the persistent gap between scientific discovery and practical implementation. Many innovations demonstrate efficacy under controlled laboratory or experimental conditions but encounter difficulties when introduced into complex real-world production environments. Variability in climate, soil, infrastructure, management capacity, economic conditions, pathogen ecology, and producer behavior can significantly influence outcomes. Translational agricultural and veterinary science should therefore incorporate field validation, implementation science, economic evaluation, stakeholder participation, risk assessment, and long-term monitoring.

The analysis reveals that interdisciplinary collaboration is not simply desirable but increasingly necessary. Agricultural scientists, veterinarians, microbiologists, geneticists, environmental scientists, epidemiologists, data scientists, economists, engineers, social scientists, policymakers, and industry stakeholders possess complementary forms of expertise. Complex challenges such as antimicrobial resistance, zoonotic disease, climate adaptation, food insecurity, and biodiversity loss cannot be adequately addressed through isolated disciplinary approaches. Collaborative research infrastructures, interoperable data systems, multidisciplinary education, and joint policy frameworks are therefore essential.

Data interoperability emerges as a critical technological and institutional challenge. Agricultural and veterinary systems generate increasingly large quantities of heterogeneous data from sensors, laboratory tests, satellite systems, electronic health records, farm-management platforms, genomic databases, meteorological stations, and supply-chain systems. The potential value of these data depends on their quality, standardization, accessibility, interoperability, security, and appropriate interpretation. Fragmented data environments can limit the effectiveness of artificial intelligence and decision-support systems. The findings consequently support development of common standards, secure data infrastructures, transparent governance mechanisms, and responsible data-sharing frameworks.

Cybersecurity and data governance are increasingly relevant to digital agriculture and veterinary medicine. As farms, laboratories, veterinary clinics, supply chains, and regulatory systems become digitally interconnected, their vulnerability to data breaches, system failures, unauthorized access, and technological dependency increases. Digital transformation must therefore incorporate cybersecurity, data protection, system redundancy, authentication, and ethical governance. The findings suggest that digital resilience should be considered an integral component of agricultural and veterinary resilience.

Economic evaluation represents another important research finding. Technologies such as autonomous machinery, advanced sensors, genomic platforms, laboratory diagnostics, digital surveillance, and precision-input systems may generate significant long-term benefits but often involve high initial costs. Their adoption depends on expected return on investment, labor availability, farm size, technical support, financing mechanisms, and market conditions. Consequently, technological assessment should include not only technical performance but also

cost-effectiveness, affordability, scalability, maintenance requirements, and socioeconomic consequences.

Regulatory science is similarly central to the responsible integration of biotechnology, veterinary pharmaceuticals, pesticides, biological products, gene-editing technologies, digital diagnostic systems, and novel agricultural inputs. Scientific innovation can generate new products faster than regulatory frameworks evolve. The findings indicate that regulatory systems must remain scientifically rigorous while becoming sufficiently adaptive to evaluate emerging technologies efficiently. Risk-based assessment, transparent evidence requirements, post-market surveillance, environmental monitoring, and international harmonization can contribute to both safety and innovation.

Biosecurity emerges as a foundational component connecting agricultural and veterinary systems. Disease prevention requires management of animal movement, quarantine, sanitation, vaccination, wildlife interactions, feed safety, personnel practices, transportation, and farm infrastructure. Modern biosecurity increasingly benefits from molecular diagnostics, genomic surveillance, digital identification, and predictive epidemiology. However, technological systems cannot substitute for consistent implementation of basic biosecurity practices. The findings therefore support layered biosecurity strategies combining infrastructure, management, behavioral compliance, surveillance, and rapid response.

The research synthesis also identifies circularity as an increasingly important sustainability paradigm. Agricultural residues, manure, food-processing by-products, wastewater, and other organic materials can potentially be converted into fertilizers, soil amendments, animal feed components, bioenergy, or industrial biomaterials, provided that safety requirements are met. Circular agricultural systems may reduce waste while recovering nutrients and energy. However, the analysis emphasizes the necessity of rigorous monitoring for pathogens, chemical contaminants, heavy metals, pharmaceuticals, and other hazards before recycled materials are reintroduced into production systems.

Precision livestock farming represents a particularly significant convergence of digitalization, veterinary medicine, and agricultural production. Sensors, cameras, automated feeding systems, activity monitors, and machine-learning algorithms can continuously assess animal behavior and physiological indicators. These systems may improve disease detection, reproductive management, welfare assessment, feeding efficiency, and production planning. Their long-term value will depend on diagnostic validity, affordability, interoperability, producer acceptance, and appropriate integration with professional veterinary judgment.

Genomic technologies are similarly transforming animal health and breeding. Genomic selection can accelerate genetic improvement for productivity, disease resistance, fertility, feed efficiency, environmental adaptation, and welfare-associated traits. Molecular epidemiology can simultaneously improve understanding of pathogen transmission and evolution. The convergence of host genomics and pathogen genomics creates opportunities for more precise disease management. Nevertheless, genomic innovation requires careful consideration of genetic diversity, unintended consequences, ethical governance, and equitable access.

The findings indicate that environmental sustainability and agricultural productivity should not be conceptualized as inherently opposing objectives. Under appropriate management, ecological processes can support productivity by improving soil fertility, pest regulation, water retention, pollination, and nutrient cycling. The central scientific challenge is therefore optimization of interactions rather than maximizing a single production variable. This requires multidimensional assessment frameworks that simultaneously evaluate yield, profitability, environmental impact, resource consumption, biodiversity, animal welfare, food safety, and resilience.

Another major finding concerns the importance of evidence-based decision-making. Agricultural and veterinary interventions should increasingly be evaluated through systematic evidence synthesis, experimental validation, field trials, epidemiological studies, comparative effectiveness assessment, and longitudinal monitoring. Decisions based exclusively on tradition, anecdotal experience, or short-term productivity indicators may be inadequate for complex contemporary systems. Evidence-based agricultural and veterinary practice should integrate scientific evidence with local ecological knowledge, professional expertise, producer experience, and socioeconomic context.

The synthesis also highlights the importance of uncertainty management. Climate projections, disease emergence, market conditions, technological performance, ecological responses, and biological systems contain inherent uncertainty. Effective management therefore requires flexible strategies capable of functioning under multiple plausible scenarios. Scenario modeling, sensitivity analysis, early-warning indicators, adaptive management, and continuous monitoring can help agricultural and veterinary systems respond to uncertainty without relying on rigid predictions.

Ethical considerations emerge across virtually every domain analyzed. Biotechnology raises questions concerning ecological risks and equitable access; artificial intelligence raises concerns regarding algorithmic transparency and data ownership; intensive livestock production raises questions concerning welfare; antimicrobial use raises responsibilities concerning future therapeutic effectiveness; environmental management raises questions of intergenerational justice; and agricultural modernization raises concerns regarding socioeconomic inequality. The findings demonstrate that scientific innovation should therefore be evaluated according to both technical performance and ethical legitimacy.

The role of indigenous, traditional, and local knowledge also warrants greater recognition. Agricultural communities possess extensive experience concerning local soils, climate patterns, crop varieties, animal husbandry, ecological relationships, and resource-management practices. The findings suggest that the most effective innovation pathways may combine validated local knowledge with modern scientific methods rather than treating them as mutually exclusive. Participatory research can improve technology adoption, contextual relevance, and social legitimacy.

The research further demonstrates that global challenges require locally adaptable solutions. Agricultural and veterinary systems vary substantially according to climate, geography, production structure, institutional capacity, market access, cultural practices, and disease ecology. Consequently, universal technological prescriptions are unlikely to achieve optimal outcomes. International scientific collaboration should therefore emphasize transferable principles and adaptable frameworks rather than rigid technological templates.

An important finding is that rural digitalization may become a major determinant of future agricultural competitiveness and resilience. Broadband connectivity, mobile applications, cloud-based farm management, remote diagnostics, digital extension, electronic markets, and online veterinary support can expand access to knowledge and services. Yet the digital divide remains a significant limitation. Investment in connectivity, digital literacy, technical support, and affordable platforms is therefore necessary to ensure that digital transformation does not become concentrated among already advantaged producers.

The analysis indicates that future agricultural and veterinary systems will increasingly depend upon integrated decision-support architectures. Such systems may combine environmental observations, crop data, animal-health information, genomic information, market signals, weather forecasts, and economic variables to generate context-specific recommendations. The

greatest scientific opportunity lies not simply in collecting more data but in transforming heterogeneous data into validated, interpretable, actionable knowledge.

The findings also suggest a gradual transition from reactive management toward anticipatory and preventive systems. In crop production, this involves early detection of disease, pests, nutrient deficiencies, and water stress. In veterinary medicine, it involves predictive disease surveillance, vaccination, biosecurity, and continuous health monitoring. At the food-system level, it involves supply-chain forecasting, traceability, contingency planning, and risk assessment. At the environmental level, it involves monitoring pollution, biodiversity, soil degradation, and climate hazards before irreversible damage occurs.

The research findings demonstrate that the future of agricultural and veterinary sciences is likely to be characterized by convergence among biological sciences, engineering, digital technologies, environmental science, medicine, economics, and social sciences. Precision agriculture, biotechnology, veterinary preventive medicine, genomics, artificial intelligence, ecological management, climate science, and One Health should not be considered isolated innovations. Their greatest scientific and societal value emerges when they are integrated within coherent systems capable of simultaneously addressing production, health, environmental, and socioeconomic objectives.

The principal conceptual finding is therefore that sustainable agricultural and veterinary development requires a transition from fragmented optimization to integrated system optimization. Productivity must be aligned with ecological integrity; animal health with public health; biotechnology with biosafety; digitalization with responsible governance; resource efficiency with economic viability; climate adaptation with biodiversity conservation; and scientific innovation with equitable rural development. Such integration creates a translational framework in which discoveries can move from laboratory research to field application, from individual interventions to population-level strategies, and from isolated technologies to resilient food and health systems.

The accumulated findings ultimately support the proposition that agricultural and veterinary sciences are becoming increasingly interconnected components of a broader planetary health architecture. Sustainable crop production cannot be separated from soil, water, biodiversity, climate, and microbial ecology; animal health cannot be separated from food safety, antimicrobial resistance, zoonotic disease, and environmental conditions; and rural development cannot be separated from technology, education, infrastructure, markets, and governance. The emerging scientific paradigm is therefore fundamentally interdisciplinary, preventive, data-informed, ecologically conscious, technologically enabled, and socially accountable.

The most promising pathway toward future resilience involves combining precision management with biological innovation, preventive veterinary medicine with advanced surveillance, biotechnology with rigorous biosafety, digital transformation with human expertise, resource optimization with circularity, and productivity objectives with ecological stewardship. The findings indicate that such convergence can support more adaptive, efficient, safe, and sustainable agricultural and veterinary systems while simultaneously strengthening food security, animal welfare, environmental protection, public health, and rural socioeconomic resilience. The future scientific agenda should consequently prioritize integrated research platforms, translational field validation, interoperable data systems, interdisciplinary professional education, adaptive regulatory frameworks, equitable technology access, and One Health-oriented governance capable of responding to increasingly interconnected global agricultural, veterinary, environmental, and societal challenges.

The results of the integrative analysis demonstrate that contemporary agricultural and veterinary sciences are experiencing a fundamental epistemological, technological, and operational transformation characterized by increasing convergence among biological sciences, environmental sciences, engineering, digital technologies, veterinary medicine, biotechnology, food-system science, and socioeconomic research. The evidence synthesized within the present investigation indicates that the principal trajectory of this transformation is a progressive movement away from isolated optimization of agricultural yield or individual-animal treatment toward integrated management of interconnected agroecosystems in which crop productivity, animal health and welfare, environmental integrity, food safety, climate resilience, biodiversity, resource efficiency, public health, and rural development are understood as mutually dependent dimensions of a unified system. This transformation has considerable scientific significance because it changes the definition of agricultural and veterinary innovation from the development of individual technologies toward the construction of interconnected, adaptive, preventive, and translational systems capable of responding to multiple simultaneous pressures.

A principal result emerging from the analysis is that sustainable productivity increasingly depends upon the capacity to reconcile production efficiency with ecological integrity. Contemporary agricultural systems are confronted by a complex combination of land degradation, soil nutrient depletion, water scarcity, climate variability, biodiversity loss, emerging pests and diseases, input-price volatility, environmental contamination, and increasing demand for safe and nutritious food. Under these conditions, conventional productivity indicators such as yield per hectare or production per animal are insufficient measures of system performance. The analysis indicates that future agricultural evaluation must incorporate multidimensional indicators encompassing productivity, input-use efficiency, soil health, water conservation, greenhouse-gas intensity, biodiversity, animal welfare, food safety, economic viability, resilience, and social sustainability. This represents a substantial conceptual advancement because it recognizes that production systems possess ecological and socioeconomic boundaries within which productivity must be achieved.

The findings demonstrate that sustainable crop production is increasingly associated with integrated management of soil, water, nutrients, genetics, microorganisms, pests, climatic variables, and production technologies. The traditional separation of agronomy, soil science, plant pathology, microbiology, and environmental science is becoming progressively less compatible with the complexity of contemporary agricultural challenges. Crop performance is determined not simply by genetic potential or input availability but by interactions among genotype, soil characteristics, microbiome composition, weather conditions, nutrient dynamics, water availability, pest pressure, management decisions, and landscape-level ecological processes. The resulting scientific paradigm is therefore increasingly systems-oriented, emphasizing interactions and feedback mechanisms rather than isolated production variables.

One of the most important results concerns the growing recognition of soil health as a foundational determinant of sustainable agricultural productivity. Soil is increasingly understood as a biologically active and ecologically complex system containing diverse microbial communities, organic matter, mineral components, water, air, and living organisms. Its functional properties influence nutrient cycling, water retention, carbon sequestration, root development, disease suppression, and plant resilience. The analysis indicates that agricultural strategies emphasizing organic-matter restoration, conservation tillage, crop rotation, cover cropping, integrated nutrient management, reduced erosion, and biological soil amendments can contribute simultaneously to productivity and environmental sustainability. This finding is particularly relevant under climate variability because healthy soils generally provide greater buffering capacity against drought, excessive precipitation, and temperature stress.

The results further demonstrate the increasing scientific importance of soil microbiomes. Advances in molecular microbiology, metagenomics, transcriptomics, metabolomics, and microbial ecology have revealed that plant productivity is strongly influenced by complex interactions among roots and microorganisms. Beneficial rhizosphere microorganisms may facilitate nutrient acquisition, stimulate plant development, enhance tolerance to environmental stress, and suppress certain pathogenic organisms. These findings support expansion of microbial biotechnology as a component of sustainable agricultural production. Biofertilizers, microbial inoculants, biostimulants, biological control agents, and other microbial products represent potentially important mechanisms for reducing dependence on environmentally intensive inputs. Nevertheless, the discussion of these technologies must remain scientifically cautious because laboratory efficacy does not necessarily guarantee consistent field performance. Soil characteristics, temperature, moisture, indigenous microbial communities, crop genotype, management practices, and environmental conditions can substantially influence outcomes.

The analysis identifies precision agriculture as one of the most consequential technological developments within contemporary crop-production science. The convergence of satellite observation, unmanned aerial vehicles, geographic information systems, proximal sensing, soil sensors, automated machinery, artificial intelligence, machine learning, and digital decision-support systems enables agricultural management at unprecedented spatial and temporal resolution. Rather than treating an agricultural field as a homogeneous unit, precision systems recognize intra-field variability and permit differential management of water, nutrients, pesticides, seeds, and other inputs. This represents a transition from uniform application toward site-specific intervention, with potentially substantial implications for environmental protection and economic efficiency.

The results indicate that precision agriculture can contribute to improved resource-use efficiency through variable-rate fertilization, targeted irrigation, localized pest management, and continuous crop monitoring. Such technologies may reduce unnecessary application of fertilizers and pesticides while maintaining or improving productivity. Remote sensing can identify spatial patterns of crop stress before they become visually apparent, while soil and weather sensors can provide real-time information for irrigation and nutrient decisions. The integration of these datasets with predictive models creates opportunities for increasingly dynamic agricultural management. However, the analysis also demonstrates that precision agriculture is not intrinsically sustainable simply because it is technologically advanced. Its sustainability depends upon how technologies are designed, deployed, validated, maintained, and incorporated into production decisions.

Artificial intelligence emerges as an increasingly important analytical technology capable of integrating large and heterogeneous datasets. Machine-learning systems can support yield prediction, disease identification, pest forecasting, crop classification, irrigation scheduling, nutrient management, and climate-risk assessment. Computer-vision technologies may facilitate automated identification of plant diseases and phenotypic characteristics, while predictive algorithms can identify relationships that are difficult to detect through conventional observation. The discussion indicates that artificial intelligence should primarily be conceptualized as a decision-support technology that augments rather than eliminates professional agricultural expertise. Human interpretation remains essential because agricultural systems are context-dependent and contain biological and socioeconomic uncertainties that cannot always be captured by algorithms.

A major limitation identified through the analysis is the dependence of artificial-intelligence performance on data quality and representativeness. Models trained using geographically

narrow datasets may not perform reliably under different climatic, soil, cultivar, or management conditions. Algorithmic accuracy may decline when environmental circumstances differ substantially from training datasets. Consequently, responsible agricultural artificial intelligence requires rigorous external validation, transparent model development, continuous monitoring, local calibration, and explicit recognition of uncertainty. The findings suggest that future research should prioritize explainable and interpretable artificial intelligence capable of communicating not only predictions but also confidence levels and major determinants of predicted outcomes.

The results demonstrate that biotechnology is simultaneously expanding the productive potential of agriculture and transforming approaches to biological risk management. Molecular breeding, genomics, marker-assisted selection, genomic prediction, gene editing, plant tissue culture, microbial biotechnology, and synthetic biology provide new mechanisms for developing crops with improved productivity, nutritional quality, disease resistance, and tolerance to environmental stress. The increasing speed and precision of genetic improvement are particularly significant under climate change, where breeding programs must respond to rapidly evolving environmental pressures. The integration of high-throughput phenotyping with genomic information can further accelerate identification of desirable traits.

Gene-editing technologies represent a particularly important emerging frontier because they permit targeted modification of specific genetic sequences. Their potential applications include disease resistance, drought tolerance, salinity tolerance, nutritional enhancement, improved resource-use efficiency, and modification of crop architecture. However, the results also demonstrate that technological precision does not eliminate the need for comprehensive biosafety assessment. Ecological consequences, off-target effects, gene flow, impacts on non-target organisms, regulatory classification, consumer acceptance, and socioeconomic access require systematic evaluation. The scientific discussion therefore supports a principle of responsible biotechnology in which innovation is accompanied by proportional risk assessment, transparent governance, and long-term monitoring.

The analysis further reveals that climate adaptation is becoming inseparable from crop genetic improvement. Increasing temperatures, irregular rainfall, drought, flooding, salinity, and extreme weather events alter both crop physiology and pest and disease dynamics. Traditional production systems optimized for historical climatic conditions may consequently become increasingly vulnerable. The results support integrated adaptation strategies combining resilient cultivars, diversified cropping systems, improved soil management, precision irrigation, weather-informed decision-making, agroforestry, water conservation, and ecological management. Climate adaptation is therefore best understood as a portfolio of complementary interventions rather than a single technological solution.

The results concerning biodiversity indicate that agricultural productivity and biodiversity conservation should not necessarily be viewed as mutually exclusive objectives. Biodiversity contributes pollination, natural pest regulation, nutrient cycling, soil formation, genetic resources, water regulation, and ecosystem stability. Conversely, excessive agricultural simplification can reduce ecological functions and increase system vulnerability. The findings therefore support greater integration of habitat conservation, crop diversification, agroforestry, ecological corridors, beneficial insect protection, integrated pest management, and genetic-resource conservation into agricultural planning. Biodiversity can thus be interpreted as a component of productive capacity and long-term agricultural resilience rather than merely as an external environmental objective.

Integrated pest management represents a particularly important practical manifestation of this principle. The results indicate that combining pest surveillance, resistant cultivars, biological

control, crop rotation, cultural practices, physical methods, and carefully selected chemical interventions can reduce unnecessary pesticide dependence. Such strategies may decrease chemical residues, protect beneficial organisms, reduce environmental contamination, and delay development of pesticide resistance. The effectiveness of integrated pest management, however, depends upon accurate pest identification, reliable monitoring, producer education, availability of effective biological alternatives, and economically feasible intervention thresholds.

The veterinary component of the analysis demonstrates an equally profound transition from treatment-oriented medicine toward preventive, population-based, and data-supported animal health management. Veterinary medicine increasingly operates at the intersection of individual clinical care, herd health, epidemiology, nutrition, genetics, animal welfare, food safety, antimicrobial stewardship, biosecurity, and public health. The results indicate that disease prevention at population level can provide greater long-term benefits than reliance on repeated therapeutic intervention. Preventive veterinary medicine therefore represents a critical component of sustainable animal production.

Digital technologies are contributing substantially to this transformation. Precision livestock farming systems can integrate information from wearable sensors, cameras, automated feeding systems, environmental monitors, activity trackers, and physiological devices. These technologies can detect changes in behavior, movement, feed intake, temperature, rumination, milk production, or other indicators associated with health status. The results suggest that continuous monitoring may facilitate earlier disease recognition and intervention, potentially reducing morbidity, mortality, treatment costs, and unnecessary antimicrobial exposure. Importantly, however, technological monitoring must remain integrated with professional veterinary assessment because abnormal sensor signals are not necessarily synonymous with specific diagnoses.

The findings also demonstrate the growing importance of veterinary epidemiology and molecular surveillance. Infectious diseases can spread rapidly through animal populations and across geographic boundaries, particularly where animal movement, wildlife interactions, environmental change, and international trade create complex transmission pathways. Molecular diagnostics, pathogen sequencing, genomic epidemiology, serological surveillance, and spatial modeling can strengthen capacity to identify outbreaks and trace transmission. Such tools are particularly relevant for emerging and re-emerging diseases and for pathogens with substantial zoonotic potential.

The discussion strongly supports the integration of veterinary disease surveillance into broader One Health surveillance architectures. Zoonotic pathogens do not recognize institutional boundaries between veterinary, medical, agricultural, and environmental sectors. Surveillance systems that operate independently may therefore detect signals only after transmission has already expanded across compartments. Integrated surveillance combining human, animal, food, wildlife, environmental, and laboratory data can facilitate earlier identification of threats. The results consequently reinforce One Health as an operational framework rather than merely a conceptual slogan.

Antimicrobial resistance represents perhaps the clearest example of this interdependence. Antimicrobial use in humans, animals, and agricultural systems contributes to selection pressure, while resistant microorganisms and resistance determinants may circulate among humans, animals, food products, soil, water, and other environmental compartments. The analysis indicates that antimicrobial stewardship must therefore operate across sectors. Veterinary stewardship includes accurate diagnosis, appropriate antimicrobial selection,

optimized dosing, correct duration, preventive vaccination, biosecurity, improved husbandry, infection control, and monitoring of antimicrobial consumption and resistance.

The findings demonstrate that antimicrobial stewardship should not be interpreted as simply reducing antimicrobial use. The scientifically appropriate objective is optimized antimicrobial use: avoiding unnecessary treatment while ensuring that animals with bacterial infections receive effective therapy. Failure to treat genuine infections appropriately may compromise animal welfare and contribute to disease transmission. Thus, stewardship requires diagnostic capacity, veterinary expertise, accessible laboratory services, evidence-based protocols, and monitoring systems capable of evaluating both antimicrobial utilization and clinical outcomes.

Vaccination emerges as a central preventive mechanism in the veterinary domain. Effective vaccination can reduce disease incidence, mortality, production losses, antimicrobial requirements, and economic disruption. Advances in molecular vaccinology, recombinant technologies, vector-based approaches, and improved adjuvant systems create opportunities for more targeted veterinary vaccines. However, vaccine effectiveness depends upon population coverage, pathogen characteristics, immune status, administration practices, maternal immunity, storage conditions, and epidemiological context. The results therefore support integrated vaccination programs embedded within comprehensive herd-health strategies.

Animal nutrition constitutes another critical determinant of health, productivity, welfare, and environmental impact. The findings indicate that precision nutrition can improve alignment between nutrient supply and physiological requirements. Optimized feed formulations may reduce nutrient excretion and improve feed conversion while maintaining productivity. Emerging research into probiotics, prebiotics, enzymes, alternative protein sources, microbial feed technologies, and functional feed additives further expands opportunities for nutritional intervention. The integration of nutrition, microbiome science, genetics, and veterinary medicine may become particularly important in future precision livestock systems.

Animal welfare emerges from the results as an essential component of sustainable production rather than a secondary ethical consideration. Poor housing, overcrowding, inadequate nutrition, heat stress, inappropriate handling, chronic disease, and painful procedures can compromise welfare and may simultaneously reduce productivity and increase disease susceptibility. Welfare-oriented systems can therefore produce synergistic benefits when appropriate management improves health, behavior, reproductive performance, and production efficiency. The findings support multidimensional welfare assessment incorporating physiological, behavioral, environmental, nutritional, and health indicators.

Food safety represents a major convergence point between agriculture, veterinary science, environmental health, and public health. Biological pathogens, veterinary drug residues, pesticides, mycotoxins, heavy metals, chemical contaminants, and other hazards may enter food systems at different stages of production. The results indicate that food safety should therefore be managed through a farm-to-fork framework incorporating safe water, feed quality, animal health, responsible chemical use, veterinary oversight, hygienic processing, traceability, storage, transportation, and risk-based inspection. Veterinary science plays a particularly important role in preventing and controlling foodborne hazards originating in animal production.

Environmental safety emerges as a parallel requirement. Agricultural and veterinary production can contribute to contamination through excessive fertilizer application, pesticides, pharmaceutical residues, manure, wastewater, plastics, and other pollutants. The results indicate that environmental management should increasingly emphasize prevention rather than remediation. Monitoring of soil and water, responsible chemical use, integrated waste

management, circular nutrient systems, biological alternatives, and life-cycle assessment can reduce ecological burdens.

Water management is particularly important in the context of increasing climate variability. The findings demonstrate that precision irrigation, soil-moisture monitoring, drought-adapted crops, improved water-holding capacity, rainwater harvesting, and watershed-level management can improve water-use efficiency. Nevertheless, irrigation technology cannot substitute for integrated water governance. Sustainable water management requires consideration of agricultural demand, ecosystem requirements, groundwater dynamics, infrastructure, competing uses, and equitable allocation.

The results further reveal that circular economy principles are increasingly relevant to agricultural sustainability. Crop residues, animal manure, food-processing by-products, and other organic materials contain nutrients and energy that can potentially be recovered. Composting, anaerobic digestion, nutrient recycling, bioenergy production, and safe conversion of organic residues can reduce waste and external input requirements. However, circularity must be accompanied by rigorous biosafety and chemical-risk assessment to prevent redistribution of pathogens, antimicrobial residues, heavy metals, or other contaminants.

Climate resilience is found to depend substantially upon diversification. Monocultural systems may provide operational efficiency but can increase vulnerability to specific pests, diseases, climatic shocks, and market disruptions. Diversification of crops, varieties, livestock species, production methods, income sources, and supply chains can increase adaptive capacity. Integrated crop–livestock systems may facilitate nutrient cycling and risk distribution, while agroforestry can provide microclimatic regulation, carbon storage, biodiversity benefits, and additional products.

The findings also demonstrate that food-system resilience extends beyond agricultural production itself. Processing, transportation, storage, distribution, markets, trade, labor, energy, and digital infrastructure all influence food availability. Disruptions generated by extreme weather, disease outbreaks, geopolitical instability, energy-price fluctuations, or supply-chain interruptions can propagate across food systems. Consequently, resilience strategies must incorporate redundancy, diversification, local and regional capacity, strategic storage, digital traceability, contingency planning, and adaptive governance.

Rural development emerges as an indispensable determinant of successful scientific and technological transformation. The analysis indicates that advanced agricultural technologies cannot generate broad societal benefits if farmers lack access to financing, infrastructure, extension services, markets, education, veterinary support, digital connectivity, and technical expertise. Technology adoption is therefore not solely a matter of technical performance. It is also determined by affordability, perceived benefit, risk tolerance, institutional trust, availability of maintenance services, and compatibility with local production practices.

The findings highlight the importance of agricultural extension as a translational mechanism connecting scientific research with practical decision-making. Contemporary extension systems must increasingly communicate information concerning climate adaptation, digital tools, biotechnology, soil health, animal welfare, antimicrobial stewardship, food safety, and environmental management. Extension professionals consequently require interdisciplinary competencies capable of translating complex scientific information into context-specific recommendations.

Professional education is similarly undergoing transformation. Agricultural and veterinary professionals increasingly require knowledge extending beyond traditional disciplinary boundaries. Data science, artificial intelligence, genomics, molecular biology, environmental science, epidemiology, One Health, bioethics, regulatory science, and sustainability are

becoming increasingly relevant components of professional competence. The findings indicate that future curricula should therefore promote interdisciplinary reasoning, evidence appraisal, technological literacy, systems thinking, communication, and collaborative problem-solving.

The analysis identifies translational capacity as one of the principal determinants of whether scientific innovation generates practical value. A recurring challenge is the gap between experimental efficacy and real-world effectiveness. Technologies tested under controlled conditions may encounter variable soils, climates, pathogen pressures, infrastructure limitations, economic constraints, and user behavior when implemented at scale. The findings support greater incorporation of field validation, implementation research, stakeholder engagement, economic evaluation, and long-term monitoring into agricultural and veterinary innovation pipelines.

The results further demonstrate that data interoperability represents a major infrastructure requirement for integrated agricultural and veterinary systems. Modern production environments generate data from sensors, satellite platforms, laboratories, genomic systems, electronic records, weather services, markets, and supply chains. These data can become considerably more valuable when integrated, but fragmented systems can limit analytical capacity. Interoperable databases, common standards, secure data architectures, and appropriate governance mechanisms are therefore essential for realizing the full potential of digital agriculture and veterinary informatics.

Data governance also has ethical dimensions. Farmers, producers, veterinary professionals, companies, laboratories, and public institutions may generate or control valuable datasets. Questions concerning ownership, access, privacy, commercial confidentiality, algorithmic transparency, and equitable benefit distribution become increasingly important as data-driven technologies expand. The findings therefore support governance systems that balance innovation with transparency, security, accountability, and legitimate stakeholder interests.

The economic results implied by the integrated analysis suggest that technological adoption should be evaluated through multidimensional economic assessment rather than technological enthusiasm. Precision machinery, sensors, genomic testing, advanced diagnostics, digital platforms, and artificial-intelligence systems can produce significant benefits, but acquisition, maintenance, training, connectivity, and data-management costs may create barriers. Cost-effectiveness, return on investment, scalability, and affordability should therefore be evaluated alongside technical performance. This is particularly important for small and medium-sized agricultural enterprises.

Equity emerges as a central consideration in the discussion of technological modernization. If advanced technologies remain accessible primarily to highly capitalized producers, technological progress may unintentionally widen socioeconomic disparities. Inclusive innovation therefore requires affordable technologies, shared infrastructure, cooperative models, public extension, financing mechanisms, open scientific knowledge, and appropriate regulatory support. The results suggest that equitable access should be regarded as an important criterion of sustainable innovation.

Regulatory science is another major finding. Biotechnology, gene editing, veterinary pharmaceuticals, pesticides, biological control agents, diagnostic platforms, digital health technologies, and novel feed products require scientifically credible regulatory oversight. Regulatory systems must protect public, animal, and environmental health while avoiding unnecessary barriers to beneficial innovation. Risk-based assessment, transparent standards, post-market monitoring, environmental surveillance, and international harmonization can contribute to this balance.

Biosecurity remains a fundamental prerequisite for resilient agricultural and veterinary systems. The results indicate that movement control, quarantine, sanitation, vaccination, feed safety, wildlife management, personnel hygiene, environmental management, and appropriate infrastructure remain essential despite advances in digital surveillance and molecular diagnostics. Technology can strengthen biosecurity but cannot replace effective implementation of basic preventive practices. Layered biosecurity therefore remains an essential strategy.

The findings additionally indicate that early-warning systems are becoming increasingly important. Climate forecasting, remote sensing, pathogen surveillance, livestock monitoring, laboratory diagnostics, and artificial intelligence can collectively identify emerging risks before they become large-scale crises. Early detection can permit targeted interventions and reduce economic and ecological damage. Future agricultural and veterinary systems are therefore likely to become progressively more anticipatory, with surveillance and prediction replacing exclusively reactive management.

A major conceptual result is that resilience should be understood as a dynamic capacity rather than a static condition. Resilient agricultural and veterinary systems must absorb disturbances, maintain essential functions, adapt to new conditions, and transform when existing practices become unsustainable. This requires diversity, redundancy, learning capacity, technological flexibility, institutional coordination, and continuous monitoring. Resilience therefore emerges from interactions among ecological, technological, economic, and social systems.

The findings also reinforce the importance of uncertainty management. Agricultural and veterinary systems are influenced by inherently uncertain climatic conditions, pathogen evolution, market behavior, technological performance, ecological feedbacks, and human decision-making. Scientific management should therefore avoid excessive dependence on deterministic predictions. Scenario analysis, adaptive management, sensitivity assessment, probabilistic forecasting, and continuous reassessment provide more appropriate approaches for complex systems.

The ethical dimensions of scientific innovation are likewise prominent. Gene editing requires responsible evaluation of ecological and societal consequences; artificial intelligence requires attention to transparency and accountability; intensive livestock systems require protection of animal welfare; antimicrobial stewardship requires intergenerational responsibility; environmental management requires consideration of future generations; and rural digitalization requires attention to socioeconomic inclusion. Scientific progress is therefore most sustainable when technological capacity and ethical responsibility develop simultaneously.

The results support a broader interpretation of One Health in which agricultural systems are understood as important determinants of human health. Food production affects nutritional quality, exposure to pathogens, antimicrobial resistance, environmental contaminants, occupational risks, and ecosystem health. Veterinary interventions can consequently generate public-health benefits extending beyond animal populations. Likewise, environmental protection can reduce disease risk and improve food-system stability. This reciprocal relationship demonstrates why agricultural, veterinary, environmental, and medical expertise should increasingly operate through coordinated institutional frameworks.

The findings indicate that biodiversity conservation should also be integrated into One Health planning. Wildlife, livestock, humans, crops, microorganisms, and ecosystems interact through complex ecological networks. Habitat disruption and biodiversity loss can alter pathogen transmission dynamics, ecosystem services, and agricultural resilience. Protecting biodiversity may therefore generate indirect health and food-security benefits. This strengthens the scientific

rationale for landscape-level planning that integrates agricultural productivity with ecosystem conservation.

The discussion also demonstrates that agriculture and veterinary sciences are increasingly dependent upon advanced laboratory infrastructure. Molecular diagnostics, genomic sequencing, microbiological testing, residue analysis, environmental monitoring, and nutritional assessment provide essential evidence for decision-making. Strengthening laboratory networks, quality assurance, biosafety, proficiency testing, and data integration is therefore critical for both surveillance and routine management.

The convergence of genomic and epidemiological technologies represents an especially promising research frontier. Pathogen genomes can provide information concerning transmission pathways, evolution, antimicrobial resistance, and outbreak dynamics, while host genomic information can contribute to disease-resistance breeding and precision animal health. Integrating these datasets may facilitate a more sophisticated understanding of interactions among pathogen, host, environment, and management factors.

Another important result is the increasing potential of autonomous agricultural systems. Robotics, automated machinery, autonomous navigation, machine vision, and precision application technologies may reduce labor requirements and increase operational precision. Such technologies could be particularly valuable in environments facing labor shortages. However, adoption will depend upon cost, infrastructure, reliability, maintenance, safety, and workforce adaptation. Automation should therefore be viewed as part of broader agricultural transformation rather than an isolated technological trend.

The findings further suggest that future agricultural systems will increasingly rely on digital twins, predictive simulation, and integrated modeling. Virtual representations of fields, livestock populations, production systems, or supply chains may permit scenario testing before interventions are implemented in real environments. Such approaches could support climate adaptation, resource planning, disease control, and investment decisions. However, their accuracy will depend upon the quality and completeness of underlying data.

The results also reveal a need for stronger integration between experimental science and implementation science. Agricultural and veterinary innovations often receive extensive attention during discovery and development but less attention during adoption and scaling. Understanding why producers adopt, modify, or reject technologies is therefore as important as demonstrating technical efficacy. Behavioral, economic, cultural, institutional, and organizational factors must be incorporated into translational research.

The overall discussion indicates that no single technological innovation is sufficient to address the complexity of contemporary agricultural and veterinary challenges. Artificial intelligence without high-quality data is insufficient; biotechnology without biosafety is inadequate; precision agriculture without farmer capacity is ineffective; veterinary diagnostics without surveillance networks have limited population-level value; climate adaptation without biodiversity conservation may create new vulnerabilities; and productivity gains without environmental protection may undermine long-term sustainability.

The strongest scientific pathway identified through the results is therefore integrative rather than substitutional. Conventional agronomic knowledge remains important but can be strengthened through precision technologies and biological innovation. Veterinary clinical expertise remains indispensable but can be enhanced through digital monitoring, genomics, epidemiology, and predictive analytics. Environmental stewardship can be reinforced by biotechnology and resource-efficient production. Local knowledge can be combined with advanced scientific methods. The resulting system is neither exclusively technological nor

exclusively ecological; it is a hybrid knowledge architecture integrating multiple forms of evidence.

The results provide substantial support for a transition from linear agricultural production models toward circular, adaptive, and regenerative systems. Linear models commonly depend upon external inputs followed by waste generation, whereas circular approaches seek to recycle nutrients, recover resources, reduce losses, and preserve ecological functions. Regenerative approaches further emphasize restoration of soil health, biodiversity, and ecosystem capacity. Although these approaches require context-specific implementation and rigorous evaluation, they represent important directions for future research.

The scientific significance of these findings extends beyond individual production sectors. Agricultural sustainability is increasingly connected to planetary health, because land use, food production, livestock systems, biodiversity, greenhouse-gas emissions, water consumption, and human health interact at global scale. The transformation of agriculture and veterinary science must therefore be considered within broader sustainability frameworks. This does not diminish the importance of farm-level management; rather, it demonstrates that local decisions accumulate into regional and global consequences.

The integrated interpretation of the results ultimately supports a new scientific paradigm in which agricultural and veterinary sciences function as interconnected components of a broader socioecological innovation system. Within this paradigm, productivity is evaluated together with resilience; animal health together with public health; biotechnology together with biosafety; digitalization together with data governance; resource efficiency together with ecological integrity; and technological modernization together with rural inclusion. This approach provides a more comprehensive basis for evaluating scientific progress than conventional production-centered models.

The results therefore substantiate the central proposition of the study: the future sustainability of agricultural and veterinary systems depends upon coordinated integration of precision production, biological innovation, preventive veterinary medicine, digital intelligence, ecological stewardship, climate adaptation, biodiversity conservation, resource optimization, food safety, One Health governance, and inclusive rural development. These domains are not independent policy priorities but interconnected components of a common resilience architecture.

From a translational perspective, the findings indicate that the greatest opportunities arise where technologies and disciplines intersect. Precision agriculture can become more powerful when combined with genomics, soil microbiology, climate modeling, and artificial intelligence. Veterinary medicine can become more preventive when combined with sensors, genomic epidemiology, digital surveillance, and precision nutrition. One Health can become more operational when agricultural, veterinary, environmental, and public-health datasets are integrated. Rural development can become more sustainable when scientific innovation is accompanied by education, infrastructure, financing, and equitable technology access.

The discussion consequently emphasizes that future research should prioritize integrated platforms rather than isolated technological projects. Multidisciplinary research consortia, shared laboratories, interoperable datasets, field-validation networks, One Health surveillance systems, translational research centers, and interdisciplinary education programs could accelerate scientific progress while improving practical applicability. Such structures would enable researchers to address biological, technological, environmental, economic, and social dimensions simultaneously.

The findings also demonstrate the importance of long-term evaluation. Many sustainability interventions generate benefits over years or decades rather than immediately. Soil restoration,

biodiversity recovery, genetic improvement, climate adaptation, disease prevention, and infrastructure development may require prolonged monitoring. Short-term productivity assessments may therefore underestimate long-term benefits or fail to detect delayed ecological consequences. Longitudinal research and systems-level indicators are consequently essential.

A further implication is that future agricultural and veterinary research should increasingly incorporate life-cycle assessment and systems-level sustainability metrics. Evaluating only farm-level yield can overlook environmental effects occurring upstream or downstream. Life-cycle approaches can assess energy consumption, greenhouse-gas emissions, water use, land requirements, waste generation, and ecological impacts across production chains. Such assessments can provide more scientifically defensible comparisons among alternative technologies and management systems.

The integrated evidence also supports greater attention to planetary boundaries and ecological thresholds. Agricultural systems operate within finite environmental limits. Intensification that exceeds soil, water, biodiversity, or atmospheric thresholds may generate declining returns and increasing ecological damage. Sustainable innovation must therefore seek optimization within ecological boundaries rather than indefinite expansion of material inputs. This represents an important conceptual transition from maximizing production toward optimizing production within resilient ecological systems.

Overall, the results and discussion establish that contemporary agricultural and veterinary sciences are moving toward a highly interconnected, preventive, precision-oriented, environmentally conscious, digitally enabled, and translational model. This transformation is driven simultaneously by scientific advances, technological innovation, environmental pressures, disease threats, climate change, resource limitations, food-security challenges, and changing societal expectations. The convergence of these forces creates both unprecedented opportunities and substantial governance challenges.

The central scientific conclusion arising from the results is that agricultural and veterinary innovation should be evaluated according to its ability to produce multidimensional benefits rather than isolated technological performance. The most valuable innovations are those capable of improving productivity while reducing resource consumption, strengthening animal health and welfare, protecting biodiversity, limiting environmental contamination, improving food safety, reducing antimicrobial resistance, increasing climate resilience, and supporting rural livelihoods. This requires an integrated scientific architecture in which innovation, prevention, ecological stewardship, and socioeconomic responsibility operate simultaneously.

Accordingly, the future of agricultural and veterinary sciences should be constructed around interconnected principles of precision, prevention, resilience, sustainability, evidence-based practice, technological responsibility, interdisciplinary collaboration, and One Health integration. Such a framework offers a scientifically coherent pathway for translating advances in biotechnology, artificial intelligence, precision agriculture, veterinary medicine, genomics, environmental science, and digital systems into practical interventions capable of strengthening food-system security and ecological resilience. The ultimate value of contemporary scientific progress will therefore depend not simply on how much agricultural or animal production can be achieved, but on whether that production can be maintained safely, ethically, equitably, and sustainably within the ecological and socioeconomic limits of the twenty-first century.

ANALYSIS

The contemporary transformation of agricultural and veterinary sciences represents not merely an accumulation of technological innovations, methodological refinements, or disciplinary discoveries, but a profound reconfiguration of the epistemological, organizational, ecological,

and translational foundations through which food-producing systems are understood and managed. The analytical synthesis developed in the present study indicates that agriculture and veterinary medicine can no longer be adequately conceptualized as independent professional or scientific domains operating according to largely separate objectives. Rather, they constitute dynamically interconnected components of a broader agroecological, socioeconomic, technological, epidemiological, and public-health system in which crop productivity, animal health, environmental integrity, food safety, climate stability, biodiversity, resource availability, and rural livelihoods are mutually dependent. This systems-level interdependence is increasingly reinforced by the accelerating emergence of precision agriculture, artificial intelligence, genomics, biotechnology, digital surveillance, advanced diagnostics, remote sensing, automated production systems, ecological engineering, climate-smart management, and One Health approaches. The analytical significance of these developments lies not solely in their individual technical capacities but in their potential to transform the architecture of decision-making across agricultural and veterinary systems.

A central analytical conclusion emerging from the integrated evidence is that future agricultural productivity cannot be evaluated exclusively through conventional indicators such as yield per hectare, livestock growth rate, production volume, or short-term economic return. Such indicators remain important, but their scientific and policy relevance becomes incomplete when considered independently of soil health, water availability, biodiversity, greenhouse-gas emissions, chemical and biological contamination, animal welfare, antimicrobial resistance, ecosystem functionality, resilience to climatic disturbances, and socioeconomic sustainability. The concept of productivity is therefore undergoing substantive conceptual expansion. Contemporary agricultural science increasingly interprets productivity as a multidimensional outcome reflecting the capacity of agroecosystems to generate safe and nutritious products while maintaining ecological functions, optimizing resource use, preserving biological diversity, and sustaining productive capacity over time. This transition from narrow productivity maximization toward resilient and sustainable productivity represents one of the most important analytical paradigms emerging from the present synthesis.

The same transformation is evident within veterinary sciences. Historically, veterinary medicine was predominantly structured around diagnosis and treatment of individual animals, although population medicine, epidemiology, preventive medicine, and food-animal health subsequently broadened the discipline. Contemporary veterinary science increasingly operates within a preventive, population-based, epidemiological, genomic, ecological, and public-health framework. Animal disease is no longer interpreted exclusively as an isolated pathological event but as a potential manifestation of complex interactions among host genetics, pathogen biology, environmental conditions, nutrition, husbandry practices, animal movement, climate variability, production intensity, wildlife interfaces, and human behavior. This analytical transition has considerable implications for veterinary education, research methodology, surveillance architecture, clinical practice, food safety, antimicrobial stewardship, and public-health preparedness. The veterinary profession is consequently evolving from a predominantly therapeutic model toward a multidimensional health-management profession situated at the interface between animal production, environmental science, epidemiology, biotechnology, and human health.

The integration of agricultural and veterinary sciences through One Health provides a particularly powerful analytical framework for understanding these transformations. Crops, livestock, wildlife, microorganisms, soil, water, food chains, and human populations form interconnected biological networks rather than isolated compartments. Pathogens can move across ecological boundaries; antimicrobial residues and resistant microorganisms can circulate

through environmental matrices; agricultural chemicals can influence non-target organisms; climate change can modify vector distributions and disease transmission; biodiversity loss can alter ecosystem stability; and agricultural production practices can affect the nutritional quality and safety of food. Consequently, interventions developed within one sector may produce consequences in another. The analytical implication is that technological or managerial optimization must be evaluated in terms of system-wide consequences rather than isolated sectoral performance. One Health therefore represents not merely an interdisciplinary slogan but an operational analytical framework for identifying interdependencies, anticipating externalities, and designing integrated interventions.

Precision agriculture constitutes one of the clearest manifestations of the broader transition toward data-intensive and context-specific agricultural management. Conventional production systems often apply inputs according to generalized assumptions about field conditions, whereas precision agriculture seeks to identify spatial and temporal heterogeneity and align management decisions with measurable variation. Remote sensing, geographic information systems, satellite imagery, unmanned aerial platforms, proximal sensors, soil mapping, variable-rate application systems, yield monitoring, machine learning, and decision-support platforms have collectively created unprecedented opportunities to characterize agricultural environments at increasingly fine spatial and temporal scales. The analytical value of precision agriculture therefore extends beyond automation. Its deeper significance lies in the transition from generalized management toward evidence-informed, site-specific, adaptive decision-making.

Nevertheless, the analysis demonstrates that technological sophistication does not automatically generate superior agricultural outcomes. Precision systems depend upon the validity, representativeness, resolution, interoperability, and interpretability of the underlying data. Poorly calibrated sensors, incomplete datasets, inconsistent geospatial references, inappropriate algorithms, inadequate ground-truthing, or poorly designed decision rules may generate highly sophisticated but scientifically unreliable recommendations. The analytical challenge is therefore not simply to collect more data but to establish robust data-quality architectures and scientifically defensible interpretation mechanisms. Artificial intelligence can identify complex nonlinear relationships, but its predictive capacity is constrained by the quality of the datasets used for training and validation. Agricultural artificial intelligence must consequently be understood as an extension of scientific reasoning rather than a replacement for agronomic expertise.

Machine learning and artificial intelligence introduce additional analytical complexities. Algorithms can identify disease signatures in plant imagery, estimate crop stress, forecast yields, optimize irrigation, classify soil properties, predict pest emergence, identify animal behavior, and assist disease surveillance. Yet algorithmic performance in controlled research environments may not necessarily translate into reliable performance across heterogeneous agricultural contexts. Geographic variation, cultivar differences, soil heterogeneity, seasonal variation, sensor characteristics, management practices, and climatic conditions may substantially alter model performance. Generalizability therefore becomes a central scientific criterion. An algorithm with high predictive accuracy in one geographic region may demonstrate substantially lower performance when transferred to another production environment. This phenomenon highlights the necessity of external validation, continuous model recalibration, transparent performance assessment, and context-sensitive deployment.

The analysis further indicates that the expansion of digital agriculture creates a new category of infrastructural dependency. As farming systems become increasingly dependent upon cloud platforms, sensors, communication networks, automated machinery, and digital decision-

support systems, agricultural resilience becomes partially dependent upon digital resilience. Connectivity failures, cybersecurity incidents, software errors, data corruption, proprietary platform restrictions, or inadequate interoperability can compromise production decisions. Consequently, digitalization should not be conceptualized exclusively as a mechanism for increasing efficiency. It must also be evaluated through the dimensions of cybersecurity, continuity, accessibility, interoperability, ownership, governance, and technological sovereignty. A resilient digital agricultural system requires not only advanced algorithms but also robust infrastructure, contingency planning, transparent governance, and mechanisms for maintaining essential production functions during technological disruption.

Biotechnology represents another major analytical domain in the transformation of agricultural and veterinary sciences. Molecular breeding, genomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics, gene editing, microbial biotechnology, recombinant technologies, molecular diagnostics, and bioprocess engineering have expanded the scientific capacity to understand and manipulate biological systems. In crop production, these approaches can accelerate genetic improvement, improve resistance to pathogens and environmental stress, optimize nutritional characteristics, and enhance adaptation to changing climatic conditions. In livestock systems, genomics can contribute to improved breeding strategies, disease resistance, production efficiency, reproductive performance, and potentially welfare-related traits. In veterinary medicine, molecular technologies enable increasingly rapid pathogen identification, genomic characterization, molecular epidemiology, and precision diagnostics.

The analytical significance of biotechnology lies in its capacity to shift agricultural innovation from predominantly phenotype-driven selection toward increasingly mechanism-informed biological design. Traditional breeding remains fundamental, but genomic information can identify genetic variants associated with desirable traits and potentially accelerate selection. Gene-editing technologies may allow targeted modification of biological characteristics with greater precision than conventional mutagenesis. However, scientific precision at the molecular level does not eliminate the need for ecological, ethical, regulatory, and socioeconomic assessment. A genetically modified or gene-edited organism exists within an ecological and production system, and therefore its consequences must be considered across multiple scales. Biosafety, gene flow, non-target effects, ecological interactions, food safety, animal welfare, intellectual property, access, and public acceptance must form part of the analytical evaluation. The analysis therefore supports a distinction between technological feasibility and socially responsible innovation. An intervention may be scientifically achievable while remaining economically inaccessible, ethically contested, environmentally uncertain, or institutionally difficult to implement. Translational agricultural and veterinary science must consequently move beyond proof-of-concept research toward implementation-oriented evaluation. Technologies should be assessed not only according to whether they work under experimental conditions but also according to whether they can be integrated into real-world production systems, whether users can operate them effectively, whether infrastructure exists to support them, whether economic benefits justify implementation costs, and whether their distributional consequences are acceptable.

Climate adaptation constitutes a further central analytical dimension. Climate variability increasingly challenges agricultural systems through changes in temperature, precipitation, drought frequency, heat stress, extreme weather events, water availability, pest and pathogen dynamics, and growing-season characteristics. Livestock systems are simultaneously affected through heat stress, altered forage availability, disease-vector expansion, water scarcity, and changes in feed quality. These processes demonstrate that climate adaptation cannot be reduced to a single technological intervention. Rather, resilience emerges from combinations of genetic

adaptation, diversified production systems, soil conservation, water management, agroecological practices, improved forecasting, infrastructure, livestock management, disease surveillance, and institutional preparedness.

The analytical concept of resilience is particularly important because it differs from simple resistance. A system may not prevent every disturbance, but it may possess the capacity to absorb shocks, maintain essential functions, reorganize, and recover without losing its long-term productive identity. Agricultural resilience therefore depends upon redundancy, diversity, adaptive capacity, knowledge, infrastructure, financial resources, and institutional coordination. Monocultural systems may offer production efficiency under stable conditions but can become vulnerable when confronted with novel pathogens, climatic extremes, or market disruption. Diversification, genetic heterogeneity, integrated farming, soil biological management, water conservation, and flexible decision-support systems can increase adaptive capacity by reducing dependence upon single pathways of production.

Biodiversity must consequently be analyzed not as an external environmental concern but as a functional component of agricultural productivity and resilience. Pollinators, soil microorganisms, natural enemies of pests, genetic diversity within crops and livestock, and broader ecological communities contribute to ecosystem functionality. Simplification of agricultural landscapes may reduce certain ecological services and increase dependence on external inputs. Integrated pest management, agroecological diversification, habitat preservation, crop rotation, intercropping, biological control, and conservation-oriented production strategies can potentially strengthen ecological regulation while reducing chemical dependency. The analytical challenge is to determine where productivity gains and ecological benefits can be mutually reinforcing and where trade-offs may require explicit management.

Soil health represents another foundational component of the integrated agricultural system. Soil cannot be adequately treated as an inert medium for root anchorage and nutrient delivery. It is a complex biological system containing microorganisms, organic matter, minerals, water, gases, and interacting biochemical processes. Soil microbial communities contribute to nutrient cycling, organic matter transformation, plant-microbe interactions, disease suppression, and ecosystem functionality. Soil degradation therefore represents not simply a decline in physical fertility but a disruption of biological and ecological processes. Sustainable soil management must consequently integrate physical, chemical, and biological indicators rather than rely exclusively on conventional nutrient measurements.

Microbial biotechnology provides important opportunities in this context. Beneficial microorganisms may support nutrient availability, biological nitrogen fixation, phosphorus mobilization, plant growth promotion, pathogen suppression, and soil structure. Biofertilizers and microbial biocontrol agents can potentially reduce reliance on synthetic inputs while supporting ecological sustainability. However, microbial interventions are context-dependent. Their efficacy can vary according to soil characteristics, climate, microbial community composition, crop genotype, agricultural practices, and environmental conditions. The analytical implication is that microbial biotechnology should be evaluated as an ecological intervention rather than a standardized chemical replacement. Successful deployment requires understanding microbial ecology, host-microbiome interactions, environmental compatibility, formulation stability, and long-term ecosystem consequences.

Water management represents another domain in which technological and ecological approaches converge. Agriculture remains a major consumer of freshwater resources, while climate variability increases uncertainty concerning availability. Precision irrigation, soil-moisture monitoring, remote sensing, evapotranspiration estimation, deficit irrigation strategies, drought-tolerant cultivars, water harvesting, improved irrigation infrastructure, and

landscape-scale water management can increase water-use efficiency. However, technological efficiency alone may not guarantee sustainable water use if increased productivity stimulates expansion of irrigated production. The analytical distinction between efficiency and sustainability is therefore critical. An intervention can increase efficiency per unit of output while total resource consumption remains high. Sustainable resource optimization requires consideration of absolute consumption, ecosystem thresholds, cumulative demand, and competing societal needs.

The same analytical logic applies to fertilizer and pesticide management. Precision application technologies may reduce unnecessary inputs by matching application rates to crop requirements and spatial heterogeneity. Integrated pest management can combine biological control, resistant cultivars, cultural practices, monitoring, and selective chemical intervention. Yet the objective should not be defined merely as minimizing chemical inputs; it should be to achieve acceptable production outcomes while reducing ecological and human-health risks. Risk-based management is therefore more scientifically appropriate than simplistic input reduction. The ecological toxicity, persistence, mobility, bioaccumulation potential, non-target effects, and cumulative environmental consequences of agricultural chemicals require consideration alongside efficacy.

Veterinary pharmacology and antimicrobial stewardship become particularly significant within this integrated framework. Antimicrobial resistance represents a paradigmatic One Health challenge because antimicrobial use in animals, humans, and environmental systems can contribute to interconnected resistance dynamics. The analysis indicates that responsible antimicrobial management requires accurate diagnostics, evidence-based treatment decisions, vaccination, biosecurity, infection prevention, husbandry improvement, surveillance, and professional education. Reducing antimicrobial consumption without strengthening disease prevention may create unintended consequences if untreated infections compromise animal welfare and productivity. Conversely, excessive or inappropriate antimicrobial use can accelerate resistance and increase risks for human and environmental health. Rational antimicrobial stewardship therefore requires a balanced, evidence-informed strategy emphasizing prevention and diagnostic precision.

Vaccination emerges as a particularly important preventive intervention within modern veterinary systems. Effective vaccination can reduce disease incidence, decrease pathogen transmission, improve animal health, and potentially reduce antimicrobial demand. However, vaccination strategies must account for pathogen diversity, vaccine efficacy, population immunity, timing, maternal antibodies, production conditions, and disease epidemiology. The analytical perspective therefore supports movement from reactive treatment toward anticipatory health management. Disease prevention is generally more systemically efficient when supported by surveillance, biosecurity, vaccination, nutritional optimization, and environmental management.

Animal nutrition likewise increasingly benefits from precision approaches. Nutritional requirements vary according to species, genotype, age, physiological state, production level, environmental conditions, and health status. Precision nutrition seeks to align nutrient delivery with biological requirements, reducing waste and potentially improving productivity and environmental efficiency. Digital monitoring, metabolic indicators, automated feeding systems, and predictive analytics can facilitate increasingly individualized management. Nevertheless, optimization must remain bounded by welfare, biological constraints, and ecological considerations. Maximum production is not synonymous with optimal production if it increases disease susceptibility, metabolic stress, or compromised welfare.

Animal welfare represents an essential dimension of the analytical framework because productivity-centered models can generate hidden biological and ethical costs. Contemporary veterinary science increasingly recognizes welfare as multidimensional, encompassing physical health, nutrition, environmental comfort, behavioral expression, and psychological state. Precision livestock technologies can potentially improve welfare monitoring by detecting changes in movement, feeding behavior, vocalization, body condition, temperature, and social interaction. Yet technological surveillance should complement rather than replace professional judgment. Algorithms may identify deviations from behavioral norms, but interpretation requires understanding species-specific biology and production context.

Precision livestock farming therefore parallels precision crop production in its transition toward continuous measurement and individualized intervention. Sensors, wearable devices, cameras, automated milking systems, environmental monitors, and behavioral analytics can generate large quantities of animal-level data. These technologies may facilitate earlier detection of disease and reduce the interval between physiological deterioration and intervention. However, data abundance can create new analytical burdens. Continuous monitoring may generate false-positive alerts, information overload, algorithmic bias, and decision fatigue. Effective digital veterinary systems therefore require clinically meaningful thresholds, validated biomarkers, prioritization algorithms, and integration with veterinary expertise.

Disease surveillance is similarly undergoing a major transformation through molecular epidemiology, genomic sequencing, digital reporting, geographic information systems, and computational modeling. Pathogen genomes can provide information about transmission patterns, evolutionary relationships, antimicrobial resistance determinants, and emerging variants. When integrated with epidemiological, ecological, and animal movement data, genomic surveillance can substantially strengthen outbreak investigation and early warning. The analytical challenge, however, is to integrate heterogeneous datasets while preserving data quality, privacy, interoperability, and interpretability. Genomic information without epidemiological context may provide incomplete conclusions, while epidemiological observations without molecular resolution may obscure transmission pathways. Their integration therefore creates greater analytical value than either dataset alone.

Emerging infectious diseases provide perhaps the strongest justification for integrated agricultural-veterinary-environmental surveillance. Wildlife-livestock-human interfaces are influenced by land-use change, agricultural expansion, wildlife trade, climate variability, biodiversity disruption, and animal movement. These factors can create opportunities for pathogen emergence and spillover. Consequently, surveillance must increasingly extend beyond farms and veterinary clinics into ecological landscapes and food systems. Early warning systems that integrate veterinary reports, wildlife surveillance, environmental indicators, climate information, genomic data, and human-health signals can potentially identify emerging threats earlier than conventional sector-specific systems.

Food safety is another major area in which agricultural and veterinary systems converge. Hazards can arise from biological pathogens, chemical contaminants, veterinary drug residues, pesticides, mycotoxins, heavy metals, environmental pollutants, and emerging contaminants. Risk management therefore requires surveillance across the entire food chain, from production and processing to distribution and consumption. Veterinary professionals contribute through animal health management, residue control, zoonotic disease prevention, inspection, and food-animal medicine, while agricultural scientists contribute to crop protection, soil and water safety, pesticide management, and post-harvest systems. The analytical conclusion is that food safety should be approached as a continuous chain of risk management rather than as a final inspection activity.

Ecological safety further expands this perspective. Agricultural systems may introduce substances into soils, water bodies, and atmospheric compartments. Nutrient runoff can affect aquatic ecosystems; pesticide residues may influence non-target organisms; antimicrobial residues and resistant microorganisms can enter environmental pathways; and intensive production can modify nutrient cycles. Environmental safety therefore requires life-cycle thinking and assessment of cumulative effects. A narrow evaluation of farm-level efficiency can overlook downstream environmental costs. Sustainable agricultural innovation should accordingly be evaluated across production, processing, transport, consumption, and waste-management stages.

Circular economy principles provide an important analytical framework for reducing such losses. Agricultural and livestock systems generate substantial organic residues, including crop residues, manure, processing by-products, and wastewater. These materials may be treated as wastes or as resources depending on system design. Composting, anaerobic digestion, nutrient recovery, bioenergy generation, feed coproduct utilization, and soil amendment strategies can transform residual streams into productive inputs. However, circularity requires rigorous risk management because biological residues may contain pathogens, pharmaceutical residues, heavy metals, or other contaminants. Circular agriculture must therefore combine resource recovery with biosafety, environmental monitoring, and regulatory oversight.

Food-system resilience is increasingly influenced by factors beyond farm production itself. Supply-chain disruption, geopolitical instability, market volatility, energy costs, transport interruptions, extreme weather, disease outbreaks, and changing consumer preferences can affect food availability. Agricultural science must therefore increasingly analyze production within broader food-system networks. Diversified supply chains, local and regional production capacity, strategic reserves, digital logistics, improved storage, reduced post-harvest losses, and resilient infrastructure can complement farm-level innovation. The analytical implication is that food security cannot be achieved exclusively through increasing production; it also depends upon distribution, affordability, accessibility, safety, and system adaptability.

Rural development constitutes an equally important dimension because technological modernization can generate unequal benefits if infrastructure, capital, education, or market access are unevenly distributed. Large-scale producers may adopt precision technologies more rapidly because they possess greater financial and technical resources. Smallholder farmers may face barriers related to equipment costs, connectivity, technical literacy, financing, and fragmented landholdings. If innovation policy ignores these structural differences, technological progress may increase rather than reduce socioeconomic inequalities. Consequently, inclusive innovation requires scalable technologies, cooperative models, extension services, accessible financing, open standards, local adaptation, and capacity-building.

Agricultural extension must therefore evolve alongside technological transformation. Traditional knowledge-transfer models based on one-way dissemination may be insufficient in data-intensive agricultural environments. Farmers increasingly require competencies in interpreting sensor data, evaluating digital recommendations, understanding biological interventions, managing technological systems, and integrating scientific evidence with local knowledge. Extension should therefore become more participatory and digitally enabled while maintaining strong human interaction. Local knowledge should not be dismissed as scientifically inferior; rather, it can provide contextual information that complements formal scientific datasets. Effective agricultural innovation emerges when empirical local experience and scientifically validated knowledge are systematically integrated.

Veterinary education requires a parallel transformation. Future veterinarians increasingly need competencies in epidemiology, genomics, bioinformatics, antimicrobial stewardship, food safety, environmental health, One Health, data interpretation, animal welfare, and digital technologies. Clinical expertise remains essential, but it must be complemented by population-level reasoning and interdisciplinary communication. Veterinary professionals must increasingly understand how individual clinical decisions affect antimicrobial resistance, disease transmission, food safety, production economics, and public health. This broadening of professional competencies reflects the changing complexity of veterinary practice.

The same argument applies to agricultural education. Agronomists, plant pathologists, soil scientists, agricultural engineers, environmental scientists, and food-system professionals increasingly require interdisciplinary competencies. Precision production involves the integration of agronomy, engineering, geospatial science, statistics, artificial intelligence, economics, and environmental management. Biotechnology requires molecular biology, genetics, bioinformatics, regulatory science, and ethical assessment. Climate adaptation requires ecological science, climatology, agronomy, hydrology, economics, and social science. The analytical conclusion is that disciplinary specialization remains indispensable, but specialization without integrative competence may become insufficient for addressing complex system-level challenges.

Translational research therefore emerges as a central organizing principle. Scientific discoveries acquire societal value only when they can be translated into validated technologies, practical interventions, policy instruments, professional practices, or institutional strategies. The translation pathway from laboratory discovery to field application is often nonlinear and constrained by economic, infrastructural, behavioral, regulatory, and cultural factors. Agricultural and veterinary research must therefore increasingly incorporate implementation science, technology assessment, economic evaluation, stakeholder engagement, and real-world validation. Research institutions should evaluate not only publication outputs but also demonstrable improvements in productivity, health, sustainability, resilience, and societal well-being.

The analysis further demonstrates that evidence-based decision-making should become a foundational principle across agricultural and veterinary systems. Evidence-based practice does not mean mechanistically applying published findings. It requires integration of high-quality scientific evidence with contextual expertise, biological constraints, stakeholder priorities, resource availability, and ethical considerations. Agricultural recommendations should therefore account for local climate, soil conditions, production systems, economic constraints, and ecological thresholds. Veterinary decisions should similarly integrate diagnostic evidence, disease prevalence, animal-level characteristics, population epidemiology, treatment efficacy, resistance patterns, welfare considerations, and owner or producer circumstances.

Data governance is becoming increasingly important as scientific and production systems become more digitized. Agricultural datasets may contain information concerning land use, production volumes, farm operations, economic performance, environmental conditions, and proprietary technologies. Veterinary datasets may contain animal health information, movement patterns, diagnostic results, genomic data, and antimicrobial-use records. Governance frameworks must establish appropriate standards for data ownership, access, sharing, privacy, interoperability, security, and responsible secondary use. Without trust, data-sharing systems may remain fragmented. Without interoperability, valuable datasets may remain technically incompatible. Without standardized metadata, analytical integration becomes difficult. Thus, digital transformation requires institutional governance alongside technological development.

Interoperability is particularly important for One Health surveillance. Human-health, veterinary, environmental, agricultural, and wildlife datasets are often collected by different institutions using different standards. Their integration requires common ontologies, data standards, geographic references, temporal synchronization, and communication protocols. Establishing such infrastructures is scientifically demanding but potentially transformative. Integrated surveillance can generate insights that remain invisible within isolated datasets. For example, a rise in antimicrobial resistance in livestock may become more informative when compared with environmental resistance patterns and human clinical data. Similarly, changes in vector populations may become more meaningful when combined with climate and animal disease information.

Economic analysis must also become more sophisticated. Technological adoption is influenced not only by technical effectiveness but by investment costs, maintenance requirements, labor implications, opportunity costs, productivity gains, risk reduction, and market incentives. A technology that produces substantial biological benefits may remain underutilized if financial returns are uncertain. Conversely, technologies with rapid financial returns may produce ecological externalities that undermine long-term sustainability. Economic evaluation should therefore increasingly incorporate environmental costs, health benefits, risk reduction, resilience, and social outcomes rather than relying exclusively on short-term profitability.

Regulatory science occupies an increasingly strategic position within agricultural and veterinary innovation. Novel biotechnology, digital diagnostics, gene editing, microbial products, autonomous machinery, precision animal technologies, and data-driven decision systems may not fit neatly within existing regulatory categories. Regulatory systems must therefore balance innovation with biosafety, environmental protection, animal welfare, food safety, and public confidence. Excessively restrictive regulation may delay beneficial innovations, while inadequate oversight may permit unacceptable risks. Adaptive, evidence-based regulatory frameworks can provide mechanisms for innovation while maintaining scientific accountability.

Biosecurity represents another critical analytical component. Agricultural and livestock systems are vulnerable to biological threats introduced through animal movement, trade, contaminated equipment, feed, water, personnel, wildlife interactions, and environmental pathways. Biosecurity must therefore be conceptualized as a layered system encompassing prevention, detection, containment, response, and recovery. Digital surveillance and genomic epidemiology can strengthen detection, but physical and organizational measures remain fundamental. Biosecurity effectiveness depends heavily on compliance, training, infrastructure, and institutional coordination. Technological tools should consequently be embedded within comprehensive biosecurity systems rather than treated as standalone solutions.

The analysis also identifies the importance of uncertainty management. Agricultural and veterinary systems operate under substantial uncertainty arising from climate variability, biological evolution, incomplete information, market dynamics, and complex ecological interactions. Scientific decision-making should therefore communicate uncertainty explicitly rather than presenting predictions as deterministic. Probabilistic forecasting, scenario analysis, sensitivity assessment, and adaptive management can improve decision quality. Resilient systems are not those that perfectly predict the future but those capable of functioning effectively under a range of plausible futures.

Digital twins and simulation-based approaches may contribute to this capacity. By integrating sensor data, environmental information, biological models, and historical observations, digital representations of farms, livestock populations, watersheds, or food systems may allow decision-makers to evaluate potential interventions before implementing them. Such

approaches could support irrigation planning, disease-control strategies, nutrient management, production forecasting, and climate adaptation. However, digital twins are only as reliable as the models and data underlying them. Their value depends upon calibration, validation, uncertainty quantification, and transparent assumptions.

Autonomous agricultural robotics represents another emerging technological frontier. Automated tractors, harvesting systems, robotic weed control, autonomous monitoring platforms, and robotic livestock-management systems may reduce labor requirements and improve precision. Yet automation introduces questions concerning workforce transformation, capital concentration, technical maintenance, safety, and accessibility. The analytical assessment of automation must therefore include socioeconomic consequences alongside engineering performance. In rural regions where agricultural employment contributes substantially to livelihoods, technological substitution may require complementary policies for workforce transition, training, and economic diversification.

Artificial intelligence in veterinary medicine similarly requires careful governance. Predictive models may estimate disease risk, interpret imaging, analyze laboratory data, monitor animal behavior, or support clinical decision-making. However, veterinary AI systems must undergo rigorous validation because errors can affect animal welfare, treatment outcomes, production economics, and public health. Algorithmic transparency and explainability are particularly important when decisions involve antimicrobial use, euthanasia, disease-control interventions, or movement restrictions. Human oversight should remain central to high-consequence decisions.

The analytical synthesis further indicates that the future of agricultural and veterinary science will increasingly depend upon convergence rather than simple interdisciplinarity. Interdisciplinary collaboration traditionally involves different disciplines contributing complementary expertise to a shared project. Convergence goes further by creating new methodological and conceptual spaces between disciplines. For example, precision livestock epidemiology integrates veterinary medicine, sensor engineering, artificial intelligence, statistics, and epidemiology into a new analytical domain. Agricultural microbiome science combines soil science, molecular biology, ecology, genomics, and bioinformatics. Digital agroecology integrates ecological theory with computational sensing and spatial analytics. Such convergence may generate scientific innovations that cannot emerge from isolated disciplinary development.

This convergence also changes the meaning of expertise. Future scientific professionals may require a combination of deep disciplinary competence and sufficient interdisciplinary literacy to communicate across fields. A soil scientist need not become a computer scientist, but must understand how sensor-derived data are generated and interpreted. A veterinarian need not become a genomic bioinformatician, but should understand genomic surveillance sufficiently to interpret its clinical and epidemiological relevance. An agricultural engineer need not become an ecologist, but should understand ecological constraints when designing automated production systems. The future professional model is therefore likely to combine specialization with integrative competence.

Ethical analysis is inseparable from these developments. Agricultural biotechnology, genetic modification, gene editing, animal genomics, precision livestock monitoring, autonomous machinery, and artificial intelligence raise questions concerning welfare, autonomy, ownership, environmental stewardship, distributive justice, and intergenerational responsibility. Ethical assessment should not be restricted to public acceptance after technological development. Ethical considerations should be incorporated during research design, technology development, regulatory assessment, and implementation. Responsible innovation requires anticipation of

potential harms, inclusion of affected stakeholders, transparency, accountability, and mechanisms for corrective action.

Animal welfare introduces particularly important ethical considerations in technological systems. Precision monitoring may enhance welfare by identifying disease earlier, but excessive surveillance or productivity optimization could potentially intensify production pressures. Genetic selection for production traits may generate trade-offs with disease resistance or welfare if not carefully managed. Therefore, technological optimization should remain subordinate to biological integrity and welfare principles. Sustainable animal production must recognize animals not simply as productive units but as sentient biological organisms whose health and welfare constitute intrinsic and practical priorities.

Environmental ethics similarly requires consideration of intergenerational effects. Soil degradation, biodiversity loss, water depletion, and ecosystem contamination may create costs that become more apparent over long time horizons. Short-term production gains may therefore be misleading if they undermine future productive capacity. Sustainable agricultural science must consequently incorporate temporal scales extending beyond individual production cycles. Long-term soil fertility, ecosystem resilience, genetic diversity, and water security should be treated as productive assets rather than external environmental concerns.

The analysis also reveals a growing need to distinguish between innovation and novelty. Not every new technology represents meaningful scientific progress. Innovation should be evaluated according to whether it produces demonstrable improvements in outcomes, efficiency, safety, resilience, sustainability, or equity. Technological novelty without validated benefit can increase complexity and resource consumption without solving underlying problems. Evidence-based innovation therefore requires comparative evaluation against existing best practices, consideration of opportunity costs, and long-term assessment.

The concept of optimization itself must also be reconsidered. Agricultural systems often contain multiple competing objectives: maximizing yield, minimizing environmental impact, maintaining profitability, protecting biodiversity, ensuring animal welfare, reducing antimicrobial use, conserving water, and supporting rural livelihoods. No single intervention can simultaneously maximize all objectives. The appropriate analytical framework is therefore multi-objective optimization rather than single-variable optimization. Decision-support systems should make trade-offs explicit and allow stakeholders to evaluate alternative strategies according to different priorities and constraints.

Systems modeling can provide valuable support in this context. Integrated models can examine interactions among climate, crops, livestock, water, nutrients, markets, and disease. Scenario analysis can evaluate potential responses to climate change, disease outbreaks, resource shortages, or technological adoption. However, models necessarily simplify reality. Their usefulness depends upon transparent assumptions, empirical validation, appropriate parameterization, and careful interpretation. Models should support rather than replace expert judgment.

The concept of ecological thresholds is particularly important for sustainable optimization. Ecosystems may tolerate certain levels of disturbance before undergoing nonlinear changes. Agricultural practices that remain within ecological thresholds may sustain production while preserving ecosystem functionality. Once thresholds are exceeded, recovery may become difficult or costly. This suggests that sustainability indicators should include not only average performance but proximity to ecological limits. Soil organic matter, groundwater levels, biodiversity indicators, nutrient balances, pesticide loads, antimicrobial resistance, and greenhouse-gas emissions can serve as components of broader sustainability monitoring frameworks.

Life-cycle assessment offers another analytical mechanism for evaluating technological interventions. A technology that reduces environmental impacts during production may increase impacts elsewhere in the supply chain. For example, manufacturing sophisticated equipment may require substantial energy and materials, while digital infrastructures require data centers and communication networks. Conversely, precision technologies may produce significant downstream savings through reduced inputs and improved productivity. Life-cycle analysis therefore helps prevent narrow assessments based on a single stage of the production chain.

The integration of environmental, animal, and human health outcomes also suggests a movement toward planetary health perspectives. Agricultural systems influence atmospheric composition, land use, water cycles, biodiversity, and human nutrition. Veterinary health influences food production, zoonotic disease risk, antimicrobial resistance, and ecosystem interactions. Human health depends upon the availability of safe, nutritious food and stable environmental conditions. The analytical boundaries between agricultural science, veterinary science, public health, and environmental science are therefore becoming increasingly permeable.

Food and nutrition security should consequently be integrated into agricultural innovation assessment. Increasing production quantity does not necessarily guarantee nutritional adequacy. Crop breeding and biotechnology can influence nutritional composition, while livestock systems contribute high-quality protein and micronutrients. However, food systems must also consider dietary diversity, affordability, cultural preferences, food safety, and accessibility. Agricultural policy should therefore evaluate both production performance and nutritional outcomes.

The analysis further supports the importance of post-harvest science. Losses occurring after harvest can undermine productivity gains achieved at the farm level. Improved storage, cold-chain infrastructure, processing technologies, packaging, pest management, drying systems, and logistics can increase the effective food supply without requiring proportional increases in land or water use. Digital monitoring may further improve storage conditions and traceability. Consequently, food-system resilience requires integration of pre-harvest and post-harvest innovation.

Traceability technologies can strengthen food safety and supply-chain accountability. Digital records, sensors, blockchain-based systems, molecular authentication, and geospatial tracking can potentially improve the capacity to identify contamination sources and verify production conditions. Yet traceability systems must remain proportionate, interoperable, affordable, and accessible. Complex systems that are expensive or difficult to use may create barriers for smaller producers. Technology should therefore be designed around practical utility rather than technological complexity alone.

Agricultural and veterinary laboratories represent critical infrastructure within the emerging scientific ecosystem. Advanced molecular diagnostics, antimicrobial susceptibility testing, genomic sequencing, residue analysis, pathogen detection, soil analysis, and environmental monitoring require appropriately equipped laboratories and trained personnel. Laboratory capacity is particularly important for low-resource settings, where diagnostic limitations can delay disease detection and compromise surveillance. Strengthening laboratory networks should therefore be viewed as an investment in agricultural productivity, food safety, veterinary health, and public-health preparedness.

The analysis also identifies the importance of international cooperation. Pathogens, pests, climate effects, food commodities, technologies, and environmental contaminants do not respect national borders. Agricultural and veterinary challenges therefore require transnational

information exchange, harmonized standards, collaborative research, capacity-building, and coordinated surveillance. International cooperation is particularly important for emerging diseases, antimicrobial resistance, food safety, climate adaptation, and biodiversity conservation. At the same time, international frameworks should allow adaptation to local ecological, economic, cultural, and institutional conditions.

For developing and transitional agricultural economies, including countries undergoing rapid modernization, the strategic challenge is to avoid reproducing unsustainable production pathways while adopting modern technologies. Leapfrogging opportunities may exist through digital agriculture, distributed renewable energy, modern diagnostics, biotechnology, and integrated surveillance. However, technological adoption should be accompanied by investment in education, laboratory infrastructure, extension services, regulatory capacity, data systems, and rural connectivity. Technology without institutional capacity may produce fragmented or unsustainable outcomes.

The analytical framework therefore suggests that capacity-building should be understood as multidimensional. Human capacity includes professional education and continuing development. Institutional capacity includes governance, regulation, financing, coordination, and research infrastructure. Technological capacity includes equipment, connectivity, software, laboratories, and data systems. Ecological capacity includes soil health, biodiversity, water availability, and ecosystem resilience. Social capacity includes community participation, trust, cooperation, and local knowledge. Sustainable transformation requires alignment among all these dimensions.

Implementation science becomes particularly relevant because the gap between evidence and practice remains a major barrier. Scientifically effective interventions may fail when implementation conditions are ignored. Factors such as organizational culture, workforce capacity, financing, leadership, incentives, user acceptability, infrastructure, and regulatory environment can determine whether innovation becomes routine practice. Agricultural and veterinary research should therefore increasingly include implementation outcomes such as adoption, fidelity, scalability, sustainability, cost-effectiveness, and equity.

The analysis also emphasizes the importance of monitoring unintended consequences. Every intervention modifies a system and may produce secondary effects. Increasing irrigation may reduce crop stress but intensify groundwater depletion. Intensifying livestock production may increase efficiency but create greater disease-transmission risks if biosecurity is inadequate. Reducing antimicrobial use may decrease resistance pressure but increase untreated disease if preventive measures are insufficient. Increasing automation may improve precision but create new socioeconomic vulnerabilities. Scientific analysis must therefore move beyond direct benefits to include indirect and delayed consequences.

Adaptive management provides a useful response to such complexity. Rather than assuming that interventions will perform exactly as predicted, adaptive systems monitor outcomes, learn from implementation, and modify strategies accordingly. Agricultural and veterinary management can thus become iterative rather than static. Sensor data, disease surveillance, environmental monitoring, economic indicators, and stakeholder feedback can feed into continuous improvement processes. Such systems are particularly valuable under conditions of uncertainty and rapid environmental change.

The synthesis ultimately indicates that prevention represents a unifying principle across agricultural and veterinary transformation. Preventive agriculture seeks to maintain soil health, manage pests before outbreaks, conserve water, preserve biodiversity, and anticipate climate stress. Preventive veterinary medicine emphasizes vaccination, biosecurity, surveillance, nutrition, welfare, and early diagnosis. Preventive food safety addresses contamination before

products reach consumers. Preventive environmental management seeks to avoid irreversible ecosystem degradation. Preventive systems generally require greater investment in monitoring and preparedness but can reduce the costs associated with crisis response.

Precision represents a second unifying principle. Precision agriculture matches inputs to crop requirements; precision livestock farming matches interventions to individual or population-level biological needs; precision diagnostics improves disease identification; genomic epidemiology improves pathogen characterization; precision nutrition aligns nutrients with biological requirements; and precision resource management optimizes water, fertilizer, energy, and labor. Yet precision must not be confused with technological complexity. True precision is achieved when decisions become more accurate, context-sensitive, and biologically appropriate.

Resilience represents a third unifying principle. Resilient systems integrate diversity, adaptability, redundancy, knowledge, infrastructure, and anticipatory capacity. Climate change, emerging pathogens, antimicrobial resistance, market disruption, and biodiversity loss all require systems capable of absorbing and responding to shocks. Resilience should therefore become an explicit objective of agricultural and veterinary policy rather than an indirect consequence of productivity improvement.

Sustainability represents a fourth principle, but its interpretation must remain scientifically rigorous. Sustainability does not imply simply reducing inputs or preserving existing systems. It involves maintaining the capacity of agricultural, ecological, and social systems to function over time while meeting present needs without compromising future capacity. Sustainable intensification may be appropriate in some contexts, while extensification, diversification, restoration, or technological transformation may be more appropriate in others. The correct strategy depends upon ecological conditions, resource constraints, socioeconomic structures, and production objectives.

One Health provides the integrative conceptual architecture connecting these principles. Prevention, precision, resilience, and sustainability acquire greater significance when considered across human, animal, plant, and environmental health. This integration allows researchers and policymakers to identify shared drivers and avoid interventions that optimize one sector at the expense of another. One Health therefore provides a scientifically coherent framework for managing interconnected risks while promoting shared benefits.

The overall analytical trajectory indicates a movement from reactive management toward anticipatory governance. Traditional systems often respond after disease, crop failure, environmental degradation, or resource scarcity becomes evident. Contemporary technologies increasingly allow prediction and early intervention. Climate models can anticipate stress periods; remote sensing can identify crop deterioration before visible symptoms become widespread; animal sensors can identify behavioral deviations before clinical disease is obvious; genomic surveillance can detect pathogen evolution; and machine-learning systems can forecast production risks. Anticipatory governance therefore becomes increasingly feasible, although its effectiveness depends on data quality, institutional preparedness, and decision-making capacity.

At the same time, anticipation must not become technological determinism. Forecasts are probabilistic, models are imperfect, and ecological systems can behave unpredictably. Scientific humility therefore remains essential. Decision-makers should treat predictive tools as evidence rather than certainty and maintain contingency plans for model failure. Human expertise, local knowledge, and institutional judgment remain essential components of resilient decision-making.

The analysis ultimately supports a comprehensive transformation of agricultural and veterinary sciences toward an integrated, evidence-informed, technology-enabled, ecologically responsible, preventive, and socially accountable scientific paradigm. The most significant advancement is not any single technology but the emergence of an interconnected architecture in which biotechnology, precision production, digital intelligence, veterinary preventive medicine, ecological science, climate adaptation, food safety, biodiversity conservation, resource optimization, and One Health are mutually reinforcing domains. The scientific value of this architecture lies in its capacity to address complexity without reducing it to isolated variables.

Future agricultural and veterinary research should consequently prioritize integrated research platforms capable of linking molecular, organismal, population, ecosystem, and socioeconomic scales. Such platforms should combine laboratory science with field validation, computational modeling with empirical observation, technological innovation with ecological assessment, and scientific evidence with stakeholder knowledge. Research evaluation should increasingly consider translational relevance, implementation feasibility, resilience, sustainability, and societal impact in addition to conventional scientific outputs.

The analytical evidence indicates that the future trajectory of agriculture and veterinary sciences will be determined by the degree to which scientific communities, educational institutions, governments, industry, producers, veterinarians, environmental professionals, and rural communities can collectively move beyond fragmented sectoral approaches. The central scientific challenge is no longer simply how to produce more, diagnose faster, automate further, or develop more sophisticated technologies. It is how to configure agricultural and veterinary systems so that productivity, animal health, human health, ecological integrity, resource security, biodiversity, climate resilience, food safety, and rural prosperity can be advanced simultaneously within scientifically defensible limits. Achieving this objective requires systems thinking, interdisciplinary convergence, evidence-based practice, responsible innovation, robust governance, continuous surveillance, adaptive management, and sustained investment in human and institutional capacity.

The emerging paradigm is therefore best understood as a transition toward intelligent agroecosystem stewardship. In such a framework, agricultural landscapes become monitored, adaptive, biologically informed systems; livestock production becomes increasingly preventive, welfare-centered, epidemiologically integrated, and digitally supported; biotechnology becomes more precise but remains subject to rigorous biosafety and ethical evaluation; environmental management becomes embedded within production planning; and food systems become increasingly designed around resilience, traceability, nutritional security, and ecological responsibility. Precision technologies provide analytical resolution, biotechnology provides biological capability, veterinary science provides health expertise, ecological science provides systems understanding, digital infrastructure provides connectivity, and One Health provides conceptual integration. Their convergence creates the possibility of an agricultural and veterinary science capable not merely of responding to twenty-first-century challenges but of anticipating and shaping them.

The criterion for scientific progress within this emerging paradigm should therefore be the capacity to generate durable, measurable, equitable, and ecologically compatible improvements in the health and functioning of interconnected agricultural systems. Scientific advances that increase production while degrading soils, compromising biodiversity, accelerating antimicrobial resistance, increasing inequity, or undermining long-term resilience cannot be regarded as complete solutions. Conversely, interventions that integrate productivity with ecological restoration, animal welfare, disease prevention, resource efficiency, climate

adaptation, and social benefit represent a more comprehensive conception of innovation. The future of agriculture and veterinary science will consequently depend less on isolated technological breakthroughs than on the intelligent integration of diverse forms of knowledge into resilient systems capable of learning, adapting, and sustaining life-supporting functions across generations.

CONCLUSION

The present comprehensive analysis demonstrates that contemporary agriculture and veterinary sciences are undergoing a profound scientific and translational transformation characterized by increasing interdisciplinarity, technological convergence, ecological consciousness, preventive orientation, and systems-level integration. Agricultural and veterinary production can no longer be adequately conceptualized through isolated disciplinary or sector-specific paradigms, because crop productivity, animal health and welfare, food safety, environmental integrity, biodiversity, climate resilience, antimicrobial resistance, resource availability, and rural socioeconomic development are intrinsically interconnected components of a complex agroecological and public-health system. The emerging scientific paradigm consequently requires integration of biological knowledge, advanced technologies, ecological principles, evidence-based decision-making, and One Health approaches.

Precision agriculture and precision livestock management represent major technological manifestations of this transformation, enabling increasingly context-specific monitoring, prediction, optimization, and intervention. Remote sensing, geospatial technologies, artificial intelligence, machine learning, automated systems, biosensors, digital surveillance, and decision-support platforms provide unprecedented opportunities to improve production efficiency and detect biological or environmental risks at earlier stages. Nevertheless, technological sophistication alone does not guarantee sustainable progress. Data quality, algorithmic validity, interoperability, cybersecurity, infrastructure, professional competence, affordability, ethical governance, and real-world validation remain essential determinants of technological effectiveness.

Biotechnology, genomics, molecular diagnostics, microbial technologies, and advanced breeding approaches further expand the capacity of agricultural and veterinary sciences to address biological constraints and emerging threats. Their responsible implementation requires simultaneous attention to biosafety, ecological consequences, animal welfare, food safety, regulatory science, public trust, and equitable access. Scientific innovation must therefore be evaluated not solely according to technical novelty but according to its demonstrated capacity to generate safe, scalable, economically viable, environmentally compatible, and socially beneficial outcomes.

Climate change, biodiversity loss, soil degradation, water scarcity, emerging infectious diseases, antimicrobial resistance, and global food-system instability collectively demonstrate the necessity of resilient and adaptive production systems. Sustainable agricultural development should consequently move beyond short-term maximization of production toward multidimensional optimization in which productivity is harmonized with resource conservation, ecological functionality, animal welfare, human health, and long-term system stability. Preventive veterinary medicine, vaccination, biosecurity, antimicrobial stewardship, precision nutrition, genomic epidemiology, and integrated disease surveillance are particularly important components of this transition.

The One Health framework provides the conceptual and operational foundation for integrating these diverse scientific dimensions. By recognizing the interdependence of human, animal, plant, and environmental health, One Health enables more comprehensive risk assessment,

coordinated surveillance, anticipatory intervention, and cross-sectoral innovation. Its application is particularly relevant to zoonotic diseases, antimicrobial resistance, food safety, environmental contamination, climate-sensitive health threats, and ecosystem disruption.

The future advancement of agricultural and veterinary sciences will depend on the successful convergence of scientific discovery, technological innovation, ecological stewardship, preventive health management, responsible governance, and inclusive rural development. The most scientifically valuable innovations will be those capable of simultaneously enhancing productivity, resilience, safety, sustainability, animal welfare, biodiversity, resource efficiency, and societal well-being. The transition toward integrated, intelligent, adaptive, evidence-informed, and ecologically responsible agro-veterinary systems therefore represents not merely an evolutionary development of existing disciplines, but a fundamental paradigm shift toward sustainable stewardship of interconnected biological and human systems.

RECOMMENDATIONS

The future development of agricultural and veterinary sciences should be guided by an integrated, interdisciplinary, evidence-informed, and translational strategy capable of simultaneously addressing productivity, animal health and welfare, environmental sustainability, food security, climate resilience, and rural socioeconomic development. Agricultural policies and research programmes should progressively transition from conventional production-oriented models toward systems-based approaches that recognize crops, livestock, soils, water resources, microorganisms, biodiversity, ecosystems, and human communities as interconnected components of complex agroecosystems. Greater investment should therefore be directed toward precision agriculture, remote sensing, geospatial technologies, artificial intelligence, machine learning, robotics, automated monitoring, digital decision-support systems, and interoperable agricultural data infrastructures, while ensuring rigorous validation, transparency, cybersecurity, affordability, and accessibility for diverse farming communities.

Biotechnological innovation should be strategically strengthened through genomics, molecular breeding, gene-editing technologies, microbial biotechnology, biofertilizers, biopesticides, advanced diagnostics, and climate-resilient genetic improvement. Such innovations should be accompanied by robust biosafety, biosecurity, ecological-risk assessment, regulatory oversight, ethical governance, and scientifically grounded public communication. Research institutions should prioritize technologies that generate measurable improvements in resource efficiency, crop resilience, nutritional quality, environmental safety, and long-term ecosystem stability rather than technological novelty alone.

Veterinary science should increasingly emphasize preventive medicine, population health, epidemiological surveillance, vaccination, biosecurity, precision livestock production, animal nutrition, welfare assessment, antimicrobial stewardship, and early detection of infectious and emerging diseases. Integrated surveillance platforms connecting veterinary, agricultural, environmental, and public-health information should be developed to strengthen preparedness for zoonotic diseases, antimicrobial resistance, foodborne hazards, and climate-sensitive health threats. The One Health framework should consequently become an operational principle for research design, surveillance, education, policy development, and interdisciplinary intervention.

Climate adaptation and biodiversity conservation should be embedded within agricultural planning through diversified production systems, soil-health restoration, water-conservation strategies, integrated pest management, agroecological practices, ecosystem restoration, and climate-smart technologies. Resource optimization should be evaluated not solely through

short-term efficiency indicators but through life-cycle sustainability, ecological thresholds, resilience, and intergenerational environmental responsibility. Greater attention should also be directed toward circular agricultural systems that reduce waste, recover nutrients, recycle biomass, and minimize environmental contamination.

The agricultural and veterinary education should be strengthened through interdisciplinary curricula integrating biotechnology, digital agriculture, epidemiology, environmental sciences, data analytics, One Health, ethics, sustainability, and evidence-based decision-making. Extension services and rural innovation networks should facilitate translation of scientific discoveries into practical and economically viable applications, particularly for smallholder and resource-constrained producers. International scientific collaboration, standardized data systems, implementation research, and equitable access to innovation should be expanded to reduce technological disparities. Collectively, these recommendations can support the emergence of resilient, intelligent, sustainable, ethically governed, and scientifically integrated agricultural and veterinary systems capable of safeguarding food security, animal and human health, ecological integrity, and long-term rural prosperity.

REFERENCES

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food and agriculture 2024: value-driven transformation of agrifood systems. Rome: FAO; 2024.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food and agriculture 2023: revealing the true cost of food to transform agrifood systems. Rome: FAO; 2023.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food security and nutrition in the world 2024. Rome: FAO; 2024.
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food and agriculture 2022: leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome: FAO; 2022.
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food and agriculture 2021: making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Rome: FAO; 2021.
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of the world's land and water resources for food and agriculture 2021. Rome: FAO; 2021.
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of the world's forests 2024. Rome: FAO; 2024.
8. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of the world's biodiversity for food and agriculture. Rome: FAO; 2019.
9. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global assessment of soil pollution. Rome: FAO; 2021.
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The future of food and agriculture: drivers and triggers for transformation. Rome: FAO; 2022.
11. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The future of food and agriculture: alternative pathways to 2050. Rome: FAO; 2018.
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Climate change and food security: risks and responses. Rome: FAO; 2016.
13. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture 2020: overcoming the challenges of water for food and agriculture. Rome: FAO; 2020.
14. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Agricultural Commodity Markets 2024. Rome: FAO; 2024.
15. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Rome: FAO; 2024.
16. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of the World's Animal Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome: FAO; 2015.
17. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global report on the state of dietary diversity. Rome: FAO; 2024.

18. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Sustainable agricultural mechanization: a framework for Africa. Rome: FAO; 2018.
19. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Digital technologies in agriculture and rural areas: status report. Rome: FAO; 2019.
20. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Digital agriculture transformation: accelerating agricultural innovation. Rome: FAO; 2022.
21. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture 2019: moving forward on food loss and waste reduction. Rome: FAO; 2019.
22. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: FAO; 2013.
23. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Livestock and agroecology: practical options for diversification and integration. Rome: FAO; 2019.
24. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems. Rome: FAO; 2021.
25. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The 10 elements of agroecology: guiding the transition to sustainable food and agricultural systems. Rome: FAO; 2018.
26. United Nations Environment Programme. Making peace with nature: a scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi: UNEP; 2021.
27. United Nations Environment Programme. Global chemicals outlook II: from legacies to innovative solutions. Nairobi: UNEP; 2019.
28. United Nations Environment Programme. Bracing for superbugs: strengthening environmental action in the One Health response to antimicrobial resistance. Nairobi: UNEP; 2023.
29. United Nations Environment Programme. Global environment outlook 6: healthy planet, healthy people. Cambridge: Cambridge University Press; 2019.
30. United Nations Environment Programme. Global resources outlook 2024: bend the trend. Nairobi: UNEP; 2024.
31. World Health Organization. One Health Joint Plan of Action 2022–2026. Geneva: WHO; 2022.
32. World Health Organization. One Health high-level expert panel: One Health definition and principles. Geneva: WHO; 2021.
33. World Health Organization. One Health priority research agenda for antimicrobial resistance. Geneva: WHO; 2023.
34. World Health Organization. Global action plan on antimicrobial resistance. Geneva: WHO; 2015.
35. World Health Organization. WHO guidelines on use of medically important antimicrobials in food-producing animals. Geneva: WHO; 2017.
36. World Health Organization. Global antimicrobial resistance and use surveillance system report 2024. Geneva: WHO; 2024.
37. World Health Organization. Global burden of foodborne diseases. Geneva: WHO; 2015.
38. World Health Organization. Food safety and zoonotic diseases: One Health approach. Geneva: WHO; 2023.
39. World Health Organization. Global report on antimicrobial resistance and surveillance. Geneva: WHO; 2024.
40. World Organisation for Animal Health. Terrestrial animal health code. Paris: WOAH; 2024.
41. World Organisation for Animal Health. Aquatic animal health code. Paris: WOAH; 2024.
42. World Organisation for Animal Health. Annual report on antimicrobial agents intended for use in animals. Paris: WOAH; 2023.
43. World Organisation for Animal Health. One Health and animal health: global strategic framework. Paris: WOAH; 2022.
44. World Organisation for Animal Health. Animal health and welfare: global priorities and standards. Paris: WOAH; 2023.
45. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press; 2022.

46. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: mitigation of climate change. Cambridge: Cambridge University Press; 2022.
47. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2023: synthesis report. Geneva: IPCC; 2023.
48. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change and land. Geneva: IPCC; 2019.
49. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Bonn: IPBES; 2019.
50. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Assessment report on the diverse values and valuation of nature. Bonn: IPBES; 2022.
51. Pretty J. New opportunities for the redesign of agricultural and food systems. Agric Hum Values. 2020;37:629-630.
52. Pretty J, Benton TG, Bharucha ZP, Dicks LV, Flora CB, Godfray HCJ, et al. Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. Nat Sustain. 2018;1:441-446.
53. Rockström J, Edenhofer O, Gaertner J, DeClerck F. Planet-proofing the global food system. Nat Food. 2020;1:3-5.
54. Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, et al. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Lancet. 2019;393:447-492.
55. Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, Wiebe K, Bodirsky BL, Lassaletta L, et al. Options for keeping the food system within environmental limits. Nature. 2018;562:519-525.
56. Clark MA, Domingo NGG, Colgan K, Thakrar SK, Tilman D, Lynch J, et al. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. Science. 2020;370:705-708.
57. Benton TG, Bieg C, Harwatt H, Pudasaini R, Wellesley L. Food system impacts on biodiversity loss. Chatham House Research Paper. London: Royal Institute of International Affairs; 2021.
58. Tilman D, Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health. Nature. 2014;515:518-522.
59. Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, et al. Solutions for a cultivated planet. Nature. 2011;478:337-342.
60. Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, Muir JF, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science. 2010;327:812-818.
61. Cassman KG. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proc Natl Acad Sci USA. 1999;96:5952-5959.
62. Mueller ND, Gerber JS, Johnston M, Ray DK, Ramankutty N, Foley JA. Closing yield gaps through nutrient and water management. Nature. 2012;490:254-257.
63. van Ittersum MK, Cassman KG, Grassini P, Wolf J, Tittonell P, Hochman Z. Yield gap analysis: from concept to application. Field Crops Res. 2013;143:4-16.
64. Lobell DB, Cassman KG, Field CB. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. Annu Rev Environ Resour. 2009;34:179-204.
65. Pretty J, Bharucha ZP. Sustainable intensification in agricultural systems. Ann Bot. 2014;114:1571-1596.
66. Bommarco R, Kleijn D, Potts SG. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. Trends Ecol Evol. 2013;28:230-238.
67. Tscharntke T, Clough Y, Wanger TC, Jackson L, Motzke I, Perfecto I, et al. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. Biol Conserv. 2012;151:53-59.
68. Altieri MA. Agroecology: the science of sustainable agriculture. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 1995.
69. Gliessman SR. Agroecology: the ecology of sustainable food systems. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2015.
70. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science. 2004;304:1623-1627.

71. Lal R. Regenerative agriculture for food and climate. J Soil Water Conserv. 2020;75:123A-124A.
72. Lehmann J, Bossio DA, Kögel-Knabner I, Rillig MC. The concept and future prospects of soil health. Nat Rev Earth Environ. 2020;1:544-553.
73. Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, De Deyn G, de Goede R, et al. Soil quality: a critical review. Soil Biol Biochem. 2018;120:105-125.
74. van der Heijden MGA, Bardgett RD, van Straalen NM. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. Ecol Lett. 2008;11:296-310.
75. Fierer N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. Nat Rev Microbiol. 2017;15:579-590.
76. Jansson JK, Hofmockel KS. Soil microbiomes and climate change. Nat Rev Microbiol. 2020;18:35-46.
77. Trivedi P, Leach JE, Tringe SG, Sa T, Singh BK. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. Nat Rev Microbiol. 2020;18:607-621.
78. Compant S, Samad A, Faist H, Sessitsch A. A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application. J Adv Res. 2019;19:29-37.
79. Isbell F, Calcagno V, Hector A, Connolly J, Harpole WS, Reich PB, et al. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. Nature. 2017;548:199-202.
80. Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, et al. Biodiversity loss and its impact on humanity. Nature. 2012;486:59-67.
81. IPBES. Thematic assessment report on pollinators, pollination and food production. Bonn: IPBES; 2016.
82. Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. Trends Ecol Evol. 2010;25:345-353.
83. Kremen C, Merenlender AM. Landscapes that work for biodiversity and people. Science. 2018;362:eaau6020.
84. Zhang C, Kovacs JM. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precis Agric. 2012;13:693-712.
85. Mulla DJ. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. Biosyst Eng. 2013;114:358-371.
86. Gebbers R, Adamchuk VI. Precision agriculture and food security. Science. 2010;327:828-831.
87. Wolfert S, Ge L, Verdouw C, Bogaardt MJ. Big data in smart farming: a review. Agric Syst. 2017;153:69-80.
88. Klerkx L, Jakku E, Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0. NJAS Wageningen J Life Sci. 2019;90-91:100315.
89. Klerkx L, Rose D. Dealing with the game-changing technologies of agriculture 4.0: how do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? Glob Food Secur. 2020;24:100347.
90. Liakos KG, Busato P, Moshou D, Pearson S, Bochtis D. Machine learning in agriculture: a review. Sensors. 2018;18:2674.
91. Kamilaris A, Prenafeta-Boldú FX. Deep learning in agriculture: a survey. Comput Electron Agric. 2018;147:70-90.
92. Benos L, Tagarakis AC, Dolias G, Berruto R, Kateris D, Bochtis D. Machine learning in agriculture: a comprehensive updated review. Sensors. 2021;21:3758.
93. Saiz-Rubio V, Rovira-Más F. From smart farming towards agriculture 5.0: a review on crop data management. Agronomy. 2020;10:207.
94. Lioutas ED, Charatsari C, De Rosa M. Digitalization of agriculture: a way to solve the food problem or a trolley dilemma? Technol Soc. 2021;67:101744.
95. Carolan M. Automated agrifood futures: robotics, labor and the distributive politics of digital agriculture. J Rural Stud. 2020;79:1-9.
96. Zhang Q. Precision agriculture technology for crop farming. Boca Raton: CRC Press; 2016.

97. Lowenberg-DeBoer J, Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption. Agron J. 2019;111:1552-1569.
98. Finger R, Swinton SM, El Benni N, Walter A. Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. Annu Rev Resour Econ. 2019;11:313-335.
99. Bongiovanni R, Lowenberg-Deboer J. Precision agriculture and sustainability. Precis Agric. 2004;5:359-387.
100. Ronald PC, Comai L. Gene editing and crop improvement. Nat Rev Genet. 2019;20:1-2.
101. Jaganathan D, Ramasamy K, Sellamuthu G, Jayabalan S, Venkataraman G. CRISPR for crop improvement: an update review. Front Plant Sci. 2018;9:985.
102. Chen K, Wang Y, Zhang R, Zhang H, Gao C. CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. Annu Rev Plant Biol. 2019;70:667-697.
103. Zaidi SS, Mahfouz MM, Mansoor S. CRISPR-Cpf1: a new tool for plant genome editing. Trends Plant Sci. 2018;23:550-553.
104. Hickey LT, Hafeez AN, Robinson H, Jackson SA, Leal-Bertioli SCM, Tester M, et al. Breeding crops to feed 10 billion. Nat Biotechnol. 2019;37:744-754.
105. Bailey-Serres J, Parker JE, Ainsworth EA, Oldroyd GED, Schroeder JI. Genetic strategies for improving crop yields. Nature. 2019;575:109-118.
106. Qaim M. Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agricultural development. Appl Econ Perspect Policy. 2020;42:129-150.
107. Brookes G, Barfoot P. Environmental impacts of genetically modified agricultural crops: 1996-2018. GM Crops Food. 2020;11:215-241.
108. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Genetically engineered crops: experiences and prospects. Washington DC: National Academies Press; 2016.
109. Herrero M, Thornton PK, Mason-D'Croz D, Palmer J, Benton TG, Bodirsky BL, et al. Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system. Nat Food. 2021;2:266-272.
110. Thornton PK. Livestock production: recent trends, future prospects. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2010;365:2853-2867.
111. Herrero M, Thornton PK, Gerber P, Reid RS. Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. Curr Opin Environ Sustain. 2009;1:111-120.
112. Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, de Haan C. Livestock's long shadow: environmental issues and options. Rome: FAO; 2006.
113. Mottet A, Steinfeld H. Cars or livestock? The global value of livestock. Revue Scientifique et Technique. 2018;37:61-73.
114. Grandin T. Animal welfare and society concerns finding the missing link. Meat Sci. 2014;98:461-469.
115. Fraser D. Understanding animal welfare. Acta Vet Scand. 2008;50 Suppl 1:S1.
116. Mellor DJ. Updating animal welfare thinking: moving beyond the “Five Freedoms” towards “A Life Worth Living”. Animals. 2016;6:21.
117. Berckmans D. General introduction to precision livestock farming. Anim Front. 2017;7:6-11.
118. Neethirajan S. The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. Sens Biosensing Res. 2020;29:100367.
119. Halachmi I, Guarino M, Bewley J, Pastell M. Smart animal agriculture: application of real-time sensors to improve animal well-being and production. Annu Rev Anim Biosci. 2019;7:403-425.
120. Benjamin M, Yik S. Precision livestock farming in swine welfare: a review. Animals. 2019;9:523.
121. Van Boeckel TP, Brower C, Gilbert M, Grenfell BT, Levin SA, Robinson TP, et al. Global trends in antimicrobial use in food animals. Proc Natl Acad Sci USA. 2015;112:5649-5654.
122. Van Boeckel TP, Pires J, Silvester R, Zhao C, Song J, Criscuolo NG, et al. Global trends in antimicrobial resistance in animals in low- and middle-income countries. Science. 2019;365:eaaw1944.
123. Tang KL, Caffrey NP, Nóbrega DB, Cork SC, Ronksley PE, Barkema HW, et al. Restricting antibiotic use in food-producing animals and its associations with antibiotic resistance in food-producing animals and humans. Lancet Planet Health. 2017;1:e316-e327.

124. Robinson TP, Bu DP, Carrique-Mas J, Fèvre EM, Gilbert M, Grace D, et al. Antibiotic resistance is the quintessential One Health issue. Trans R Soc Trop Med Hyg. 2016;110:377-380.
125. McEwen SA, Collignon PJ. Antimicrobial resistance: a One Health perspective. Microbiol Spectr. 2018;6:ARBA-0009-2017.
126. Queenan K, Häsler B, Rushton J. A One Health approach to antimicrobial resistance surveillance: is it possible? Vet Rec. 2016;178:239-241.
127. Destoumieux-Garzón D, Mavingui P, Boetsch G, Boissier J, Darriet F, Duboz P, et al. The One Health concept: 10 years old and a long road ahead. Front Vet Sci. 2018;5:14.
128. Mackenzie JS, Jeggo M. The One Health approach—why is it so important? Trop Med Infect Dis. 2019;4:88.
129. Amuasi JH, Lucas T, Horton R, Winkler AS. Reconnecting for our future: the Lancet One Health Commission. Lancet. 2020;395:1469-1471.
130. Lerner H, Berg C. The concept of health in One Health and some practical implications for research and education: what is One Health? Infect Ecol Epidemiol. 2017;7:1300006.

DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN PHARMACEUTICAL MANUFACTURING

Meenatchi.S
Devadharshini.R
Swathi.R
Keerthana. V
Kishore. R
Hari Nandhini. A
Bharath Institute Of Higher Education And Research , chennai, India.
Faculty Of Pharmacy

Abstract:
Digital Twin Technology in Pharmaceutical Manufacturing: Revolutionizing Process Optimization and Quality Control

Digital Twin technology is an emerging digital engineering approach that creates a virtual representation of a physical manufacturing process, equipment, or production system and continuously updates it using real-time data. In pharmaceutical manufacturing, Digital Twins have the potential to improve process understanding, product quality, operational efficiency, and regulatory compliance. By integrating sensors, Internet of Things (IoT), artificial intelligence, machine learning, and process analytical technology (PAT), Digital Twins can monitor critical process parameters and predict changes in manufacturing performance.

The technology enables real-time simulation and optimization of pharmaceutical processes such as mixing, granulation, drying, tablet compression, coating, and sterile manufacturing. Predictive models can identify potential process deviations, equipment failures, and quality-related issues before they affect the final product. This supports predictive maintenance, reduces production downtime, minimizes material waste, and enhances consistent product quality. Digital Twins can also contribute to Quality by Design (QbD) by providing deeper insights into the relationship between process parameters and critical quality attributes.

Despite these advantages, implementation involves challenges including high initial investment, data integration, cybersecurity, model validation, data quality, and regulatory acceptance. With continued advancements in artificial intelligence, cloud computing, and real-time process monitoring, Digital Twin technology is expected to become an important component of Pharma 4.0. Its integration into pharmaceutical manufacturing can support more efficient, flexible, reliable, and data-driven production while maintaining high standards of product quality and patient safety.

Key Words:
Digital Twin; Pharmaceutical Manufacturing; Pharma 4.0; Artificial Intelligence; Machine Learning; Internet of Things (IoT); Process Analytical Technology

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

EVALUATION OF THE IN VITRO ANTIOXIDANT PARAMETERS OF *Cymbopogon citratus* (LEMONGRASS) METHANOL EXTRACT

Okechukwu, C. O.
Okocha, B. I.
Department of Science Laboratory Technology, Federal Polytechnic Ekowe, Yenagoa, Bayelsa State, Nigeria

ABSTRACT
This study evaluated the in vitro antioxidant activity of methanol leaf extract of Cymbopogon citratus (lemongrass) using three complementary assays and ascorbic acid as reference antioxidant. Fresh leaves collected from Owele Forest, Umuaga, Udi Local Government Area, Enugu State, Nigeria, were shade-dried, pulverized and macerated in methanol. From 513.36 g of dried powder, 78.55 g of extract was recovered, corresponding to a 15.301% yield. DPPH radical-scavenging activity of the extract increased from 91.46% at 0.2 mg/mL to 95.96% at 1.0 mg/mL, whereas ascorbic acid ranged from 92.13% to 94.87%. The extract and ascorbic acid produced DPPH IC50 values of 0.7591 and 0.7531, with R^2 values of 0.8304 and 0.8262, respectively. In the FRAP assay, the extract showed concentration-dependent reducing activity with an IC50 of 0.7231 and R^2 of 0.9807, compared with 0.7099 and 0.7630 for ascorbic acid. FRAP absorbance for the extract increased from 0.493 ± 0.093 at 0.2 mg/mL to 1.464 ± 0.133 at 1.0 mg/mL, while the standard ranged from 1.420 ± 0.360 to 1.379 ± 0.359. In the phosphomolybdenum total antioxidant capacity assay, the extract recorded IC50 = 0.7322 and R^2 = 0.8293, compared with IC50 = 0.7633 and R^2 = 0.9178 for ascorbic acid. Extract absorbance ranged from 0.724 ± 0.113 to 0.758 ± 0.051, whereas ascorbic acid ranged from 0.909 ± 0.127 to 1.612 ± 0.395. Overall, the extract demonstrated substantial in vitro antioxidant activity broadly comparable in potency to ascorbic acid, although concentration-response patterns varied among assays.
Keywords: Cymbopogon citratus; lemongrass; antioxidant activity; DPPH; FRAP; total antioxidant capacity; methanol extract

1. INTRODUCTION
Oxidative stress develops when the production of reactive oxygen and nitrogen species exceeds the capacity of endogenous antioxidant defence systems, resulting in oxidative modification of lipids, proteins and nucleic acids. Persistent oxidative stress is associated with the pathophysiology of cardiovascular disorders, diabetes, cancer, neurodegenerative diseases and ageing (Chaudhary et al., 2023; Nepovimova et al., 2023). Antioxidants limit these reactions by scavenging radicals, donating electrons or hydrogen atoms, chelating pro-oxidant metals and interrupting oxidative chain reactions.

Although synthetic antioxidants such as butylated hydroxyanisole, butylated hydroxytoluene and tert-butylhydroquinone have been extensively employed in food and related industries, toxicological concerns have intensified interest in natural plant-derived antioxidant systems (Esazadeh et al., 2024). Medicinal and culinary plants rich in phenolics, flavonoids and terpenoids therefore remain important candidates for antioxidant discovery and development.

Cymbopogon citratus (DC.) Stapf, commonly known as lemongrass, is an aromatic perennial grass widely cultivated in tropical regions and used traditionally as a beverage and remedy for fever, digestive complaints and other ailments (Umar et al., 2016). Its leaves contain bioactive constituents including citral, flavonoids, phenolic acids and terpenoids that have been associated with antioxidant and other biological activities (Tazi et al., 2024). Previous

investigations have demonstrated antioxidant activity in essential oils and solvent extracts of C. citratus; however, antioxidant behaviour is assay-dependent because different methods assess different reaction mechanisms.

Accordingly, a multi-assay approach provides a stronger characterization than reliance on a single antioxidant test. The present study evaluated the in vitro antioxidant activity of methanol extract of C. citratus leaves sourced from Enugu State, Nigeria, using DPPH radical scavenging, ferric reducing antioxidant power (FRAP) and phosphomolybdenum total antioxidant capacity (TAC) assays, with ascorbic acid as the reference standard.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Plant Material and Extraction

Fresh leaves of Cymbopogon citratus were collected from a farm in Owele Forest, Umuaga, Udi Local Government Area, Enugu State, Nigeria. The leaves were sorted and shade-dried at room temperature for four weeks before pulverization. A total of 513.36 g of powdered material was macerated in 2.5 L of analytical-grade methanol for 72 h at room temperature with intermittent shaking. The mixture was filtered through muslin cloth and Whatman No. 1 filter paper. The filtrate was concentrated at 40°C and air-dried to constant weight. Percentage yield was calculated as the weight of recovered extract divided by the weight of dried plant material, multiplied by 100.

2.2 DPPH Radical Scavenging Assay

DPPH radical-scavenging activity was determined using a spectrophotometric method adapted from established procedures (Boakye-Yiadom et al., 2022). DPPH solution was prepared in methanol and reacted with graded concentrations (0.2–1.0 mg/mL) of the extract or ascorbic acid. After incubation in the dark for 30 min at room temperature, absorbance was measured at 517 nm. Percentage inhibition was calculated as $[(A_{control} - A_{sample})/A_{control}] \times 100$. Measurements were performed in triplicate.

2.3 Ferric Reducing Antioxidant Power Assay

FRAP was assessed using a reagent containing TPTZ, sodium acetate buffer and ferric chloride. Two millilitres of extract or ascorbic acid solution were combined with 0.5 mL of FRAP reagent, incubated and allowed to cool, after which absorbance was measured at 593 nm. Increasing absorbance was interpreted as increasing ferric reducing power (Benzie & Strain, 1996).

2.4 Total Antioxidant Capacity Assay

Total antioxidant capacity was evaluated by the phosphomolybdenum method (Prieto et al., 1999). The reaction reagent contained sulphuric acid, sodium phosphate and ammonium molybdate. Extract and ascorbic acid solutions were reacted with the reagent, incubated at 95°C for 90 min, cooled to room temperature and read at 695 nm against a reagent blank.

2.5 Data Interpretation

Antioxidant responses were compared across concentrations using the observed assay values, half-maximal inhibitory/concentration-response indices (IC50) and coefficients of determination (R^2) reported for the extract and ascorbic acid.

3. RESULTS

3.1 Percentage Yield

Extraction of 513.36 g of dried C. citratus leaf powder yielded 78.55 g of concentrated methanol extract, representing a percentage yield of 15.301%.

Table 1. Percentage yield of the methanol extract of C. citratus leaves

Dried plant powder (g)	Extract obtained (g)	Yield (%)
513.36	78.55	15.301

3.2 DPPH Radical Scavenging Activity

The extract demonstrated high DPPH radical-scavenging activity across all concentrations, increasing from 91.46% at 0.2 mg/mL to 95.96% at 1.0 mg/mL. Ascorbic acid ranged from 92.13% to 94.87%. The extract showed IC50 = 0.7591 and R^2 = 0.8304, compared with IC50 = 0.7531 and R^2 = 0.8262 for ascorbic acid.

Table 2. DPPH radical-scavenging activity of lemongrass extract and ascorbic acid

Conc. (mg/mL)	Extract absorbance	Extract inhibition (%)	Ascorbic acid absorbance	Ascorbic acid inhibition (%)
0.2	0.076	91.46	0.070	92.13
0.4	0.074	91.69	0.060	93.30
0.6	0.064	92.81	0.046	94.83
0.8	0.061	93.15	0.046	94.79
1.0	0.036	95.96	0.046	94.87

3.3 Ferric Reducing Antioxidant Power

The ferric reducing activity of the extract increased with concentration. The extract had an IC50 of 0.7231 and R^2 of 0.9807, while ascorbic acid recorded IC50 = 0.7099 and R^2 = 0.7630.

Table 3. FRAP absorbance (593 nm) of lemongrass extract and ascorbic acid

Conc. (mg/mL)	Lemongrass extract (Mean ± SD)	Ascorbic acid (Mean ± SD)
0.2	0.493 ± 0.093	1.420 ± 0.360
0.4	0.867 ± 0.324	1.611 ± 0.316
0.6	1.045 ± 0.497	1.825 ± 0.036
0.8	1.224 ± 0.304	1.170 ± 0.021
1.0	1.464 ± 0.133	1.379 ± 0.359

3.4 Total Antioxidant Capacity

In the phosphomolybdenum assay, the extract recorded IC50 = 0.7322 and R^2 = 0.8293, compared with IC50 = 0.7633 and R^2 = 0.9178 for ascorbic acid.

Table 4. Total antioxidant capacity absorbance (695 nm) of lemongrass extract and ascorbic acid

Conc. (mg/mL)	Lemongrass extract (Mean ± SD)	Ascorbic acid (Mean ± SD)
0.2	0.724 ± 0.113	0.909 ± 0.127
0.4	0.713 ± 0.012	1.357 ± 0.004
0.6	0.801 ± 0.032	1.721 ± 0.044
0.8	0.731 ± 0.057	1.913 ± 0.000
1.0	0.758 ± 0.051	1.612 ± 0.395

4. DISCUSSION

The 15.301% extraction yield indicates that methanol recovered an appreciable fraction of soluble constituents from C. citratus leaves under the extraction conditions employed. Solvent polarity, extraction time, plant-to-solvent ratio and the chemical composition of the plant material can influence extract yield; consequently, the value obtained provides an important baseline for subsequent antioxidant characterization.

The DPPH results demonstrated consistently high radical-scavenging activity, with the extract producing 91.46–95.96% inhibition across 0.2–1.0 mg/mL. Its IC50 (0.7591) was very close to that of ascorbic acid (0.7531), while the R^2 values were similarly close (0.8304 versus 0.8262). This pattern indicates substantial radical-scavenging potency and is consistent with reports that C. citratus contains phenolic, flavonoid and related constituents capable of hydrogen or electron donation (Wang et al., 2022; Tazi et al., 2024).

The FRAP findings further demonstrated antioxidant reducing capacity. Although the extract and ascorbic acid had similar IC50 values (0.7231 and 0.7099, respectively), the extract showed a stronger concentration-response relationship ($R^2 = 0.9807$) than the standard ($R^2 = 0.7630$). The extract absorbance rose progressively from 0.493 ± 0.093 to 1.464 ± 0.133 as concentration increased, supporting a marked concentration-dependent ferric reducing response.

In the TAC assay, the extract had an IC50 of 0.7322 compared with 0.7633 for ascorbic acid, while the corresponding R^2 values were 0.8293 and 0.9178. Unlike the more progressive FRAP response, TAC absorbance of the crude extract fluctuated across the tested concentrations. Such assay-dependent behaviour is plausible because crude botanical extracts contain multiple constituents whose relative contributions differ according to the chemical mechanism measured by each assay (Pasqualetti et al., 2021).

Taken together, the DPPH, FRAP and TAC findings demonstrate that C. citratus methanol extract possesses measurable antioxidant activity across complementary mechanisms. Its reported IC50 values were broadly comparable with those of ascorbic acid in all three assays, while differences in R^2 and raw absorbance patterns emphasize that the extract does not behave identically to a purified reference antioxidant.

5. CONCLUSION

The methanol leaf extract of Cymbopogon citratus exhibited substantial in vitro antioxidant activity in the DPPH, FRAP and phosphomolybdenum TAC assays. The extract showed high DPPH radical-scavenging percentages and IC50 values broadly comparable with ascorbic acid across all three assays. The strong FRAP concentration-response relationship further indicates pronounced reducing capacity. These findings support the antioxidant potential of C. citratus leaves and justify further phytochemical characterization and biological evaluation.

6. RECOMMENDATIONS

Further work should quantify total phenolic and flavonoid contents, identify the major antioxidant constituents using appropriate chromatographic and spectrometric techniques, compare methanol with aqueous and ethanol extraction, incorporate additional antioxidant assays such as ABTS, and undertake in vivo studies to determine whether the observed in vitro activity translates into biological antioxidant effects.

REFERENCES

Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. Analytical Biochemistry, 239(1), 70–76.

Chaudhary, P., Janmeda, P., Docea, A. O., Yeskaliyeva, B., Abdull Razis, A. F., Modu, B., Calina, D., & Sharifi-Rad, J. (2023). Oxidative stress, free radicals and antioxidants: Potential crosstalk in the pathophysiology of human diseases. Frontiers in Chemistry, 11, 1158198.

Esazadeh, K., Ezzati Nazhad Dolatabadi, J., Andishmand, H., Mohammadzadeh-Aghdash, H., Mahmoudpour, M., Naemi Kermanshahi, M., & Roosta, Y. (2024). Cytotoxic and genotoxic effects of tert-butylhydroquinone, butylated hydroxyanisole and propyl gallate as synthetic food antioxidants. Food Science & Nutrition, 12, 7004–7016.

Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2023). Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: Chronic diseases and aging. Archives of Toxicology, 97, 2499–2574.

Pasqualetti, V., Locato, V., Fanali, C., Mulinacci, N., Cimini, S., Morgia, A. M., Pasqua, G., & De Gara, L. (2021). Comparison between in vitro chemical and ex vivo biological assays to evaluate antioxidant capacity of botanical extracts. Antioxidants, 10(7), 1136.

Prieto, P., Pineda, M., & Aguilar, M. (1999). Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex. Analytical Biochemistry, 269(2), 337–341.

Tazi, A., Zinedine, A., Rocha, J. M., & Errachidi, F. (2024). Review on the pharmacological properties of lemongrass (Cymbopogon citratus) as a promising source of bioactive compounds. Pharmacological Research - Natural Products, 3, 100046.

Umar, M., Mohammed, I. B., Oko, J. O., Tafinta, I. Y., Aliko, A. A., & Jobbi, D. Y. (2016). Phytochemical analysis and antimicrobial effect of lemon grass (Cymbopogon citratus) obtained from Zaria, Kaduna State, Nigeria. Journal of Complementary and Alternative Medical Research, 1(2), 1–8.

Wang, H., Zhang, R., Zhang, K., Chen, X., & Zhang, Y. (2022). Antioxidant, hypoglycemic and molecular docking studies of methanolic extract, fractions and isolated compounds from aerial parts of Cymbopogon citratus (DC.) Stapf. Molecules, 27(9), 2858.

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

EFFECTS OF *CYMBOPOGON CITRATUS* (LEMONGRASS) METHANOL EXTRACT ON LIVER FUNCTION AND LACTATE DEHYDROGENASE ACTIVITY IN ALBINO RATS

Okechukwu, C. O.
Tawariowei, M. A.
Department of Science Laboratory Technology, Federal Polytechnic Ekowe, Yenagoa, Bayelsa State, Nigeria

Abstract
This study evaluated the effects of methanol leaf extract of Cymbopogon citratus on selected liver-function indices and lactate dehydrogenase (LDH) activity in Plasmodium berghei-infected albino rats. Twenty rats were assigned to four groups (n=5): normal control, infected untreated control, infected standard-drug group, and infected group treated with 200 mg/kg extract. Methanol extraction of 513.36 g dried leaf powder yielded 78.55 g extract, representing 15.30%. Hemagglutination/hemagglutination-inhibition testing showed no reaction in Groups 1 and 3 at the back (B), head (H), right hand (RH), T area, or left hand (LH). Group 2 showed ++, +, ++, +, and ++ reactions at B, H, RH, T, and LH, respectively, whereas Group 4 showed only a + reaction at T. Mean alkaline phosphatase values were 28.00±2.35, 27.00±0.71, 27.20±2.68, and 28.00±3.24 for the normal control, positive control, standard drug, and extract groups, respectively. Corresponding alanine aminotransferase values were 10.20±1.30, 9.80±1.30, 10.60±2.07, and 9.60±1.14. No significant differences occurred in either enzyme. LDH values were 22.31±3.99, 32.79±9.11, 42.97±8.82, and 36.17±11.10, respectively, with an overall mean of 33.56±11.03. Duncan's test yielded $p=0.074$ and $p=0.096$ for homogeneous subsets, indicating no significant LDH difference at $p<0.05$. The findings indicate that, under the tested conditions, C. citratus methanol extract did not significantly alter the measured hepatic enzymes or LDH activity, although further dose-response, histopathological, and broader biochemical investigations are warranted. These observations suggest a relatively low detectable biochemical effect at the administered dose and treatment duration, but the numerical elevation in LDH warrants cautious interpretation and confirmation using larger samples.
Keywords: Cymbopogon citratus; lemongrass; liver function; alkaline phosphatase; alanine aminotransferase; lactate dehydrogenase; Plasmodium berghei

1. Introduction

Medicinal plants remain important sources of bioactive compounds used in traditional healthcare and increasingly investigated for pharmacological efficacy and safety. Cymbopogon citratus (DC.) Stapf (lemongrass), a perennial aromatic grass of the family Poaceae, is widely cultivated in tropical and subtropical regions and is used as a culinary herb, beverage, and traditional remedy. Its biological activities have been associated with phytochemicals and volatile constituents, particularly citral, and experimental evidence has described antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, metabolic, and hepatoprotective properties (Tiwari et al., 2020; Wang et al., 2022).

The liver is a major metabolic and detoxification organ and is therefore particularly vulnerable to xenobiotic-induced injury. Serum alanine aminotransferase (ALT) and alkaline phosphatase (ALP) are routinely used as biochemical indicators of hepatocellular and hepatobiliary disturbances, although they do not independently represent all dimensions of hepatic function. Lactate dehydrogenase (LDH), a ubiquitous intracellular enzyme involved in anaerobic glycolysis, may also increase in circulation following loss of cellular membrane integrity and

tissue injury. Consequently, simultaneous assessment of hepatic enzymes and LDH can provide useful biochemical information on the physiological response to an administered plant extract. Lemongrass is widely consumed and has been reported to possess hepatoprotective activity in experimental systems (Adeneye & Agbaje, 2020; Ekpenyong & Akpan, 2020). Nevertheless, biological responses to medicinal plants may vary with extraction solvent, dose, exposure duration, experimental condition, and disease status. Safety evaluation of methanol extracts is therefore necessary, especially where such extracts are being investigated in infected experimental animals. This study evaluated the effect of C. citratus methanol leaf extract on selected liver-function markers and serum LDH activity in P. berghei-infected albino rats.

2. Materials and Methods

2.1 Plant Material and Extract Preparation

Fresh C. citratus leaves were obtained from a farm in Igbogene area of Yenagoa, Bayelsa State, Nigeria. For administration, 1 g of the lemongrass extract was prepared with a surfactant reported during the practical as Tween 20 or a similar dissolving reagent, and distilled water was added to complete the preparation volume. The methanol extraction process produced 78.55 g of extract from 513.36 g of dried leaf powder.

2.2 Experimental Animals and Design

Twenty albino rats were divided into four groups of five animals each. Group 1 served as the normal control and received normal saline and feed. Group 2 was infected with P. berghei and remained untreated (positive control). Group 3 was infected and treated with the standard antimalarial regimen reported in the source study as artesunate (25 mg/kg body weight) and sulphadoxine-pyrimidine (1.25 mg/kg body weight). Group 4 was infected and treated with 200 mg/kg body weight of C. citratus methanol leaf extract. Animals in Groups 2–4 were inoculated intraperitoneally with 0.2 mL of P. berghei-parasitized erythrocytes. Infection was confirmed after 72 h, treatment lasted three days, and samples were collected after sacrifice on day 4 (Dacie & Lewis, 2011; Peters et al., 1975).

2.3 Determination of Parasitemia and HA/HI Reaction

Thin blood films were prepared from tail blood, fixed with absolute ethanol, stained with Giemsa, air-dried, and examined microscopically using the 100× objective as described by Dacie and Lewis (2011). The study also reported hemagglutination (HA) and hemagglutination-inhibition (HI) reactions qualitatively across designated test areas.

2.4 Biochemical Assays

ALT activity was assayed by the Reitman and Frankel (1957) method, based on colorimetric determination of pyruvate hydrazone at 540 nm. ALP activity was determined according to Englehardt (1970) using p-nitrophenylphosphate as substrate with absorbance measured at 405 nm. LDH activity was determined by the method of Wroblewski and LaDue (1955), based on the reduction of pyruvate to lactate coupled to NADH oxidation, with the decrease in absorbance monitored at 340 nm.

2.5 Statistical Interpretation

Results are presented as mean ± standard deviation where applicable. The source study reported Duncan's homogeneous-subset probabilities for LDH, with statistical significance interpreted at $p < 0.05$. Identical superscript letters in the ALP and ALT table indicate no significant difference among group means at the stated significance level.

3. Results

3.1 Methanol Extract Yield

Methanol extraction of 513.36 g of dried C. citratus leaf powder yielded 78.55 g of extract, corresponding to a percentage yield of 15.30%.

Table 1. Methanol extract yield of C. citratus leaves

Dried plant powder (g)	Extract obtained (g)	Percentage yield (%)
513.36	78.55	15.30

3.2 Hemagglutination and Hemagglutination-Inhibition Reactions

Groups 1 and 3 showed no detectable reaction at any test area. Group 2 showed the strongest overall response, with ++ reactions at B, RH, and LH and + reactions at H and T. Group 4 showed only a weak positive reaction (+) at T.

Table 2. HA/HI reactions across experimental groups

Group	B	H	RH	T	LH
1	00	00	00	00	00
2	++	+	++	+	++
3	00	00	00	00	00
4	00	00	00	+	00

Key: B = Back; H = Head; RH = Right Hand; T = T area; LH = Left Hand.

3.3 Effect of Extract on Serum ALP and ALT

Mean ALP values ranged from 27.00 ± 0.71 to 28.00 ± 3.24, while mean ALT values ranged from 9.60 ± 1.14 to 10.60 ± 2.07. The extract-treated group had an ALP value identical to the normal control (28.00) and the lowest numerical ALT value (9.60). All groups carried the same superscript, indicating no statistically significant differences in ALP or ALT.

Table 3. Effect of treatment on serum ALP and ALT levels

Experimental group	n	ALP (Mean ± SD)	ALT (Mean ± SD)
Normal control	5	28.00 ± 2.35^{a}	10.20 ± 1.30^{a}
Positive control	5	27.00 ± 0.71^{a}	9.80 ± 1.30^{a}
Standard drug	5	27.20 ± 2.68^{a}	10.60 ± 2.07^{a}
Extract	5	28.00 ± 3.24^{a}	9.60 ± 1.14^{a}

Values bearing the same superscript are not significantly different at the stated significance level.

3.4 Effect of Treatment on LDH Activity

The normal control recorded the lowest LDH activity (22.31 ± 3.99), whereas the standard-drug group recorded the highest value (42.97 ± 8.82). The positive-control and extract-treated groups recorded 32.79 ± 9.11 and 36.17 ± 11.10, respectively. The overall mean was 33.56 ± 11.03. Duncan's test yielded $p = 0.074$ and $p = 0.096$ for the homogeneous subsets; therefore, the observed group differences were not statistically significant at $p < 0.05$.

Table 4. Effect of treatment on LDH activity

Experimental group	n	LDH (Mean ± SD)
Normal control	5	22.31 ± 3.99
Positive control	5	32.79 ± 9.11
Standard drug	5	42.97 ± 8.82
Extract	5	36.17 ± 11.10
Total	20	33.56 ± 11.03

4. Discussion

The 15.30% extraction yield indicates that methanol recovered an appreciable fraction of soluble constituents from the dried C. citratus leaves. Extract yield is influenced by solvent polarity, particle size, extraction duration, temperature, moisture content, and the chemical composition of the plant material. The observed yield therefore provides a practical index of extractability under the conditions used in this study, although it does not by itself indicate the concentration or identity of individual bioactive constituents.

The qualitative HA/HI findings differentiated the experimental groups. The infected untreated group (Group 2) showed positive reactions at all assessed areas and the strongest reactions at B, RH, and LH, whereas the normal control and standard-drug groups showed no detectable reaction. The extract-treated group showed only a weak positive reaction at T. This pattern suggests a lower observable HA/HI response in the extract-treated group than in the infected untreated group. However, because the measurements were qualitative, mechanistic or inferential claims should be made cautiously until the observations are supported by quantitative assays and appropriate statistical testing.

The biochemical findings showed little variation in ALP and ALT across groups. ALP in the extract group (28.00 ± 3.24) was numerically identical to the normal control (28.00 ± 2.35), while ALT was slightly lower in the extract group (9.60 ± 1.14) than in the normal control (10.20 ± 1.30), positive control (9.80 ± 1.30), and standard-drug group (10.60 ± 2.07). The absence of significant increases in these enzymes suggests that the administered extract did not produce a detectable adverse alteration in the measured hepatic enzyme indices under the experimental conditions. This interpretation is broadly consistent with reports describing hepatoprotective or non-injurious biochemical effects of C. citratus in experimental models (Adeneye & Agbaje, 2020; Ekpenyong & Akpan, 2020).

LDH showed wider numerical dispersion than ALP and ALT. Activity increased from 22.31 ± 3.99 in the normal control to 36.17 ± 11.10 in the extract-treated group, while the standard-drug group had the highest mean value of 42.97 ± 8.82. Nevertheless, Duncan's test did not identify a statistically significant group effect at $p < 0.05$. The relatively large standard deviation in the extract group also indicates substantial within-group variability. Because LDH is not liver-specific and may originate from several tissues, the numerical elevation should not be interpreted as definitive evidence of hepatocellular injury without corroboration from additional biochemical markers and tissue histopathology.

Taken together, the ALP, ALT, and LDH findings indicate that the methanol extract did not significantly alter the selected biochemical indices at the tested dose and exposure period. The result is more appropriately interpreted as an absence of detectable biochemical toxicity within the measured endpoints than as proof of complete hepatic safety or hepatoprotection. A stronger safety conclusion would require dose-response evaluation, additional liver-function indices such as AST, bilirubin, albumin and total protein, and histological assessment of hepatic tissue.

5. Conclusion

Methanol extraction of C. citratus leaves produced a 15.30% yield. The extract-treated group showed only a weak HA/HI reaction at the T area, while the infected untreated group showed the most pronounced qualitative reactions. Administration of 200 mg/kg C. citratus methanol leaf extract did not significantly alter serum ALP or ALT, and the numerical differences observed in LDH were also not statistically significant at $p < 0.05$. Under the conditions of this study, the extract therefore produced no statistically detectable adverse alteration in the measured hepatic enzyme indices or LDH activity. Further work incorporating multiple doses, longer exposure periods, broader biochemical panels, and histopathological examination is required before definitive conclusions on hepatic safety or therapeutic efficacy can be drawn.

6. Recommendations

1. Dose-response studies should evaluate multiple extract concentrations and longer exposure periods.
2. Future studies should include AST, bilirubin, total protein, albumin, creatinine, urea, oxidative-stress indices, and other relevant biomarkers.
3. Histopathological examination of the liver and other major organs should be undertaken to complement biochemical findings and clarify the biological significance of changes in LDH.

References

Adeneye, A. A., & Agbaje, E. O. (2020). Hepatoprotective effects of aqueous leaf extract of Cymbopogon citratus (DC) Stapf on paracetamol-induced hepatotoxicity in rats. Journal of Ethnopharmacology, 258, 112890. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.112890

Dacie, J. V., & Lewis, S. M. (2011). Practical haematology (11th ed.). Churchill Livingstone/Elsevier.

Ekpenyong, C. E., & Akpan, E. E. (2020). Hepatoprotective and histopathological effects of lemongrass in experimental rats. Journal of Toxicology and Environmental Health, 6(2), 45–53.

Englehardt, A. (1970). Measurement of alkaline phosphatase activity. [Method cited in the source study; complete bibliographic details were not supplied in the original manuscript.]

Peters, W., Portus, J. H., & Robinson, B. L. (1975). The chemotherapy of rodent malaria, XXII: The value of drug-resistant strains of Plasmodium berghei in screening for blood schizontocidal activity. Annals of Tropical Medicine & Parasitology, 69(2), 155–171.

Reitman, S., & Frankel, S. (1957). A colorimetric method for the determination of serum glutamic oxalacetic and glutamic pyruvic transaminases. American Journal of Clinical Pathology, 28(1), 56–63.

Tiwari, N., Singh, A., & Verma, A. (2020). Traditional medicine systems and lemongrass. Journal of Ethnopharmacology, 263, 113234. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113234

Wang, L., Wang, Y., & Liang, Y. (2022). Nrf2 activation by citral. Free Radical Biology and Medicine, 180, 123–132. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.01.012

Wroblewski, F., & LaDue, J. S. (1955). Lactic dehydrogenase activity in blood. Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine, 90(1), 210–213.

TEMPORAL VARIATIONS IN SLEEP QUALITY, SOMNOLENCE, AND COGNITIVE PERFORMANCE DURING RAMADAN: A PROSPECTIVE LONGITUDINAL STUDY

Dr Sarah Shahid
[1]Assistant Professor of Physiology, Khyber Girls Medical College, Peshawar, Pakistan
https://orcid.org/0009-0001-2859-0319

Abstract

Background: Ramadan fasting is associated with alterations in meal timing and sleep–wake cycles, which may influence sleep quality, daytime alertness, and cognitive performance. Medical students, due to their high cognitive demands, represent a particularly relevant population for evaluating these effects.

Objective: To assess the impact of Ramadan fasting on sleep quality, daytime somnolence, and memory performance among female medical students across three time points: pre-Ramadan, mid-Ramadan, and post-Ramadan.

Methods: This prospective longitudinal study included 62 female medical students assessed at three phases: one week before Ramadan, during mid-Ramadan, and one week after Ramadan. Sleep quality was measured using the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI), daytime somnolence using the Epworth Sleepiness Scale (ESS), and memory performance through a standardized word recall test. Data were analyzed using repeated-measures analysis of variance, followed by Bonferroni-adjusted post hoc comparisons to identify differences between phases.

Results: A significant effect of Ramadan phase was observed for all outcomes. Sleep quality deteriorated significantly during mid-Ramadan compared with both pre- and post-Ramadan assessments ($p<0.01$), while daytime somnolence increased during mid-Ramadan, with mean ESS scores entering the range of excessive sleepiness ($p<0.01$). Memory performance demonstrated a modest but statistically significant decline during mid-Ramadan ($p<0.05$). Post hoc analysis indicated that these changes were primarily observed between pre- and mid-Ramadan and between mid- and post-Ramadan, whereas no significant differences were found between pre- and post-Ramadan phases.

Conclusion: Ramadan fasting is associated with transient impairments in sleep quality, increased daytime sleepiness, and mild reductions in memory performance among medical students. These changes appear to be reversible, with recovery to baseline levels following Ramadan.

Keywords: Ramadan fasting; sleep quality; daytime somnolence; memory; PSQI; Epworth Sleepiness Scale; longitudinal study; medical students

NEW CHALLENGE IN THE EDUCATION SYSTEM USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Inga Abuladze
Department of Information Technology, Department of Computer Science and Artificial Intelligenge
Irakli Megrelishvili
Business and Technology University, Tbilisi, Georgia
Department of Software Engineering, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia
ORCID: 0000-0002-4322-8692

ABSTRACT: The goal of the research is to analyze all teaching methods available in educational institutions. Based on the analysis of the conducted research, we will offer you an innovative method, which is based on machine learning algorithms and involves individual approaches to each student.

Since the 21st century is era of globalization, online, distance and hybrid methods are considered to be a more acceptable form of teaching in the future. The use of Machine Learning (ML) algorithms in the education system is a new challenges for both professors/teachers and students [1].

In this study author developed model how to make the educational process more flexible in the post-pandemic period using modern teaching methods include Artificial Intelligence (AI) technologies. Machine learning algorithms are used to solve this task, which will make the learning process more efficient and objective. Along with this, it will be adjusted to the ability of each student and will make the work of the teacher easier.

In the post-pandemic period, modern teaching methods are: face-to-face, online and hybrid teaching. Each method has its own advantages and disadvantages. In this study the Author reviews all teaching methods. After the COVID-19 era, hybrid and online teaching methods are a new challenges in educational institutions, representing a more acceptable form of teaching worldwide. The situation now is that many institutions continue online classes and, at the same time, blend them with face-to-face classes.

Along with online learning, hybrid teaching methods have become established at leading universities around the world. Hybrid teaching is still a necessary trend in the future teaching reform base on its multiple advantages. However, in order to improve the teaching outcomes, students participation and learning initiatives, it is imperative to undertake additional reforms in the future teaching process. Finally, hybrid education is one of the most interesting concepts of the 21st century education system.

According to statistics, approximately 98% of universities have transferred part of the educational process to online platforms. However, online and hybrid models of education remains a challenge.

Keywords: Education System, New Challenges, Machine Learning, Online Teaching, Hybrid Teaching, Face-to-Face Teaching.

I. INTRODUCTION

In this study main challenges is shifting from traditional teaching methods to online, distance and hybrid learning. For this task I developed model to transition from one teaching method to another using machine learning algorithms, which are a subset of artificial intelligence (AI). Artificial intelligence has been a topic of growing interest and investigation in various fields, including higher education. This research article explores the impact of AI on higher education by examining its effects on teaching and learning, assessment, ethics, required skills, and future careers.

The aim of the scientific paper is to create a blended and student-oriented system of the educational process. At the same time, the work related to the educational process should be facilitated for the Professor/Teacher. In the educational process, the effectiveness of any educational course is assessed by the learning outcomes obtained by the student. To achieve efficiency, the educational process service must be tailored to students, that is, the teacher must learn and improve various methods of working with the online platform.

The pandemic and the post-pandemic periods have brought about a very big change in the educational system. The growing pace of technology has become even more visible and has covered all fields, especially in educational institutions. Because online learning and a distance assessment system are still relevant today.

The COVID-19 pandemic has presented the entire world's education system with a new challenge. The number of online lectures (lessons) has increased, and at this time the teacher needs to make more efforts to conduct the educational process at a high level. Such a sudden change in the format of teaching has dealt a certain blow to both lecturers and students. It has become necessary to adapt to online teaching, create many new methods, study them and use them. A fairly large army of lecturers and professors-teachers has faced this challenge. During online teaching, the lecturer is always in the focus and has the eyes of many students. It is much easier to lead the educational process when teaching in the auditorium than when teaching online. Because the teacher has to take into account many factors. For example: sudden power outages (which are common in Georgia), getting to know his/her students online, establishing order during online teaching, and communicating with each student. Sharing their work, and a lot of technological, psychological, moral, and physical effort is required for a teacher to conduct the learning process at a high or good level [2].

II. RESEARCH AND FINDINGS

In this paper presents an analysis of various teaching methods in the post-pandemic period. The participants were asked which method between online, face-to-face, and hybrid education they preferred with the question “What is your teaching model preference?”. 45.4% of students responded as “online education”, 28.8% “face- to-face” and 25.8% “hybrid” (Table 1). These results indicated that most of the students preffered online education [3].

Table 1. Frequency Distribution of Teaching Model Preference

Model Preference	students	%
Online Education	2497	45.4
Face-to-Face Education	1587	28.8
Hybrid Education	1420	25.8
Total	5504	100

Table 2 shows contingency the relationship between taching model preference and gender.

Table 2

Teaching Model Preference		Gender		
		Female	Male	Total
Online Education	Number %	1133	1364 54.64	2497 100
Face-to-Face Education	Number %			
Hybrid Education	Number %			
Total	Number %			

Table 3 shows contingency the relationship. View of the learning management system used as complex between teaching model preference and student's.

Teaching Model Preference		Gender					
		Strongly Disagree	Disagree	Moderate	Agree	Strongly Agree	Total
Online Education	Number %			311 12.6	177 7.2	105 4.3	
Face-to-Face Education	Number %						
Hybrid Education	Number %						
Total	Number %						

Table 3

a) Develop exam sample model on Python

b) Evaluation of the effectiveness of the student's final result

Three paradigms are proposed for Artificial Intelligence in Education (AIED). They are: AI-direct, AI-support, and AI-empower [4].

- ❖ AI is used to represent knowledge models and direct cognitive learning in Paradigm One.
- ❖ AI is used to support learning while learners work as collaborators with AI in Paradigm Two.
- ❖ AI is used to empower learning while learners take agency to learn in Paradigm Three.

The main starting point in the learning process is the student. therefore, in order to get the best results, the teacher must develop the most effective methods of the exam. Machine learning algorithms help us in
approach, using which the exam process is comfortable for both the student and the lecturer.
In this study Author's developed model of modern teaching method, according in which 5 components
play a key role in the learning process [5, 6]

$$FS(i = 1, 2, 3, 4, 5) \qquad (1)$$

1) Student activity in the learning process
2) Adequate delivery of material by the lecturer
3) Management of the classroom by lecturer
4) Communication between lector and student
5) Respect for each other to achieve the best Outcomes.

The author have developed a model for assessing students in educational institutions based on machine learning algorithms. It is known that when talking about machine learning, the programming language Python is necessarily meant [7].

Therefore,Author offers four models for remote exams. In this case, the code is written in the Python language.

Sample 1:

Use the `discard` method to remove "banana" from the `fruits` set.

```
fruits = {"apple", "banana", "cherry"}
[ ]
```

Sample 2: Print "Hello World" if `a` is not equal to `b`.

```
a = 50
b = 10
[ ] a [ ] b [ ]
  print("Hello World")
```

Sample 3:

Stop the loop if i is 3.

```
i = 1
while i < 6:
  if i == 3:
    [ ]
  i += 1
```

Sample 4:

In the loop, when i is 3, jump directly to the next iteration.

```
i= 0
while i < 6:
  i += 1
  if i == 3:
    [ ]
  print(i)
```

According to an article in The Atlantic, (“Artificial Intelligence Promises a Personalized Education for All”), artificial intelligence holds the potential to “enhance human teachers’ abilities to tailor lessons to each student without knocking their class schedule off track,” eliminating the need for educators to “teach to the middle,” as often happens when their students have a range of skill levels and learning abilities.

Rose Luckin, a professor of learning-centered design at University College London, is quoted as saying that, "The real power of artificial intelligence for education is in the way that we can use it to process vast amounts of data about learners, about teachers, about teaching and learning interactions". Ultimately, AI can "help teachers understand their students more accurately, more effectively ". She says AI in education will help us understand how we think [8].

Though there continues to be widespread debate over the pros and cons of deploying AI technology in the field of education, including the concerns about depersonalization and the ethical considerations cited above, there is an emerging consensus that the extraordinary range of current and future benefits will carry the day.

My research mainly concerns the evaluation of the positive and negative between online and face-to-face learning. Based on their analysis, it is recommended to switch to a hybrid format to achieve effective learning results. The use of machine learning algorithms for the effectiveness of the learning process.

A two-and-a-half-year study of online learning at leading universities around the world, including Georgia (Country), has shown that the hybrid (blended) method of teaching is much better for both lecturers and students. Because human communication has a much better effect on both sides. During the pandemic, the least hit was for students and professors of the Faculty of Technology. The biggest and most devastating hit was suffered by professors of the Faculty of Humanities and Natural Sciences, because most teachers have not mastered technologies at the proper level. Based on this reality, which is present all over the world, my modest recommendation is as follows: the learning process in the future should be hybrid, which in itself includes online, distance and face-to-face learning in symbiosis.

As you know, the learning process consists of several components. For the perfect conduct of the learning process, both the teaching and assessment processes of students are important. During online learning, the teacher must be fully involved in the learning process and constantly provide his students with electronic learning materials: textbooks, lecture notes, presentations, etc. At the same time, he must conduct the assessment remotely.

The purpose of the work is to help professors and teachers around the world increase their knowledge in the distance learning process and gain more experience in effectively conducting the learning process. To solve this problem, machine learning (ML) algorithms and assessment methods have been developed, which will make the learning process more effective and flexible.

Figure 1 shows a model of machine learning in education in the post-pandemic period [9]. The advantage of this model is that all components of the learning process are combined symbiotically, which offers the opportunity to conduct the best lecture

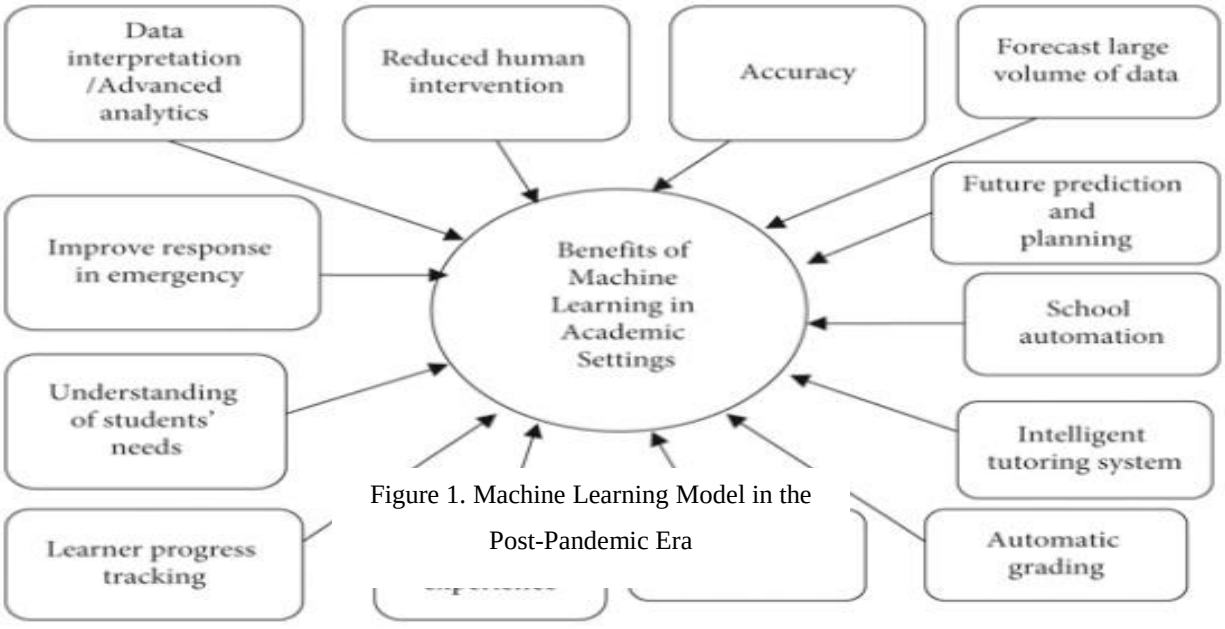


Figure 1. Machine Learning Model in the Post-Pandemic Era

A teaching philosophy underlying this system revolves around prioritizing students as the primary beneficiaries, teachers as the driving force, industry feedback, and industry-specific guidance. Therefore, while constructing a quality evaluation system for higher education, the following two aspects should be considered:

1. *Student-Centered Approach*: Regardless of changes in teaching formats, students always play a central role in the teaching process.

2. *Teacher Leadership*: Teacher have a pivotal role in thear courses, indicating the course's practicality.

Consequently, teachers can adapt teaching techniques and approaches based on the classroom dynamics and instructional context. By integrating students theoretical knowledge and practical abilities while enhancing their overall development, teachers have relatively more freedom in guiding the higher education curriculum. If all evaluation systems solely focus on assessing lectors performance, the inherent communicative and interactive functions of the course may be compromised. Therefore, the lecturer needs support and encouragement from the administration.

The implementation of practical activities mainly relies on extracurricular activities, which in turn can promote the understanding of classroom theory. Therefore, the teaching quality evaluation must adhere to the unity of theory and practice. With continuous maturity and development of internet application technology, ML algoritms is also increasingly being applied to teaching evaluation. At the end of each semester or during a certain period of study, the university will organize students to evaluate lectors on the official account or App at the specified time. If the evaluation cannot be completed in a timely manner, students will not be able to check their grades and perform other operations. This characteristic of short time and heavy tasks can make students perfunctory in evaluating, resulting in teachers receiving feedback that has no reference value. This kind of "evaluating teaching for the sake of evaluation" ultimately only allows evaluation to become a formality. The quality evaluation of higher education mainly targets the teaching of teachers.

Therefore, the current evaluation system mainly introduces Western theories and research techniques. The lack of empirical research has led to the lack of guarantee for the scientificity of various evaluation indicators and the effectiveness of results, let alone the goal of improving the evaluation system in the long run.

How is artificial intelligence used in education?

AI is used in education in numerous ways that enhance different aspects of teaching and learning. For example, adaptive learning platforms customize content for individual students. AI also automates grading and scheduling to free up teachers’ time, and interactive tools make learning more engaging.

What is the future of AI in education?

The future of AI in education is bright, with ongoing improvements in personalized learning and accessibility. We can expect more advanced tools for adaptive learning and immersive virtual classrooms that will make education more engaging and effective.

How is AI currently being used in higher education?

AI is used in higher education in various ways, from detecting plagiarism and ensuring exam security to providing student support through chatbots. It also enhances online learning, transcribes lectures, tracks student progress, supports research and connects campuses. These diverse applications help streamline tasks and improve the learning experience for everyone.

Is AI good or bad for education?

AI has the potential to greatly improve education by personalizing learning and making administrative tasks easier. However, it also raises concerns about data privacy and equity. Thoughtful and ethical use of AI can maximize its benefits while addressing these challenges. Below is a list of benefits of AI in education [10]:

1. ***Adaptive Learning:*** AI-driven platforms assess students' skill levels in real time and tailor instructional content to meet individual needs. These systems adapt lessons dynamically based on student responses, providing customized pathways to help students master concepts at their own pace.
2. ***Data and Learning Analytics:*** AI helps analyze data from online learning portals, classroom attendance and grades. This data provides insights into student performance, helping educators identify trends and tailor instruction to address gaps in understanding and performance.
3. ***Classroom Management:*** Platforms use AI to gamify classroom management. AI tracks student behavior and engagement, rewarding positive actions with points and badges and providing teachers with insights into classroom dynamics to manage and motivate students.
4. ***Intelligent Tutoring Systems:*** AI-powered tutoring systems such as Carnegie Learning provide personalized feedback and support, adapting to individual learning styles and needs to help students understand complex concepts and improve academic performance.
5. ***Automated Grading and Assessment Tools:*** These tools use AI to evaluate assignments and provide detailed feedback, streamlining the grading process, ensuring consistency and saving teachers time. AI can also grade more abstract assessments like essays by analyzing the content for coherence and relevance.
6. **Chatbots and Virtual Assistants:** AI-driven chatbots such as Mainstay provide students with immediate support and assistance outside classroom hours. These chatbots answer questions, remind students of deadlines and guide them through administrative processes, enhancing engagement and promoting independent learning.
7. **Curriculum Planning:** AI helps educators plan curricula by analyzing educational data to identify trends and gaps. This ensures the curriculum remains relevant, comprehensive and aligned with learning objectives by suggesting updates based on the latest educational needs and standards.
8. ***Personalized Learning:*** AI learning platforms create customized learning experiences by adapting to the unique ways students understand concepts. This reduces cognitive load and ensures that each student receives instruction tailored to their learning style and pace.
9. ***Language Learning:*** AI tools like *Duolingo* use adaptive algorithms to personalize language learning experiences. The AI adjusts the difficulty of exercises based on the user's progress, ensuring an optimal learning curve and enhancing language acquisition.
10. ***Virtual 3D Classrooms:*** The metaverse creates *immersive virtual classrooms* where students can interact with classmates and teachers. Platforms like Engage VR offer virtual environments that enhance the learning experience beyond traditional methods, providing opportunities for interactive and experiential learning.
11. ***Plagiarism Detection:*** AI tools analyze student submissions for potential plagiarism by comparing them against a vast database of academic content, ensuring academic integrity and originality in student work.

CONCLUSION

In the era of globalization and AI the crucial role online, distance and hibrid teaching. After the pandemic, such teaching methods have been recognized all in the world, although hybrid teaching is still a priority.

In this study have been developed a modern teaching models using Machine Learning Algorithms, which criteria play a decisive role in the learning process, what the lecturer should focus on to achieve the best results of students outcomes.

Before the pandemic, the learning process was contact-based (Face-to-Face), and after the pandemic, an online format of distance learning was developed to increase the efficiency of the learning process. The latter resource revolutionized the learning process. The learning process became more flexible and effective using machine learning algorithms. During the pandemic, a new era was laid in the education system, which turned the whole world into one global world. The globalization process breaks borders and gives each student the opportunity to receive the best quality education at the university of their choice. It helps the lecturer to deliver the best lecture and takes care of the high results of each student.

Python language plays a special role in machine learning algorithms used to effectively manage the learning process. In this study developed a models that will help the lecturer conduct lectures focused on each student to achieve the best results.

REFERENCES

[1] I. Abuladze. New Challenge in the Educational Institutions Post-Pandemic period. XIV Annual International Conference of the Georgian Mathematical Union, Batumi Shota Rustaveli State University. September 1-6, 2025.

[2] I. Abuladze, I. Megrelishvili. The role of artificial intelligence for the effectiveness of the educational process. International Scientific and Practical Conference "Innovations and Modern Challenges 2022" dedicated to the 100th anniversary of the Georgian Technical University and the 65th anniversary of the Faculty of Informatics and Control Systems. Tbilisi, Georgia, November 18-19, 2022.

[3] N. Hotara, M. A. Özcanb, B. Baranc, E. Karagözd, L. Ö. Güneye. Face-to-Face, Online or Hybrid, Which Model is Preferred by University Students and Why? Journal of Learning and Teaching in Digital Age, 8(2), 2023, pages 1799-180. https://dergipark.org.tr/en/pub/joltida, ISSN: 2458-8350 (online).

[4] R. Barouki. The COVID-19 pandemic and global environmental change: Emerging research needs. Vol.152, 2021.
https://www.sciencedirect.com/science/article

[5] I. Abuladze. Opportunities and Challenges of Using Artificial Intelligence in the Educational System. International Symposium on AI-Driven Engineering Systems, Tokat Gaziosmanpasa University, Turkey, June 19-20, 2025.

[6] I. abuladze. Georgian Scientists, Association for Science,Vol. 7 No. 2 (2025), E- ISSN : 2667-9760 https://doi.org/10.52340/gs. 2025.07.02.51

[7] I. Abuladze. Programming Language Python. Technical University, Tbilisi, Georgia, 2021.
ISBN 978-9941-28-856-2 (online).

[8] https://www.ucl.ac.uk/news/2020/mar/opinion-ai-education-will-help-us-understand-how-we-think.

[9] E. M. Onyema , Kh. K. Almuzaini , F. U. Onu, D. Verma , U. S. Gregory, M. Puttaramaiah , R. K. Afriyie. Prospects and Challenges of Using Machine Learning for Academic Forecasting. Hindawi, Computational Intelligence and Neuroscience, 2022.

[10] https://onlinedegrees.sandiego.edu/artificial-intelligence-education.

COLLECTION AND ASSESSMENT OF ELECTRONIC EVIDENCE IN VIETNAMESE CIVIL PROCEEDINGS: A COMPARATIVE STUDY WITH CHINESE LAW AND RECOMMENDATIONS FOR LEGAL IMPROVEMENT

PHAN THỊ CHÁNH LÝ
Tra Vinh University, Vietnam.
University of Law, Vietnam National University, Hanoi, Vietnam

ABSTRACT

In the context of digital transformation, civil transactions and relationships are increasingly conducted through electronic environments, thereby enhancing the role of electronic evidence in civil proceedings. The collection, authentication, and assessment of electronic evidence raise a number of emerging legal issues, particularly concerning the authenticity, integrity, origin, and probative value of electronic data. This article, entitled ***"Collection and Assessment of Electronic Evidence in Vietnamese Civil Proceedings: A Comparative Study with Chinese Law and Recommendations for Legal Improvement"***, examines the theoretical and legal aspects of the collection, authentication, and assessment of electronic evidence in Vietnamese civil proceedings. It also provides a comparative analysis with Chinese law to identify similarities, differences, and relevant legal experiences that may serve as useful references for improving the Vietnamese legal framework.

Keywords: Electronic evidence; civil proceedings; electronic data; Vietnamese law; Chinese law.

BREAST CANCER METASTASIS: MOLECULAR MECHANISMS AND EMERGING THERAPEUTIC STRATEGIES

Maroua RIAD
Ahmad AL-SHAMI
Jamal MABROUKI
Laboratory of Spectroscopy, Molecular Modelling, Materials, Nanomaterials, Water and Environment, CERN2D, Mohammed V University in Rabat, Faculty of Science, AV Ibn Battouta, Agdal, Rabat 10106, Morocco

Abstract
Metastasis remains one of the major causes of mortality among patients with breast cancer and represents a complex multistep process involving tumor cell invasion, dissemination, survival in the circulation, and colonization of distant organs. Breast cancer cells can acquire invasive properties through molecular and cellular mechanisms that include epithelial–mesenchymal transition, alterations in cell adhesion, extracellular matrix remodeling, and interactions with the tumor microenvironment. The metastatic process is also influenced by tumor heterogeneity and the ability of disseminated cancer cells to adapt to specific distant tissue environments. Bone, lung, liver, and brain are among the most frequent sites of breast cancer metastasis, with organ-specific interactions contributing to disease progression and therapeutic response. Recent studies have highlighted the importance of signaling pathways, extracellular vesicles, stromal cells, and immune components in establishing favorable metastatic niches. Understanding these mechanisms may facilitate the identification of biomarkers for metastatic risk and the development of targeted therapeutic strategies. Current approaches include molecularly targeted therapies, antibody-based treatments, and combination strategies designed to interfere with metastatic signaling and tumor–microenvironment interactions. This review summarizes the principal molecular mechanisms underlying breast cancer metastasis and discusses emerging therapeutic strategies aimed at preventing metastatic dissemination and improving outcomes for patients with advanced diseases.
Keywords: Breast cancer; Metastasis; Tumor invasion; Epithelial–mesenchymal transition; Tumor microenvironment; Metastatic niche; Molecular mechanisms; Targeted therapy.

THE PROBLEM OF MICROPLASTICS IN ENVIRONMENTAL MEDICINE

Mariami Managadze
" Student of the Faculty of Public Health, Tbilisi State Medical University."

Abstract
Introduction: Microplastics represent one of the most significant challenges in modern environmental medicine due to their widespread distribution and potential adverse effects on human health. These compounds enter the environment through various routes, including marine and freshwater sources, ambient air, and food products, increasing human exposure.
The study aimed to analyze the main sources, global distribution, and pathophysiological effects of microplastics on human health based on recent scientific literature.
Study Methods and Materials: This study is based on a narrative literature review conducted in accordance with PRISMA guidelines to ensure methodological transparency and accuracy. A comprehensive search was performed in the PubMed and Google Scholar databases, covering the period from 2014 to 2024. The following keywords were used: "microplastics," "human health," "bioaccumulation," "microplastics ingestion," and "toxicology of microplastics."
Inclusion criteria were: Peer-reviewed studies focusing on the impact of microplastics on human health, Systematic reviews, meta-analyses, original research articles. After initial screening of **134 articles**, **37** met the final eligibility criteria and were analyzed in depth.
Literature management was conducted using **Zotero**, while Microsoft Excel was used for data synthesis and thematic organization.
Results: The findings indicate that microplastics have bio accumulative properties and are linked to serious health effects, including endocrine disruption, inflammation, immune dysfunction, cancer risk, and neurodegenerative diseases.
Conclusion:
Strengthening control measures across drinking water, food, and air quality to mitigate microplastic exposure, supported by coordinated efforts in environmental regulation, public health, and education.
Key words: Microplastics, Health risks, Environmental medicine, Bioaccumulation.

Bibliography
1. **Browne, M.A., et al.** (2011). *Accumulations of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks.* Environmental Science and Technology, 45, 9175–9179.
2. **Hao-Peng Wang, Xu-Hui Huang, Jia-Nan Chen, Meng Dong, Cheng-Zhen Nie, Lei Qin.** (2023). *Micro- and nano-plastics in food systems: Distribution, combined toxicity with environmental contaminants, and removal strategies.* Chemical Engineering Journal, 476, 15 November, 146430.
3. **Ivar do Sul, J.A., & Costa, M.F.** (2014). *The present and future of microplastic pollution in the marine environment.* Environmental Pollution, 185, 352–364.
4. **Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G., Song, M., & Sung.** (2023). *Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects.* Environmental Health, 1(4), 249–257.
5. **Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M., Reiberger, T., & Liebmann, B.** (2019). [Title missing]. [Journal name missing], 171(7), 453–457.
6. **Thompson, R., & Napper, I.** (2019). *Microplastics in the Environment.* In Plastics and the Environment (pp. 60–81).

AI-NATIVE DIGITAL PUBLIC INFRASTRUCTURE AND THE NATIONAL GOVERNMENT AI PLATFORM

DR. MUHAMMAD FAISAL
Allama Iqbal Open University, Islamabad, Pakistan
ORCID: 0000-0002-5797-766X

Abstract
Pakistan should move beyond individual AI applications toward an AI-enabled Digital Public Infrastructure (DPI). A common national platform could provide reusable AI capabilities to government institutions.
Pakistan's digital governance direction already emphasizes secure and interoperable digital infrastructure and national data exchange capabilities.

Policy Recommendation
Establish a **National Government AI Platform (NG-AIP)**.

Shared Services
The platform could provide:

- national AI gateway;
- identity and authorization;
- model registry;
- AI agent registry;
- secure API gateway;
- multilingual speech;
- document intelligence;
- translation;
- summarization;
- knowledge retrieval;
- verification;
- audit logging.

AskGov-Type Architecture
A citizen could ask:
"What government assistance is available to me?"
The platform could:

1. identify the question;
2. route it to the appropriate policy agent;
3. retrieve official information;
4. verify the answer;
5. provide a source-cited response;
6. escalate complex cases to a human officer.

Policy Clause
The Government shall develop reusable AI infrastructure and common AI services to reduce duplication, improve interoperability and accelerate responsible adoption across public institutions.

Benefits
Instead of every ministry purchasing its own AI system, government can provide common infrastructure.

KPIs

- number of ministries connected;
- number of shared AI services;
- cost savings;
- citizen-service response time;
- API utilization;
- percentage of responses supported by authoritative sources.

Conclusion

Pakistan should treat government AI as a **shared national platform**, not a collection of disconnected departmental projects.

ENHANCING SOCIAL SAFETY NETS IN PAKISTAN A QUASI-EXPERIMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF BISP DYNAMIC REGISTRY REFORMS AND PRODUCTIVE ASSET GRADUATION MODELS

DR. MUHAMMAD FAISAL
Allama Iqbal Open University, Islamabad
ORCID: 0000-0002-5797-766X
SENATOR RUBINA KHALID
Chairperson, Benazir Income Support Program
DR. ASIM IJAZ
Director General (NSER/CCT), Benazir Income Support Program

ABSTRACT

The Benazir Income Support Programme (BISP) serves as Pakistan's core federal social safety net, providing liquidity to over nine million female-represented households. While unconditional cash transfers (UCT) through the *Kafaalat* program provide vital consumption smoothing, long-term poverty alleviation remains constrained by static registry decay, rapid macroeconomic inflation, point-of-sale intermediary rent-seeking, and the absence of institutionalized livelihood graduation pathways. This study evaluates an operational reform transitioning from decennial National Socio-Economic Registry (NSER) censuses to an on-demand Dynamic Registry combined with a localized "Cash-Plus" Productive Graduation Model. Utilizing a longitudinal quasi-experimental design across 4,800 female-headed households in eight vulnerable districts of Punjab, Sindh, Khyber Pakhtunkhwa, and Balochistan over a 36-month timeline, we evaluate trajectories across Poverty Scorecard (PSC) metrics, real household consumption, food security indices, and non-farm micro-enterprise earnings. Econometric difference-in-differences (DiD) estimation reveals that households receiving combined cash transfers, productive asset endowments (micro-livestock or agricultural inputs valued at PKR 60,000), and foundational financial capability coaching achieved an average 7.82-point gain on the Poverty Scorecard, compared to a 1.94-point increase among cash-only control households. Furthermore, graduation-cohort households exhibited a 31.4% increase in non-farm enterprise margins and a 24.6% reduction in negative coping strategies during economic shocks. Establishing decentralized, tehsil-level dynamic desks reduced administrative enrollment latency from 4.2 years to 18 days. The results demonstrate that passive cash relief alone is insufficient to dismantle intergenerational poverty traps; state social protection must transition toward adaptive dynamic registries linked to productive asset endowments.

Keywords: Benazir Income Support Programme, Social Safety Nets, Poverty Alleviation, Poverty Scorecard, Graduation Model, Dynamic Registry, Financial Inclusion.

1. INTRODUCTION

Poverty alleviation in developing economies demands institutional evolution from basic compensatory relief to transformational social protection. In Pakistan, severe macroeconomic challenges marked by currency depreciation, high double-digit consumer price inflation, balance-of-payments adjustments, and catastrophic monsoon floods across the Indus River Basin continue to strain bottom-quintile households. BISP constitutes the foundation of national social protection, primarily disbursing quarterly cash stipends to female heads of qualifying families.

Despite its unprecedented operational scale and substantial allocations from the federal budget, conventional cash delivery faces systemic limitations. Fixed nominal transfers suffer rapid purchasing-power erosion during inflationary spikes, while proxy means tests (PMT) derived from static, decennial door-to-door surveys fail to track dynamic socioeconomic shocks. Most critically, unconditional cash transfers provide a survival floor without equipping recipients to generate independent livelihoods. This paper evaluates an operational pivot toward an integrated social protection framework that combines continuous dynamic registration with productive asset graduation and direct-to-wallet digital payments.

2. PROBLEM STATEMENT

The operational architecture of BISP has historically encountered four structural bottlenecks:

1. **Targeting Rigidity and Exclusion Errors:** Reliance on decennial door-to-door surveys produces severe registry decay. Transiently poor households struck by illness, localized droughts, or job loss remain locked out of social safety nets for years.
2. **Purchasing Power Erosion:** Persistent inflation consistently degrades the real value of quarterly cash transfers, forcing families to exhaust stipends exclusively on minimal caloric needs rather than human capital investments.
3. **Point-of-Service Intermediary Rent-Seeking:** The legacy distribution system relies on branchless banking retail franchise agents who routinely demand unauthorized fee cuts (PKR 500–1,000 per payment) from low-literacy female beneficiaries.
4. **The Graduation Trap:** Basic unconditional stipends alleviate acute distress but do not build productive income-generating capacity, leaving beneficiary families trapped near the survival threshold (Poverty Scorecard cut-off ≤ 32).

3. LITERATURE REVIEW

Social safety net scholarship differentiates between compensatory social assistance and transformative social protection (Devereux & Sabates-Wheeler, 2004; Gazdar, 2011). Empirical assessments of BISP's early phases confirmed gains in female identity registration (CNIC), basic caloric consumption, and primary school attendance (Cheema et al., 2016). However, long-term tracking indicates that cash transfers alone rarely alter underlying agrarian dependencies or produce autonomous economic mobility.

The ultra-poor graduation paradigm pioneered by BRAC in Bangladesh and evaluated across six developing nations by Banerjee et al. (2015) demonstrates that escaping extreme poverty requires an integrated sequence of interventions: a productive asset grant, consumption support, technical training, and savings facilities. In Pakistan, early pilots by the Pakistan Poverty Alleviation Fund (PPAF) showed that capital endowments stimulate household micro-enterprise activity. Concurrently, international evidence from Brazil (*Cadastro Único*) and Turkey confirms that dynamic registries linked to national civil identity databases significantly cut exclusion errors and administrative overhead (Leite et al., 2017; Gelb & Metz, 2018).

4. BASELINE METADATA AND RESEARCH DESIGN

This study employs a longitudinal, quasi-experimental cohort design tracking 4,800 female-headed households across eight vulnerable districts: Faisalabad and Rajanpur (Punjab), Thatta and Tharparkar (Sindh), Mardan and Upper Kohistan (Khyber Pakhtunkhwa), and Lasbela and Washuk (Balochistan). Households had baseline Poverty Scorecard (PSC) ratings between 11 and 28.

The sample was assigned across three parallel tracks:

- **Control Group ($n=1,600$):** Standard quarterly *Kafaalat* cash transfers under static NSER scoring and retail point-of-sale (POS) agent collection.

- **Treatment Group 1 (T_1, $n=1,600$):** Standard cash transfers with dynamic desk-based recertification and biometric direct-wallet disbursement.
- **Treatment Group 2 (T_2, $n=1,600$):** Standard cash transfers, dynamic recertification, direct-wallet disbursement, plus a one-time productive asset transfer (livestock or small-retail inventory worth PKR 60,000) and enterprise coaching.

The primary econometric specification follows a Difference-in-Differences (DiD) framework:
$$Y_{ijt} = \beta_0 + \beta_1 \text{Time}_t + \beta_2 \text{Treat}_{ij} + \beta_3 (\text{Time}_t \times \text{Treat}_{ij}) + \gamma \mathbf{X}_{ijt} + \alpha_j + \varepsilon_{ijt}$$
Where Y_{ijt} represents outcome metrics (Poverty Scorecard, monthly consumption, non-farm income), Time_t marks baseline versus endline at 36 months, Treat_{ij} designates cohort assignment, $\mathbf{X}_{ijt}$ controls for household demographic covariates, α_j captures district fixed effects, and ε_{ijt} represents the error term.

5. RESULTS AND DISCUSSION

Longitudinal data collected over 36 months demonstrate pronounced divergence across the cohorts:

Performance Metric	Control (t=0)	Control (Endline)	T1 Endline	T2 Endline	Net DiD (T2 vs Control)	Robust Std. Error	p-value
Mean Poverty Score (0–100)	19.42	21.36	21.65	**27.24**	**5.88**	0.421	<0.001
Monthly Consumption (PKR)	16,840	18,920	19,850	**24,150**	**3,150**	214.5	<0.001
Food Consumption Score (FCS)	34.2	36.1	38.45	**44.8**	**6.8**	0.812	<0.001
Non-Farm Enterprise Margin (PKR)	1,200	1,450	2,100	**6,850**	**5,150**	318.2	<0.001
POS Agent Deductions (%)	6.80%	7.20%	**0.80%**	**0.60%**	**-6.20%**	0.28%	<0.001
Secondary School Enrollment (%)	41.20%	43.50%	51.20%	**58.90%**	**13.10%**	1.84%	<0.001

Table 1: Longitudinal data collection and evaluation

Households in the T_2 graduation cohort experienced an average 7.82-point baseline-to-endline gain on the Poverty Scorecard (a net DiD increase of +5.88 points over the control). Approximately 28% of T_2 households crossed the national graduation threshold ($PSC \ge 32$). Transferred assets generated sustained cash flows that protected families from liquidating productive capital during economic shocks. Concurrently, shifting T_1 and T_2 cohorts to direct mobile wallets cut unauthorized agent fee skimming from 7.2% to under 1.0%.

6. CONCLUSION AND FUTURE DIRECTIONS

The empirical evidence indicates that unconditional cash transfers provide essential relief but cannot independently graduate families from chronic poverty. BISP must institutionalize graduation pathways by dedicating at least 15% of its annual budget to productive asset endowments, localized vocational training, and direct mobile wallet accounts. Future initiatives should link graduated households to commercial microfinance networks and sovereign micro-insurance pools.

REFERENCES

- Banerjee, A., Duflo, E., Goldberg, N., O'Hanlon, N., Shapiro, J., Smith, J., & Udry, C. (2015). A multifaceted program causes lasting progress for the very poor: Evidence from six countries. *Science*, 348(6236), 1260799.
- Cheema, I., Hunt, S., Javeed, S., Lone, T., & O'Leary, D. (2016). *Benazir Income Support Programme: Final impact evaluation report*. Oxford Policy Management.
- Devereux, S., & Sabates-Wheeler, R. (2004). *Transformative social protection* (IDS Working Paper 232). Institute of Development Studies.
- Gazdar, H. (2011). Social protection in Pakistan: In the eye of the storm. *IDS Bulletin*, 42(6), 66–76.
- Gelb, A., & Metz, A. (2018). *Identification revolution: Can digital ID be harnessed for development?* Center for Global Development.
- Leite, P., George, T., Sun, C., Jones, T., & Lindert, K. (2017). *Social registries for social assistance and beyond: A guidance note & assessment tool*. World Bank.

ARENE LIGAND ENGINEERING IN CHROMIUM HALF-SANDWICH COMPLEXES TOWARD ENHANCED DYE-SENSITIZED SOLAR CELL PERFORMANCE

Said Kerraj
Laboratory of Physical Chemistry of Applied Materials, Faculty of Sciences Ben M'Sik, Hassan II University of Casablanca, B.P.7955, Bd Cdt Driss El Harti, Casablanca, Morocco.
Mohamed elmamouni
Laboratory of Physical Chemistry of Applied Materials, Faculty of Sciences Ben M'Sik, Hassan II University of Casablanca, B.P.7955, Bd Cdt Driss El Harti, Casablanca, Morocco.
Mohamed Moussaoui
Chemical and Biochemical Sciences-Green Processing Engineering, Mohammed VI Polytechnic University, Ben Guerir, Morocco.

ABSTRACT

This work investigates the influence of arene-ligand functionalization on the photovoltaic properties of half-sandwich chromium complexes of the general formula (η^6-C_6H_5X)$Cr(CO)_3$. Seven functionalized derivatives were theoretically examined as potential sensitizers for dye-sensitized solar cells (DSSCs) using density functional theory (DFT) and time-dependent density functional theory (TD-DFT). Ground- and excited-state properties were calculated at the B3LYP/6-31G/SDD level. The photovoltaic performance of the complexes was assessed through key descriptors, including the maximum absorption wavelength (λmax), light-harvesting efficiency (LHE), electron-injection driving force (ΔG_{inj}), dye-regeneration driving force (ΔG_{reg}), and open-circuit voltage (V_{OC}). The calculated results demonstrate that structural modification of the arene ligand significantly affects the electronic, optical, and charge-transfer characteristics of the chromium complexes. Among the investigated compounds, DA, DB, DD, DF, and DG displayed the most favorable combination of photovoltaic parameters, indicating their potential as sensitizers for DSSC applications. Overall, these findings demonstrate the usefulness of DFT and TD-DFT approaches for predicting structure–property relationships and guiding the rational design of new organometallic sensitizers for solar-energy conversion.

Keywords: half sandwich chromium; DSSCs; optoelectronic; photovoltaic characteristics and DFT/ TD-DFT.

THE SCIENTIFIC DISCOURSE ON TRANSLATIONAL EPIGENETICS, ONCOGENETICS, PRECISION MEDICINE, TRANSLATIONAL MEDICINE, PHARMACOLOGY, PHARMACOVIGILANCE, CLINICAL PHARMACOLOGY, PHARMACOTHERAPY AND EVIDENCE-BASED MEDICINE: INTEGRATING MOLECULAR INSIGHTS INTO PERSONALIZED CANCER PREVENTION DIAGNOSIS AND THERAPEUTIC CARE

Nodar Sulashvili
Maka Buleishvili
Mariam Darbaidze
Margarita Beglaryan
Nana Gorgaslidze
Irina Imerlishvili
Marina Giorgobiani
Nato Alavidze
Nino Abuladze
Ketevani Gabunia
Marika Sulashvili
Diego Rada Fernandez de Jauregui
Igor Seniuk
Vira Kravchenko
Olga Shapoval
Otar Gerzmava

MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical and Pharmacological Sciences In Medicine, Professor of Faculty of Medicine at Georgian International University GIU, Professor of Pharmacology of Faculty of Medicine at Georgian National University SEU; Professor of Medical and Clinical Pharmacology of Faculty of Medicine at BAU International University Batumi, Georgia; Professor of Medical and Clinical Pharmacology of International School of Medicine at Alte University; Tbilisi, Georgia; Invited Professor/Lecturer of Scientific Research-Skills Center at Tbilisi State Medical University; Invited Lecturer of Clinical Pharmacology Department at Tbilisi State Medical University; Tbilisi, Georgia; https://orcid.org/0000-0002-9005-8577

MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Professor, Dean of Faculty of Medicine at Georgian International University GIU, Tbilisi, Georgia; Professor of Faculty of Medicine at Georgian National University SEU, Professor of Faculty of Medicine at European University, Professor of Faculty of Medicine at Caucasus International University, Professor of Faculty of Medicine at Georgian-American University Invited Lecturer of Tbilisi State Medical University, Tbilisi, Georgia; Professor of Faculty of Medicine at BAU International University Batumi, https://orcid.org/0009-0004-2657-8473

MD. PhD, Doctor of Biological Sciences, Professor of Georgian International University GIU, Vice Rector of Georgian International University GIU; Professor of Georgian National University SEU; Tbilisi, Georgia; https://orcid.org/0009-0005-0275-4222

1. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Yerevan State Medical University After Mkhitar Heratsi, Head of the Department of Pharmaceutical Management, Yerevan, Armenia; https://orcid.org/0000-0003-3697-6390
2. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Tbilisi State Medical University, Head of The Department of Social and Clinical Pharmacy, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-4563-5224

3. PhD, Doctor of Law, Professor, Rector of BAU International University Batumi; Professor of BAU International University Batumi; Professor at the International Black Sea University, Batumi-Tbilisi, Georgia; https://orcid.org/0009-0008-6862-7025
4. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Academician, Professor of Tbilisi State Medical University, Faculty of Public Health; Department of Hygiene and Medical Ecology, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0003-0686-5227
5. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. Professor, Dean Faculty of Medicine at East European University, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0001-6695-5924
6. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0003-2189-7470
7. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-5857-6593;
8. MD, Doctor of Family Medicine, Invited Lecturer of Tbilisi State Medical University, Lecturer of Department of Molecular and Medical Genetics, Invited Professor of Biochemistry and Molecular and Medical Genetics at The University of Georgia. Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-6338-4262
9. PhD and BSc in Pharmacy, MSc in Research Methodology in Health Sciences, Professor, Pharmacy Faculty, University of the Basque Country, Spain. https://orcid.org/0000-0002-9109-1088
10. PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Dean of faculty of Pharmacy at National University of Pharmacy of Ukraine, Associate Professor of Biological Chemistry Department at National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-3819-7333
11. MD, PhD, Doctor of Biological Sciences, Academician, Professor, Head of The Biological Chemistry Department at National University of Pharmacy of Ukraine, Kharkiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-6335-2490
12. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor of Department of Pharmacology and Medical Prescription at Kharkiv State Medical University, Kharkiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0002-1971-2863
13. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Academician, Professor of School of Medicine at Grigol Robakidze University, Professor of Tbilisi State Medical University, President of Georgian Association of Health Administrators, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-7218-2697

ABSTRACT

The convergence of translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine represents a transformative paradigm in contemporary oncology, enabling the systematic integration of molecular, genetic, epigenomic, pharmacological, and clinical information into individualized strategies for cancer prevention, diagnosis, prognosis, treatment selection, and long-term disease management. Cancer is increasingly recognized not merely as a collection of anatomically defined diseases but as a dynamically evolving biological system characterized by complex interactions among inherited genetic susceptibility, somatic genomic alterations, epigenetic dysregulation, environmental exposures, metabolic processes, immune responses, tumor microenvironmental factors, and therapeutic pressures. Within this

framework, translational epigenetics provides a critical mechanistic bridge between molecular discoveries and clinical applications by elucidating reversible alterations in DNA methylation, histone modifications, chromatin remodeling, non-coding RNA regulation, and three-dimensional genome organization that influence oncogenic transformation, tumor progression, therapeutic resistance, and disease recurrence. Oncogenetics further strengthens this translational continuum by identifying germline and somatic genomic determinants associated with cancer susceptibility, tumor biology, prognosis, and treatment responsiveness. The integration of oncogenetic information with epigenomic profiles facilitates molecular stratification of patients and supports the identification of clinically actionable biomarkers. Such approaches are fundamental to precision oncology, in which therapeutic decisions are increasingly guided by the molecular characteristics of individual tumors rather than by conventional histopathological classification alone. Precision medicine therefore provides an operational framework through which genomic, transcriptomic, epigenomic, proteomic, metabolic, and clinical phenotypes can be integrated to optimize prevention, early detection, diagnostic classification, risk assessment, therapeutic selection, and monitoring of treatment response. Translational medicine functions as the essential bidirectional interface connecting fundamental biomedical discoveries with clinical investigation and patient-centered healthcare. Its integration with pharmacology and clinical pharmacology enables mechanistic understanding of drug–target interactions, pharmacokinetics, pharmacodynamics, pharmacogenomics, exposure–response relationships, interindividual variability, therapeutic windows, drug–drug interactions, and determinants of treatment toxicity. Pharmacogenomic and epigenetic biomarkers may consequently support individualized drug selection and dosing while reducing avoidable adverse drug reactions and improving therapeutic efficacy. Pharmacotherapy in precision oncology increasingly incorporates targeted molecular agents, immunotherapeutics, endocrine therapies, cytotoxic regimens, epigenetic modifiers, antibody–drug conjugates, cellular therapies, and rational combination strategies, requiring sophisticated assessment of molecular compatibility, resistance mechanisms, patient-specific risk, and dynamic tumor evolution. Evidence-based medicine provides the methodological and epistemological foundation necessary to translate molecular innovation into clinically credible and reproducible healthcare. The integration of high-quality evidence from randomized controlled trials, systematic reviews, meta-analyses, observational studies, molecular diagnostics, real-world evidence, pharmacovigilance databases, and prospective biomarker-driven clinical trials is essential for determining whether theoretically promising molecular interventions generate meaningful improvements in patient outcomes. Importantly, precision oncology must reconcile molecular complexity with clinical validity, analytical validity, therapeutic utility, cost-effectiveness, accessibility, ethical considerations, and health-system implementation. The emerging synthesis of translational epigenetics and oncogenetics with precision and translational medicine therefore establishes a multidimensional framework for personalized cancer care. This framework emphasizes longitudinal molecular profiling, early identification of high-risk individuals, biomarker-guided screening, molecularly informed diagnosis, individualized pharmacotherapy, therapeutic drug monitoring where appropriate, pharmacovigilance, adaptive treatment strategies, and continuous reassessment of tumor evolution. Epigenetic plasticity and clonal evolution additionally highlight the necessity of dynamic rather than static precision medicine models, particularly in the context of acquired resistance and disease relapse. Ultimately, integrating molecular insights with pharmacological principles and rigorous evidence-based clinical reasoning has the potential to transform cancer management from predominantly disease-centered intervention toward predictive, preventive, personalized, participatory, and continuously adaptive care. Such an integrated paradigm may

enhance early cancer detection, improve therapeutic precision, minimize treatment-related harm, address interpatient and intratumoral heterogeneity, and accelerate the responsible translation of molecular discoveries into clinically meaningful advances in personalized cancer prevention, diagnosis, and therapeutic care.

Keywords: Translational Epigenetics; Oncogenetics; Precision Medicine; Personalized Cancer Care; Evidence-Based Pharmacotherapy.

INTRODUCTION

Cancer constitutes one of the most complex and heterogeneous challenges in contemporary biomedicine, reflecting the cumulative consequences of genomic instability, epigenomic remodeling, dysregulated cellular signaling, altered metabolism, immune-system interactions, environmental exposures, inherited susceptibility, and progressive clonal evolution. The conceptual transition from viewing malignancy as a predominantly anatomical or histopathological entity toward understanding cancer as a dynamic molecular ecosystem has fundamentally reshaped modern oncology. Within this evolving paradigm, the integration of translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine provides an intellectually coherent and clinically consequential framework for converting molecular discoveries into individualized strategies for cancer prevention, diagnosis, prognostication, therapeutic selection, treatment optimization, and survivorship care.

The molecular architecture of cancer is characterized by profound interindividual and intratumoral heterogeneity. Distinct tumors arising within the same anatomical organ may possess markedly different genomic alterations, epigenetic states, transcriptomic signatures, metabolic phenotypes, immune landscapes, and therapeutic vulnerabilities. Moreover, a single tumor may contain multiple spatially and temporally evolving subclones, each subject to selective pressures imposed by the host microenvironment and anticancer treatment. This biological complexity challenges conventional one-size-fits-all therapeutic models and establishes a compelling rationale for molecularly informed approaches capable of identifying clinically meaningful sources of variability. Precision medicine accordingly seeks to integrate multidimensional biological and clinical information to determine which preventive, diagnostic, prognostic, and therapeutic interventions are most appropriate for a particular patient at a particular stage of disease.

Translational epigenetics occupies a particularly important position within this framework because epigenetic regulation constitutes a mechanistic interface between genetic information, cellular phenotype, environmental influence, and disease progression. DNA methylation, histone post-translational modifications, chromatin remodeling, nucleosome positioning, enhancer and promoter activity, and non-coding RNA-mediated regulation collectively influence gene expression without necessarily altering the underlying nucleotide sequence. Aberrant epigenetic programming may contribute to malignant transformation through inappropriate silencing of tumor-suppressor pathways, activation of oncogenic programs, disruption of cellular differentiation, alteration of DNA-repair mechanisms, modulation of immune recognition, and establishment of phenotypes associated with drug resistance. The relative reversibility and pharmacological tractability of many epigenetic abnormalities have consequently generated substantial interest in epigenetic biomarkers and therapeutic strategies capable of translating mechanistic discoveries into clinically actionable interventions.

Oncogenetics complements epigenetic investigation by defining the inherited and acquired genetic determinants that contribute to carcinogenesis, tumor evolution, prognosis, and

treatment response. Germline pathogenic variants may identify individuals with increased hereditary cancer susceptibility and thereby support risk-adapted prevention, genetic counseling, intensified surveillance, and selected preventive interventions. Somatic alterations, in contrast, may reveal molecular dependencies that can be therapeutically exploited through targeted agents or incorporated into diagnostic and prognostic classification. The convergence of germline genetics, somatic genomics, and epigenomic characterization therefore enables a more comprehensive molecular representation of malignancy than any single analytical modality can provide.

The clinical value of molecular information, however, depends upon successful translation across multiple stages of biomedical investigation. Translational medicine provides the bidirectional framework through which observations generated in molecular, cellular, animal, and computational systems are evaluated, refined, and ultimately incorporated into human clinical research and healthcare practice. This process requires rigorous biomarker development, analytical validation, clinical validation, assessment of clinical utility, reproducibility, appropriate patient selection, and continuous evaluation of real-world effectiveness. The translational pathway is therefore not simply a linear movement from laboratory discovery to clinical application; rather, it represents an iterative cycle in which clinical observations generate new biological hypotheses while molecular discoveries are continuously tested against clinically meaningful outcomes.

Pharmacology and clinical pharmacology are indispensable components of this translational continuum. Molecular characterization of tumors can identify therapeutic targets, but clinically effective treatment additionally requires understanding drug disposition, pharmacodynamic effects, exposure–response relationships, pharmacogenomic variability, therapeutic windows, drug–drug interactions, organ-function-dependent pharmacokinetics, treatment-related toxicity, and mechanisms of primary or acquired resistance. Pharmacotherapy in contemporary oncology consequently extends beyond the selection of an anticancer molecule according to a molecular target. It encompasses individualized regimen design, rational combination therapy, dose optimization, toxicity prevention and management, treatment sequencing, supportive pharmacotherapy, therapeutic monitoring where clinically justified, and pharmacovigilance throughout the treatment trajectory.

Pharmacogenomics and pharmacogenetics further strengthen individualized pharmacotherapy by clarifying how inherited or acquired biological variation may influence drug efficacy, metabolism, transport, target engagement, and adverse-event susceptibility. Nevertheless, molecular biomarkers should not be interpreted in isolation. Their clinical significance must be established through appropriately designed studies demonstrating analytical reliability, reproducibility, predictive or prognostic relevance, and clinically meaningful utility. The integration of molecular diagnostics with pharmacological reasoning is therefore essential to distinguish biologically interesting findings from biomarkers capable of genuinely improving patient outcomes.

Evidence-based medicine provides the critical evaluative foundation for this increasingly complex molecular-clinical environment. The rapid expansion of genomic and epigenomic technologies creates considerable opportunities but also introduces challenges involving overinterpretation of molecular associations, heterogeneous evidence quality, uncertain clinical actionability, incidental findings, accessibility, cost, and potential inequities in implementation. Robust evidence synthesis requires the integration of randomized controlled trials, prospective biomarker-driven studies, systematic reviews, meta-analyses, observational research, pharmacovigilance evidence, real-world data, and appropriately validated diagnostic investigations. Clinical decisions should consequently reflect not only molecular plausibility

but also the magnitude and certainty of clinical benefit, patient preferences, safety, feasibility, resource utilization, and ethical considerations.

An integrated scientific discourse encompassing translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine therefore offers a comprehensive conceptual architecture for contemporary personalized oncology. Its ultimate objective is to connect molecular complexity with clinically interpretable decisions across the entire cancer continuum, from susceptibility assessment and prevention to early detection, molecular diagnosis, prognostic stratification, treatment selection, response monitoring, resistance management, recurrence prevention, and survivorship. Such integration also necessitates dynamic precision medicine models capable of accommodating tumor evolution, epigenetic plasticity, treatment-induced selection, and changing host factors over time. The present scientific perspective accordingly emphasizes the importance of interdisciplinary convergence, rigorous translational validation, molecularly informed pharmacotherapy, and evidence-based clinical reasoning as mutually reinforcing components of a modern oncology system designed to deliver more predictive, preventive, personalized, effective, safe, and scientifically accountable cancer care.

Molecular-to-Clinical Integration in Contemporary Oncology

The maturation of cancer biology has demonstrated that malignant transformation cannot be adequately explained by isolated genetic lesions or by single molecular pathways considered independently. Rather, oncogenesis emerges from interconnected alterations across regulatory networks in which genetic mutations, epigenetic remodeling, transcriptional reprogramming, metabolic adaptation, immune dysregulation, and microenvironmental signaling interact over time. This systems-level perspective has important implications for translational research because clinically meaningful phenotypes frequently arise from combinations of molecular events rather than from individual biomarkers. Consequently, contemporary oncology increasingly requires integrative analytical frameworks capable of connecting molecular architecture with cellular behavior, therapeutic vulnerability, disease trajectory, and patient-level outcomes.

Within translational epigenetics, particular attention has been directed toward the mechanisms through which environmental and cellular signals become biologically embedded within regulatory states that influence malignant phenotypes. Aberrant DNA methylation patterns, altered histone landscapes, dysregulated chromatin accessibility, enhancer reprogramming, and non-coding RNA networks may participate in tumor initiation and progression while simultaneously contributing to phenotypic plasticity. Importantly, epigenetic abnormalities may cooperate with genetic alterations, thereby generating stable yet potentially reversible cellular states. This characteristic has substantial therapeutic relevance because epigenetic mechanisms may represent both biomarkers of disease biology and pharmacologically modifiable determinants of treatment response. The translational challenge is to establish which epigenetic signatures are reproducible, clinically informative, and sufficiently validated to guide intervention rather than merely serving as molecular correlates of malignancy.

The oncogenetic dimension of personalized oncology similarly extends beyond the identification of individual driver mutations. Modern genomic investigation encompasses germline susceptibility, somatic mutational landscapes, structural variants, copy-number alterations, DNA-repair defects, mutational signatures, and mechanisms of genomic instability. These molecular characteristics may inform hereditary risk assessment, tumor classification, prognosis, therapeutic eligibility, and resistance prediction. However, the increasing availability of genomic information also necessitates sophisticated clinical interpretation. A

molecular alteration may be biologically significant without being therapeutically actionable, while the absence of an established alteration does not necessarily exclude clinical benefit from a particular treatment. Therefore, genomic findings must be contextualized within disease phenotype, treatment history, tumor evolution, available evidence, and the therapeutic objectives of the individual patient.

Precision medicine consequently represents a process of structured clinical integration rather than merely an advanced form of molecular testing. Its effectiveness depends upon the capacity to transform complex biological measurements into clinically interpretable decisions. This transformation requires standardized specimen acquisition, analytical quality control, validated diagnostic platforms, bioinformatic interpretation, clinically relevant classification of molecular findings, multidisciplinary review, and communication of results in a manner that supports shared decision-making. In oncology, precision medicine is particularly dependent upon temporal considerations because molecular characteristics may change during disease progression and under therapeutic selection. Serial assessment may therefore become necessary when the molecular state of a malignancy at diagnosis no longer accurately represents the biology of residual or recurrent disease.

The dynamic nature of tumor evolution provides a central rationale for integrating molecular surveillance with pharmacological decision-making. Therapeutic exposure can exert selective pressure that eliminates sensitive subclones while permitting expansion of resistant populations. Resistance may arise through secondary genomic alterations, pathway bypass, target modification, altered drug transport, metabolic adaptation, phenotypic switching, epigenetic reprogramming, or changes within the tumor microenvironment. These mechanisms demonstrate why therapeutic failure should not automatically be interpreted as evidence that the original molecular hypothesis was incorrect. Instead, treatment resistance may reflect biological evolution under selection and therefore require renewed molecular characterization, pharmacological reassessment, and modification of therapeutic strategy.

Clinical pharmacology provides a critical framework for this adaptive process by connecting molecular determinants of disease with quantitative principles governing drug exposure and response. Pharmacokinetics describes the processes influencing absorption, distribution, metabolism, and elimination, whereas pharmacodynamics characterizes the relationship between drug exposure and biological or clinical effects. In oncology, these principles intersect with tumor burden, organ function, genetic variation, concomitant medications, treatment combinations, immune status, and disease-associated physiological changes. Interindividual variability in exposure may influence both efficacy and toxicity, emphasizing the importance of appropriate dose selection and, for selected therapies, therapeutic drug monitoring. Pharmacogenomic information can further refine these decisions when validated associations demonstrate clinically relevant effects on drug disposition or response.

The pharmacotherapeutic implications of molecular stratification are particularly significant as oncology increasingly incorporates targeted agents and biologically complex therapies. Treatment selection must consider not only whether a molecular target is present but also the functional relevance of that target, the degree of target dependence, the accessibility of the tumor compartment, potential resistance mechanisms, combination strategies, toxicity profiles, and the strength of clinical evidence. Molecularly matched therapy should therefore be understood as a hypothesis-driven intervention whose clinical value must be demonstrated through rigorous prospective evaluation. This principle guards against the assumption that molecular matching alone guarantees therapeutic success and reinforces the central role of evidence-based clinical pharmacology.

Evidence-based medicine further requires that precision oncology maintain a disciplined distinction between biological plausibility, statistical association, clinical validity, and demonstrated patient benefit. Biomarker development should proceed through appropriately staged investigation, including discovery, analytical validation, clinical validation, assessment of predictive or prognostic performance, and evaluation of clinical utility. The hierarchy and applicability of evidence must be considered carefully because highly selected clinical trials may not fully represent the diversity of patients encountered in routine practice. Real-world evidence, registries, observational cohorts, pharmacovigilance systems, and implementation research can therefore complement randomized evidence by clarifying effectiveness, safety, treatment persistence, healthcare utilization, and outcomes across broader patient populations.

Another fundamental consideration is the ethical and societal dimension of molecularly individualized cancer care. Genomic and epigenomic testing may generate sensitive information concerning hereditary susceptibility, familial risk, incidental findings, and future disease probability. Responsible implementation consequently requires appropriate informed consent, genetic counseling when indicated, data governance, privacy protection, equitable access, and transparent communication of uncertainty. Precision medicine should not become synonymous with technologically intensive medicine available only to populations with substantial economic or geographic advantages. Its scientific legitimacy is strengthened when molecular innovation is accompanied by strategies addressing affordability, accessibility, health literacy, infrastructure, and equitable implementation.

The integration of translational epigenetics with oncogenetics and clinical pharmacology also creates opportunities for prevention-oriented oncology. Identification of inherited susceptibility and molecularly defined high-risk states may enable intensified surveillance and individualized preventive strategies before invasive malignancy develops. Epigenetic biomarkers obtained from accessible biological specimens may potentially contribute to early detection and risk stratification, although their clinical implementation requires rigorous validation to avoid false-positive diagnoses, overdiagnosis, and unnecessary intervention. Thus, the preventive application of molecular oncology must remain firmly anchored in evidence concerning clinical benefit, diagnostic performance, harms, and patient-centered outcomes.

The molecular-to-clinical continuum in oncology is best conceptualized as an iterative learning system. Fundamental discoveries generate biomarkers and therapeutic hypotheses; translational studies establish mechanistic and clinical relevance; pharmacological investigations define exposure, response, and safety; clinical trials determine efficacy and comparative benefit; evidence synthesis evaluates certainty; and real-world implementation reveals effectiveness across heterogeneous populations. Clinical observations then return to the laboratory as new questions concerning resistance, toxicity, disease recurrence, and biological heterogeneity. This reciprocal process constitutes the intellectual foundation of translational oncology and supports a continuously evolving model of personalized cancer care in which molecular knowledge is integrated with pharmacological expertise, rigorous clinical evidence, and individualized patient needs.

Integrative Framework for Personalized Cancer Prevention, Diagnosis, and Therapeutic Care

The transition toward molecularly individualized oncology requires a conceptual framework in which cancer prevention, diagnosis, treatment, and longitudinal disease management are considered components of a single interconnected continuum rather than isolated clinical activities. Such a framework recognizes that molecular determinants of cancer risk may precede the appearance of clinically detectable disease by years or decades, while the molecular characteristics of established malignancy may continue to evolve throughout treatment.

Consequently, translational epigenetics and oncogenetics should be incorporated not only into therapeutic decision-making but also into population risk stratification, hereditary cancer assessment, surveillance strategies, early detection, and prevention-oriented interventions. The ultimate objective is to identify biologically meaningful risk states sufficiently early to permit evidence-based intervention before irreversible malignant progression occurs.

At the diagnostic level, integration of molecular pathology with conventional clinical and morphological assessment enables progressively refined characterization of malignant disease. Histopathology, immunophenotyping, cytogenetics, next-generation sequencing, transcriptomic analysis, epigenomic profiling, and selected circulating biomarkers may provide complementary information concerning tumor identity, lineage, molecular subtype, prognosis, and therapeutic vulnerability. The appropriate integration of these modalities requires recognition that no single platform universally captures the complete biological complexity of a tumor. Multidimensional diagnostics may therefore provide greater resolution, particularly when conventional classification does not adequately explain disease behavior or when treatment selection depends upon specific molecular characteristics.

The incorporation of liquid biopsy and circulating tumor-derived biomarkers represents an additional dimension of translational oncology. Analysis of circulating tumor DNA, circulating tumor cells, cell-free DNA methylation patterns, extracellular vesicle-associated molecules, and other circulating analytes may facilitate minimally invasive assessment of tumor burden, molecular evolution, residual disease, and emerging resistance. Nevertheless, the clinical implementation of such technologies must be guided by analytical performance, sensitivity, specificity, reproducibility, preanalytical standardization, and demonstrated clinical utility. A sophisticated molecular assay cannot substitute for clinical validation; rather, technological innovation becomes clinically meaningful only when it produces information that improves patient management or outcomes.

Therapeutic personalization represents the next major stage of this continuum. Molecularly informed treatment selection should incorporate actionable genomic and epigenomic alterations together with tumor lineage, disease stage, prior therapies, comorbid conditions, organ function, concomitant medications, patient preferences, and anticipated benefit–risk relationships. Pharmacology provides the mechanistic basis for understanding how therapeutic agents interact with molecular targets, while clinical pharmacology translates these mechanisms into individualized dosing, exposure assessment, toxicity prediction, and treatment monitoring. This integrated approach is especially important in complex regimens in which pharmacokinetic interactions, overlapping toxicities, immune-mediated effects, or variable treatment exposure may substantially influence clinical outcomes.

The concept of pharmacological precision must therefore extend beyond target identification. Effective personalized pharmacotherapy requires consideration of the complete drug–patient–tumor system. Drug efficacy may depend upon target expression, target accessibility, downstream pathway integrity, cellular uptake, intracellular metabolism, transporter activity, immune contexture, and the presence of compensatory signaling mechanisms. Similarly, toxicity may be determined by host genetics, organ function, age-related physiological variation, drug interactions, cumulative exposure, and patient-specific susceptibility. Clinical pharmacology consequently serves as a critical translational discipline capable of integrating quantitative pharmacokinetics and pharmacodynamics with molecular and clinical phenotyping.

Epigenetic therapeutics further illustrate the importance of this integrated approach. Agents directed against DNA methyltransferases, histone-modifying enzymes, chromatin-associated proteins, and other regulatory mechanisms may alter malignant cellular states and potentially

restore sensitivity to other anticancer interventions. However, epigenetic modulation is inherently context-dependent, and therapeutic effects may vary according to tumor lineage, molecular background, treatment schedule, disease stage, and combination strategy. The rational development of epigenetic pharmacotherapy therefore requires mechanistic biomarkers, dose–response characterization, pharmacodynamic assessment, careful toxicity evaluation, and prospective clinical validation. The objective is not simply to modify an epigenetic mark but to produce a clinically relevant alteration in tumor behavior or patient outcome.

Immuno-oncology provides another example of the necessity for multidimensional precision. The response to immune checkpoint inhibitors and related therapies depends upon complex interactions among tumor antigenicity, genomic instability, antigen presentation, immune-cell composition, cytokine signaling, stromal characteristics, and systemic host factors. Conventional biomarkers may therefore provide incomplete predictive information when considered independently. Integrating genomic, epigenomic, transcriptomic, immunological, and clinical characteristics may facilitate more refined patient stratification, although the predictive performance and reproducibility of proposed composite biomarkers require rigorous investigation. Precision immunotherapy consequently illustrates the broader principle that personalized treatment increasingly depends upon systems-level characterization rather than single-marker classification.

A further priority is the integration of pharmacovigilance into precision oncology. As increasingly complex targeted therapies, immunotherapies, combination regimens, and molecularly selected treatments enter clinical practice, post-marketing safety surveillance becomes essential for identifying rare, delayed, cumulative, or population-specific adverse events that may not be fully characterized in preauthorization trials. Pharmacovigilance data can be enriched through molecular annotation, enabling investigation of whether genetic, epigenetic, demographic, or clinical characteristics contribute to susceptibility to specific adverse drug reactions. Such integration may ultimately support more precise benefit–risk assessment and strengthen the feedback loop between clinical pharmacology, regulatory science, and evidence-based therapeutic practice.

The implementation of personalized oncology also depends upon health-system capacity. Molecular diagnostics require appropriately equipped laboratories, validated technologies, qualified personnel, bioinformatics infrastructure, multidisciplinary interpretation, secure data systems, and pathways for translating test results into timely clinical decisions. Without these components, molecular information may accumulate without producing proportional clinical benefit. Translational medicine must therefore encompass implementation science, organizational readiness, workforce development, health economics, and evaluation of access. The success of precision oncology should ultimately be measured not by the volume of molecular data generated but by the extent to which validated information improves clinically meaningful outcomes for diverse patient populations.

An evidence-based precision oncology model must additionally recognize uncertainty as an intrinsic characteristic of molecular medicine. Many genomic and epigenomic findings have incomplete evidence regarding pathogenicity, prognostic significance, or therapeutic actionability. Clinical interpretation should therefore distinguish established biomarkers from investigational signals and avoid overstatement of uncertain findings. Molecular tumor boards, multidisciplinary consultation, structured evidence classification, and transparent communication can assist clinicians and patients in interpreting complex results. Shared decision-making becomes particularly important when evidence is limited, therapeutic options

carry substantial toxicity, or molecularly matched interventions are available only through clinical trials or specialized treatment pathways.

From a translational perspective, the most consequential advances will likely arise from the convergence of multiple disciplines rather than from isolated technological innovation. Epigenetic science can reveal regulatory mechanisms; oncogenetics can identify susceptibility and molecular drivers; pharmacology can define drug–target relationships; clinical pharmacology can quantify exposure and response; pharmacotherapy can operationalize therapeutic strategies; translational medicine can facilitate movement between experimental and clinical domains; and evidence-based medicine can determine whether proposed interventions provide reliable patient benefit. Their integration establishes a coherent scientific architecture in which molecular knowledge is continuously evaluated against clinical outcomes and refined through iterative learning.

Accordingly, personalized cancer care should be conceptualized as a dynamic, longitudinal, and evidence-generating process. Prevention strategies may be modified according to evolving risk estimates; diagnostic classification may be refined through increasingly comprehensive molecular characterization; treatment may be adapted according to pharmacological response and emerging resistance; and post-treatment surveillance may incorporate molecular indicators of recurrence when clinically validated. This approach transforms precision medicine from a static classification exercise into an adaptive clinical methodology. Its ultimate promise lies in aligning biological specificity with therapeutic proportionality: providing the right intervention, for the appropriate molecular and clinical context, at the appropriate time, with continuous assessment of efficacy, safety, patient-centered benefit, and evidentiary certainty.

Future Directions and Emerging Paradigms in Translational Precision Oncology

The future development of personalized oncology will increasingly depend upon the convergence of high-dimensional molecular profiling, artificial intelligence, computational biology, advanced pharmacology, longitudinal clinical phenotyping, and real-world evidence. As the volume and complexity of molecular information expand, conventional interpretive frameworks may become insufficient for integrating genomic, epigenomic, transcriptomic, proteomic, metabolomic, immunological, radiological, and clinical datasets simultaneously. Artificial intelligence and machine-learning methodologies may facilitate multidimensional pattern recognition, biomarker discovery, molecular classification, prediction of therapeutic response, identification of resistance trajectories, and optimization of clinical decision support. Nevertheless, computational sophistication must remain subordinate to clinical validity, interpretability, reproducibility, external validation, and demonstrable patient benefit.

Single-cell and spatially resolved technologies are also reshaping the understanding of tumor heterogeneity by enabling molecular characterization at increasingly fine biological resolution. These approaches can reveal distinct malignant subpopulations, immune-cell states, stromal interactions, spatially restricted signaling networks, and epigenetic states that may be obscured in bulk tissue analyses. Their translational importance lies in clarifying how cellular ecosystems influence therapeutic response and disease progression. Integration of single-cell and spatial information with pharmacological data may eventually support treatment strategies directed not only against dominant tumor populations but also against resistant cellular niches capable of sustaining relapse.

Organoid systems, patient-derived models, and other advanced experimental platforms provide complementary opportunities for functional precision medicine. These models may allow candidate therapies or combinations to be evaluated against patient-specific biological material before clinical administration. Although substantial methodological and translational

limitations remain, functional testing may complement genomic matching by determining whether a molecularly plausible intervention produces an observable therapeutic phenotype. The integration of molecular diagnostics with functional pharmacology could therefore strengthen treatment selection in clinically challenging settings where conventional biomarkers provide insufficient predictive information.

Another emerging priority is the development of adaptive clinical-trial architectures. Traditional trials frequently evaluate therapeutic efficacy within relatively fixed molecular and clinical categories, whereas rapidly evolving precision oncology requires designs capable of incorporating new biomarkers, treatment arms, resistance mechanisms, and accumulating evidence. Basket, umbrella, platform, master-protocol, and biomarker-adaptive approaches may facilitate more efficient evaluation of molecularly defined interventions. Their scientific value depends upon rigorous statistical methodology, appropriate control groups, transparent endpoint definitions, adequate follow-up, and careful interpretation of subgroup effects. Such trial innovation may accelerate the translation of molecular discoveries while preserving the methodological rigor required by evidence-based medicine.

The future of translational epigenetics will similarly require movement from descriptive association toward mechanistic and clinically actionable understanding. Large-scale epigenomic mapping can identify patterns associated with tumor phenotype, environmental exposure, treatment response, or prognosis, but clinical translation requires demonstration that modifying the relevant biological mechanism changes meaningful outcomes. Integrating epigenomic signatures with functional assays, longitudinal sampling, pharmacodynamic biomarkers, and therapeutic-response data may clarify which epigenetic alterations represent causal drivers, adaptive states, or secondary consequences of malignant transformation. This distinction is essential for rational drug development and for avoiding premature clinical adoption of inadequately validated biomarkers.

The integration of prevention science with precision oncology represents another major frontier. Molecular risk stratification may permit more individualized surveillance and prevention pathways, particularly when inherited susceptibility, environmental exposure, lifestyle factors, and validated molecular biomarkers can be evaluated together. However, intensified screening or preventive intervention should be introduced only when evidence demonstrates that improved risk identification translates into meaningful clinical benefit without disproportionate harms. Precision prevention must therefore remain grounded in rigorous epidemiological methodology, health-economic evaluation, ethical governance, and equitable access.

Digital health and longitudinal data integration may further transform personalized cancer care. Continuous collection of clinically relevant information through electronic health records, remote monitoring, patient-reported outcomes, imaging, laboratory measurements, and treatment histories can create dynamic patient representations that complement episodic molecular testing. When appropriately validated and governed, these data streams may support earlier detection of toxicity, treatment-response assessment, adherence evaluation, symptom management, and individualized therapeutic adjustment. The resulting model moves oncology toward a continuously learning clinical environment in which molecular and clinical information are updated throughout the disease trajectory.

Equally important is the development of molecularly informed pharmacovigilance. Linking adverse drug-event data with genomic, epigenomic, pharmacokinetic, and clinical characteristics may facilitate identification of patient populations at elevated risk for specific toxicities. Such approaches could improve risk minimization and support individualized treatment selection, particularly for therapies with narrow therapeutic windows or substantial interindividual variability. Future pharmacovigilance systems may therefore evolve from

predominantly reactive surveillance toward predictive safety science in which validated biological characteristics contribute prospectively to benefit–risk assessment.

The responsible development of precision oncology additionally requires robust governance of molecular data. Genomic and epigenomic datasets possess implications not only for individual patients but potentially for biological relatives and future healthcare decisions. Secure data infrastructure, appropriate consent models, transparent secondary-use policies, controlled access, cybersecurity, and responsible data-sharing frameworks are consequently integral to translational research. Ethical governance should evolve alongside technological capabilities so that the expansion of molecular medicine does not undermine autonomy, privacy, trust, or social equity.

Collectively, these developments suggest that the next generation of oncology will increasingly operate as an integrated molecular-clinical learning system. Translational epigenetics will contribute mechanistic understanding of regulatory plasticity; oncogenetics will define inherited and somatic determinants of disease; precision medicine will organize molecular information for individualized decisions; pharmacology and clinical pharmacology will quantify therapeutic exposure and biological response; pharmacotherapy will implement rational treatment strategies; translational medicine will connect experimental discoveries with clinical applications; and evidence-based medicine will determine the certainty, effectiveness, safety, and applicability of emerging interventions. The central scientific challenge will be to ensure that increasing molecular complexity produces greater clinical clarity rather than information overload.

The objective is therefore not maximal molecular characterization for its own sake, but clinically purposeful integration. A successful translational precision-oncology framework should identify meaningful risk, detect disease at biologically actionable stages, classify tumors with sufficient accuracy to guide management, select therapies according to validated molecular and clinical determinants, anticipate toxicity and resistance, monitor evolving disease, and continuously reassess therapeutic benefit. Achieving this objective will require sustained interdisciplinary collaboration among molecular biologists, geneticists, epigeneticists, pharmacologists, clinical pharmacologists, oncologists, pathologists, bioinformaticians, epidemiologists, statisticians, pharmacovigilance specialists, implementation scientists, ethicists, and patients. Through such convergence, translational oncology can progressively transform molecular knowledge into evidence-based, patient-centered, adaptive, and equitable cancer prevention, diagnosis, and therapeutic care.

BACKGROUND

The contemporary scientific landscape of cancer research is increasingly characterized by the convergence of molecular biology, epigenetics, oncogenetics, pharmacology, clinical pharmacology, precision medicine, translational medicine, and evidence-based healthcare. This interdisciplinary convergence reflects a fundamental transformation in the conceptualization of malignant disease—from a predominantly histopathological and anatomically defined condition toward a biologically heterogeneous, molecularly stratified, dynamically evolving systemic disorder. Within this paradigm, cancer development and progression are understood as consequences of complex interactions among genetic alterations, epigenetic dysregulation, environmental exposures, metabolic states, immune mechanisms, cellular signaling networks, and host-specific determinants. Such a multidimensional understanding has created an increasingly sophisticated scientific foundation for personalized approaches to cancer prevention, early detection, molecular diagnosis, therapeutic selection, treatment monitoring, and survivorship care.

Epigenetic regulation represents a particularly important component of this emerging framework because it provides a mechanistic interface between inherited genetic information and environmentally responsive cellular phenotypes. Epigenetic processes—including DNA methylation, histone post-translational modifications, chromatin remodeling, nucleosome positioning, and non-coding RNA-mediated regulation—are essential for controlling gene expression without necessarily altering the underlying nucleotide sequence. Aberrant epigenetic programming may contribute to oncogenesis through inappropriate activation of oncogenic pathways, transcriptional silencing of tumor-suppressor genes, disruption of DNA-damage responses, alterations in cellular differentiation, and modulation of tumor–immune interactions. Importantly, many epigenetic abnormalities are potentially reversible, thereby distinguishing epigenetic dysregulation from irreversible genomic mutations and creating a biologically compelling rationale for therapeutic intervention.

The emergence of **translational epigenetics** has consequently expanded the role of epigenomic research beyond mechanistic investigation toward clinically actionable applications. Translational epigenetics seeks to convert discoveries concerning epigenetic mechanisms into biomarkers, preventive interventions, diagnostic platforms, prognostic indicators, therapeutic targets, and pharmacological strategies. Epigenetic signatures detectable in tumor tissue, circulating cell-free DNA, extracellular vesicles, and other biological matrices may facilitate earlier identification of malignant transformation and provide information concerning disease subtype, prognosis, treatment responsiveness, and acquired resistance. The integration of epigenomic profiles with genomic, transcriptomic, proteomic, metabolomic, and clinical datasets further enables the development of multidimensional molecular classifications capable of capturing biological heterogeneity more effectively than conventional clinicopathological categorization.

In parallel, **oncogenetics** has substantially transformed understanding of cancer susceptibility and carcinogenesis. Germline pathogenic variants in cancer-predisposition genes may substantially influence individual risk and have important implications for genetic counseling, surveillance, risk-reducing interventions, and family-based preventive strategies. Somatic genomic alterations, by contrast, can provide information about the molecular architecture of established malignancies and identify therapeutically actionable abnormalities. The increasing availability of next-generation sequencing, comprehensive genomic profiling, liquid biopsy technologies, and computational bioinformatics has therefore facilitated the transition from generalized cancer management toward molecularly informed disease characterization. Nevertheless, the interpretation of genomic and epigenomic information remains complex because molecular alterations frequently exhibit context-dependent biological significance, variable penetrance, temporal evolution, and heterogeneous relationships with therapeutic response.

These developments constitute a principal scientific foundation of **precision medicine**, which seeks to individualize healthcare according to biologically meaningful characteristics of patients and their diseases. In oncology, precision medicine integrates molecular biomarkers with demographic, clinical, pathological, pharmacological, and potentially environmental information to support individualized clinical decision-making. Rather than assuming that patients with the same anatomical cancer diagnosis will respond similarly to a particular intervention, precision oncology recognizes substantial interindividual and intratumoral variability. Molecular stratification can therefore identify clinically relevant subgroups, guide targeted treatment selection, refine risk assessment, and support adaptive treatment strategies. However, precision medicine should not be conceptualized exclusively as genomic medicine; rather, it represents a broader systems-level framework in which molecular information is

integrated with clinical phenotypes, therapeutic evidence, patient characteristics, and real-world outcomes.

The development of **translational medicine** provides the organizational and methodological framework through which these molecular discoveries can be transferred from laboratory investigation into clinical practice. Translational medicine encompasses bidirectional movement between basic science and patient-centered research, emphasizing the conversion of mechanistic discoveries into clinically relevant diagnostics, therapeutics, preventive interventions, and healthcare strategies. In oncology, this process is particularly important because promising molecular discoveries frequently encounter substantial translational barriers, including biological heterogeneity, inadequate validation, differences between experimental models and human tumors, therapeutic resistance, toxicity, limited biomarker reproducibility, and challenges in integrating complex molecular information into routine clinical workflows. Effective translation therefore requires coordinated interaction among molecular scientists, pharmacologists, clinicians, bioinformaticians, geneticists, epidemiologists, statisticians, and healthcare policymakers.

Within this translational continuum, **pharmacology and clinical pharmacology** occupy a central position. Pharmacology provides the mechanistic foundation for understanding drug–target interactions, receptor and signaling biology, pharmacodynamic effects, pharmacokinetics, toxicity, and therapeutic mechanisms. Clinical pharmacology extends these principles to human populations by examining variability in drug exposure, response, safety, metabolism, drug–drug interactions, therapeutic windows, and patient-specific determinants of treatment outcomes. In oncology, the integration of pharmacological science with oncogenetic and epigenetic information has created opportunities to identify molecular determinants of drug sensitivity and resistance. Pharmacogenomics and pharmacogenetics can further contribute to individualized dosing and treatment selection by identifying genetic variation affecting drug metabolism, transport, pharmacodynamics, and toxicity.

Pharmacotherapy consequently represents the practical clinical expression of molecularly informed therapeutic principles. Contemporary anticancer pharmacotherapy increasingly encompasses cytotoxic chemotherapy, endocrine therapy, molecularly targeted agents, immunotherapeutics, antibody-based treatments, cellular therapies, and epigenetically directed drugs. Epigenetic therapeutics, including inhibitors of DNA methyltransferases, histone deacetylases, and other chromatin-regulatory proteins, have demonstrated the clinical feasibility of pharmacologically modifying aberrant epigenetic states. Their therapeutic relevance extends beyond direct cytotoxicity because epigenetic interventions may alter cellular differentiation, restore expression of silenced tumor-suppressor pathways, modify immune recognition, and potentially enhance sensitivity to other anticancer modalities. Consequently, rational combination strategies involving epigenetic agents, targeted therapies, immunotherapies, and conventional treatments represent an important area of translational oncology research.

Nevertheless, molecularly sophisticated therapeutic approaches must remain embedded within the principles of **evidence-based medicine (EBM).** Molecular plausibility alone cannot establish clinical effectiveness or justify widespread therapeutic implementation. Evidence-based oncology requires systematic integration of high-quality research evidence with clinical expertise and patient-centered considerations. Randomized controlled trials, prospective biomarker validation, systematic reviews, meta-analyses, comparative effectiveness research, real-world evidence, pharmacovigilance, and health-economic evaluation are essential for determining whether molecularly personalized interventions produce meaningful improvements in survival, quality of life, safety, or other clinically relevant outcomes. This

perspective is particularly important because the increasing complexity of precision oncology may generate biomarkers or therapeutic strategies whose biological significance exceeds their demonstrated clinical utility.

The integration of translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine therefore represents a multidimensional scientific paradigm for modern cancer care. It establishes a continuum extending from molecular mechanisms and inherited susceptibility through early detection, diagnostic stratification, therapeutic discovery, individualized treatment selection, pharmacological optimization, monitoring of therapeutic response, and longitudinal evaluation of clinical outcomes. Such integration also recognizes cancer as an evolutionary and dynamically adaptive disease in which genomic and epigenomic landscapes may change during progression and under therapeutic pressure. Consequently, personalized cancer management increasingly requires repeated molecular characterization, longitudinal biomarker assessment, and adaptive therapeutic decision-making rather than reliance upon a static diagnosis established at a single time point.

From a preventive perspective, this interdisciplinary framework may facilitate identification of individuals at elevated cancer risk through the integration of hereditary susceptibility, molecular biomarkers, environmental exposures, and lifestyle determinants. In diagnosis, molecular and epigenetic technologies may improve disease detection, biological classification, prognostic assessment, and identification of actionable therapeutic targets. In treatment, pharmacological and pharmacogenomic knowledge can support individualized therapeutic selection, dosing optimization, toxicity reduction, and rational combination strategies. In follow-up care, molecular surveillance and pharmacovigilance can contribute to early recognition of recurrence, treatment resistance, adverse drug reactions, and long-term therapeutic consequences.

The scientific discourse surrounding translational epigenetics and precision oncology is no longer confined to individual molecular disciplines. Its principal challenge is the construction of an integrated translational ecosystem in which mechanistic discoveries are analytically validated, clinically interpreted, pharmacologically evaluated, and ultimately incorporated into evidence-based patient care. The future of personalized oncology will therefore depend not merely on the accumulation of increasingly sophisticated molecular data, but on the capacity to transform such information into reproducible, clinically meaningful, ethically responsible, economically sustainable, and patient-centered interventions. This integrated perspective provides the conceptual foundation for advancing cancer prevention, molecular diagnosis, therapeutic precision, and individualized clinical care while maintaining rigorous standards of pharmacological science and evidence-based medicine.

Translational Integration of Molecular and Clinical Knowledge

The increasing convergence of epigenomic, genomic, pharmacological, and clinical sciences has generated a new translational architecture in which molecular information is progressively incorporated into the entire cancer-care pathway. This architecture requires more than the identification of molecular abnormalities; it requires rigorous characterization of their biological function, analytical validity, clinical validity, clinical utility, and therapeutic relevance. A molecular biomarker becomes clinically meaningful only when its measurement is sufficiently reliable, its association with a clinically relevant phenotype is reproducible, and its application demonstrably improves decision-making or patient outcomes. Accordingly, translational oncology must distinguish biological significance from actionable clinical

significance and must continuously evaluate whether increasingly complex molecular classifications provide measurable advantages over established diagnostic and therapeutic approaches.

A particularly important dimension of this process is the integration of **multi-omics medicine**. Genomic sequencing identifies alterations in DNA sequence, whereas epigenomic analyses characterize regulatory modifications that influence gene expression and cellular phenotype. Transcriptomic, proteomic, metabolomic, and single-cell approaches provide additional layers of information concerning functional consequences, cellular heterogeneity, signaling activity, metabolic adaptation, and interactions within the tumor microenvironment. Integrating these datasets through computational biology, systems medicine, artificial intelligence, and advanced statistical methodologies may enable more comprehensive representations of tumor biology. Such approaches are especially relevant for cancers characterized by pronounced intratumoral heterogeneity, clonal evolution, phenotypic plasticity, and variable therapeutic sensitivity.

The tumor microenvironment further emphasizes the necessity of an integrated scientific perspective. Malignant cells interact continuously with immune cells, fibroblasts, endothelial cells, extracellular-matrix components, cytokine networks, metabolic substrates, and vascular structures. Epigenetic mechanisms can influence these interactions by regulating immune-cell differentiation, inflammatory signaling, antigen presentation, and expression of immune-modulatory molecules. Consequently, epigenetic alterations may affect not only intrinsic tumor-cell behavior but also the capacity of the immune system to recognize and eliminate malignant cells. This provides a mechanistic rationale for investigating combinations of epigenetically active pharmacotherapies with immunotherapeutic and targeted approaches, while simultaneously emphasizing the need for biomarker-driven clinical evaluation of such combinations.

Pharmacological Personalization and Therapeutic Optimization

The pharmacological dimension of precision oncology is fundamentally concerned with explaining and managing variability in therapeutic response. Two patients with apparently similar malignancies may exhibit markedly different drug exposure, pharmacodynamic responses, adverse-effect profiles, and clinical outcomes. Such variability may arise from genetic polymorphisms, epigenetic states, organ function, age-related physiological changes, concomitant medications, immune status, tumor biology, nutritional factors, and disease-associated alterations in drug metabolism or transport. Clinical pharmacology therefore provides an essential interpretive framework for translating molecular characteristics into individualized therapeutic strategies.

Pharmacogenomics and pharmacogenetics can contribute to this objective by identifying inherited or acquired molecular determinants of drug response. However, pharmacogenomic information should be interpreted within the broader context of pharmacokinetics and pharmacodynamics. A genotype alone does not invariably predict therapeutic outcome because drug response is frequently determined by multiple interacting biological and clinical variables. Consequently, precision pharmacotherapy should integrate genomic and epigenomic biomarkers with therapeutic drug monitoring, drug-interaction assessment, organ-function evaluation, pharmacokinetic modeling, pharmacodynamic biomarkers, and longitudinal clinical observation whenever appropriate.

The concept of **pharmacoepigenomics** further expands this framework by examining how epigenetic variation influences drug disposition, drug targets, therapeutic response, and toxicity, while also considering how pharmacological agents can modify epigenetic states. This bidirectional relationship creates important opportunities for therapeutic innovation. Epigenetic

mechanisms may contribute to primary resistance, acquired resistance, disease recurrence, and differential susceptibility to targeted agents or immunotherapies. Conversely, pharmacological modulation of epigenetic pathways may reprogram malignant cells and alter their responsiveness to other treatments. The clinical translation of these concepts requires careful dose optimization, combination-rationale assessment, toxicity characterization, and prospective validation in appropriately designed clinical trials.

Biomarker Development, Early Detection, and Dynamic Disease Monitoring

The application of molecular biomarkers to cancer prevention and diagnosis represents another major component of translational epigenetics. Conventional diagnostic approaches remain indispensable, but molecular biomarkers may provide additional information concerning cancer susceptibility, early malignant transformation, tumor subtype, prognosis, minimal residual disease, recurrence, and treatment response. Circulating tumor DNA and other liquid-biopsy approaches are particularly attractive because they may permit minimally invasive longitudinal sampling. Epigenetic signatures within circulating nucleic acids may complement genomic alterations and potentially increase the biological resolution of disease monitoring.

Nevertheless, biomarker development requires stringent analytical and clinical validation. Reproducibility across laboratories, assay standardization, appropriate reference populations, sensitivity and specificity, predictive values, preanalytical variability, and clinically meaningful thresholds must be carefully established. In addition, biomarkers intended for screening must demonstrate benefits that outweigh potential harms associated with false-positive findings, overdiagnosis, unnecessary diagnostic procedures, and treatment-related consequences. Therefore, translational epigenetic biomarkers should be evaluated within a rigorous evidence hierarchy rather than adopted solely on the basis of mechanistic plausibility or technological novelty.

Dynamic molecular monitoring also supports the conceptualization of cancer as an evolving biological system. Genomic and epigenomic alterations may emerge under selective pressure generated by tumor progression, immune surveillance, and anticancer treatment. Molecular changes associated with resistant clones may therefore become detectable before overt clinical progression. Serial molecular profiling has the potential to provide an earlier indication of therapeutic failure and facilitate adaptive treatment strategies. However, the clinical value of such approaches depends on prospective evidence demonstrating that molecularly guided intervention based on dynamic biomarkers improves patient outcomes rather than merely increasing the amount of available biological information.

Evidence Generation and Clinical Implementation

The transition from molecular discovery to clinical application requires an evidence-generating continuum encompassing exploratory laboratory research, translational validation, early-phase clinical investigation, randomized comparative trials, post-marketing surveillance, and real-world effectiveness assessment. This continuum is essential because the biological complexity of cancer creates substantial uncertainty between molecular target identification and demonstrable patient benefit. Therapeutic efficacy must therefore be distinguished from surrogate biomarker activity, and statistically significant molecular or radiographic changes must ultimately be evaluated in relation to survival, symptom control, functional status, quality of life, toxicity, and patient-centered outcomes.

Evidence-based medicine provides the methodological and ethical framework for resolving these uncertainties. In precision oncology, evidence synthesis must account for molecularly defined subgroups, heterogeneous trial populations, biomarker selection, treatment-line

differences, competing risks, and rapidly evolving standards of care. Adaptive trial designs, basket trials, umbrella trials, platform studies, pragmatic clinical trials, and prospective observational cohorts may facilitate more efficient evaluation of molecularly stratified interventions. At the same time, rigorous methodological standards are necessary to prevent overinterpretation of exploratory subgroup findings and to ensure that molecular complexity does not undermine the reproducibility of clinical evidence.

Clinical implementation additionally requires consideration of health-system capacity, laboratory infrastructure, data governance, professional education, cost-effectiveness, equitable access, and ethical management of genomic information. Precision oncology can generate substantial disparities if sophisticated molecular diagnostics and targeted therapies remain accessible only to selected populations or healthcare systems. Therefore, translational medicine must incorporate principles of equity, transparency, informed consent, privacy protection, and responsible data stewardship. The successful integration of molecular oncology into routine care ultimately depends on the creation of clinical pathways that are scientifically rigorous while remaining feasible, interpretable, and accessible.

Future Scientific Perspective

Future developments are likely to strengthen the convergence of translational epigenetics with oncogenetics, computational oncology, clinical pharmacology, immuno-oncology, and evidence-based therapeutic science. Artificial intelligence and machine-learning methodologies may facilitate the identification of complex molecular patterns that are difficult to detect through conventional analytical approaches, while single-cell and spatial technologies may provide increasingly precise characterization of cellular states and tumor ecosystems. These technologies may support the development of predictive models that integrate molecular, pathological, pharmacological, and clinical variables into individualized decision-support systems.

The ultimate objective, however, should remain clinically meaningful improvement rather than technological sophistication alone. Translational cancer science must therefore maintain a continuous connection between molecular discovery and patient-centered outcomes. The most valuable innovations will be those capable of improving prevention, enabling earlier and more accurate diagnosis, selecting effective and tolerable treatments, reducing avoidable toxicity, identifying resistance before irreversible progression, and improving survival and quality of life. In this context, translational epigenetics and precision medicine should be regarded not as isolated technological domains but as components of a comprehensive evidence-based framework for individualized cancer care.

GOAL OF THE INTEGRATED SCIENTIFIC FRAMEWORK

The overarching goal of this scientific framework is to establish a comprehensive, mechanistically informed, clinically applicable, and evidence-based model for integrating translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine across the continuum of cancer care. This goal encompasses the systematic translation of molecular discoveries into clinically validated knowledge capable of improving individualized cancer prevention, risk stratification, early detection, diagnosis, prognostic assessment, therapeutic selection, treatment optimization, safety surveillance, response monitoring, and long-term patient management.

More specifically, the framework seeks to clarify how genetic and epigenetic determinants interact with environmental, metabolic, immunological, and pharmacological factors to influence carcinogenesis and therapeutic outcomes. It aims to identify clinically meaningful molecular signatures and therapeutic targets; strengthen the integration of genomic, epigenomic, transcriptomic, proteomic, metabolomic, pathological, and clinical information; and facilitate the development of reliable biomarkers for individualized risk assessment and disease monitoring. A further goal is to establish scientifically rigorous connections between molecular mechanisms and pharmacological decision-making, including the prediction of therapeutic response, treatment resistance, adverse drug reactions, drug–drug interactions, and interindividual variability in pharmacokinetics and pharmacodynamics.

An additional objective is to advance precision pharmacotherapy by integrating pharmacogenomic, pharmacoepigenomic, clinical pharmacokinetic, pharmacodynamic, and therapeutic drug-monitoring principles into personalized treatment strategies. Such integration should support rational selection and sequencing of anticancer agents, optimization of dosing regimens, reduction of preventable toxicity, and identification of biologically justified combination therapies. Particular emphasis should be placed on translating mechanistic evidence into clinically actionable recommendations while distinguishing preliminary molecular associations from biomarkers and interventions supported by robust clinical evidence.

The framework further aims to strengthen the evidence base underlying molecularly guided oncology. This requires systematic evaluation of analytical validity, clinical validity, clinical utility, comparative effectiveness, safety, cost-effectiveness, patient-reported outcomes, and real-world applicability. The ultimate objective is not merely to increase molecular characterization of cancer but to determine whether molecularly informed interventions produce demonstrable improvements in clinically relevant outcomes, including cancer prevention, earlier diagnosis, disease control, survival, quality of life, and reduction of treatment-related harm.

At the healthcare-system level, the goal is to promote responsible implementation of precision oncology through multidisciplinary collaboration, standardized diagnostic methodologies, appropriate professional education, ethical governance of genomic and epigenomic information, equitable access to molecular diagnostics and effective therapies, and continuous pharmacovigilance. Such an approach should ensure that technological innovation remains aligned with patient-centered care, scientific reproducibility, regulatory standards, and principles of evidence-based clinical practice.

The integrated goal is to transform molecular knowledge into actionable clinical intelligence and to establish a continuous translational pathway extending from biological discovery to validated biomarkers, individualized therapeutic interventions, longitudinal monitoring, and measurable improvements in patient outcomes. This paradigm positions translational epigenetics and oncogenetics within a broader precision-medicine ecosystem in which pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine collectively contribute to safer, more rational, more effective, and increasingly personalized cancer prevention and therapeutic care.

METHODOLOGY

Study Design and Methodological Orientation

The present scientific work was structured as a comprehensive, interdisciplinary, evidence-oriented narrative synthesis integrating conceptual, mechanistic, translational, pharmacological, clinical, and methodological dimensions of contemporary oncology. The

methodological architecture was deliberately designed to transcend a narrowly disease-specific or technology-specific review model and instead examine the interconnected continuum extending from molecular carcinogenesis and epigenetic regulation to oncogenetic risk assessment, precision diagnosis, pharmacological intervention, clinical decision-making, therapeutic monitoring, and evidence-based cancer care. The methodological framework therefore adopts a systems-oriented translational perspective in which biological mechanisms are evaluated in relation to their diagnostic, prognostic, predictive, pharmacological, and therapeutic implications.

The central methodological premise was that clinically meaningful precision oncology requires integration of multiple evidence domains rather than isolated interpretation of individual molecular findings. Accordingly, the synthesis incorporated evidence concerning epigenomic regulation, cancer genetics, molecular biomarkers, tumor heterogeneity, pharmacogenomics, pharmacoepigenomics, pharmacokinetics, pharmacodynamics, targeted pharmacotherapy, immunopharmacology, clinical pharmacology, pharmacovigilance, and evidence-based medicine. Particular attention was directed toward the translational gap between mechanistic discovery and demonstrable clinical utility, with emphasis on analytical validity, clinical validity, clinical utility, safety, reproducibility, and patient-centered outcomes.

Conceptual and Scientific Framework

The methodological framework was organized around a multidimensional conceptual model comprising eight interdependent domains: (1) molecular and epigenetic mechanisms of carcinogenesis; (2) oncogenetic and inherited cancer susceptibility; (3) molecular and multi-omics characterization of malignant disease; (4) biomarker discovery and clinical validation; (5) precision-medicine stratification and individualized clinical decision-making; (6) pharmacological, pharmacogenomic, and pharmacoepigenomic determinants of therapeutic response; (7) clinical pharmacology, pharmacotherapy, treatment safety, and pharmacovigilance; and (8) evidence synthesis and implementation within evidence-based clinical practice. These domains were considered interconnected rather than sequential, reflecting the dynamic and bidirectional nature of translational cancer science.

The analysis further distinguished three levels of translational evidence. The first comprised **mechanistic evidence**, including molecular pathways, epigenetic regulation, genetic alterations, receptor biology, signaling networks, and cellular interactions. The second comprised **translational evidence**, including biomarker development, preclinical validation, pharmacological target assessment, pharmacogenomic associations, and early clinical investigations. The third comprised **clinical evidence**, including randomized controlled trials, prospective validation studies, systematic reviews, meta-analyses, comparative effectiveness research, real-world evidence, pharmacovigilance data, and patient-centered outcomes. This hierarchical structure was used to prevent the inappropriate extrapolation of mechanistic plausibility into unsupported clinical recommendations.

Literature Identification and Evidence Acquisition

A structured literature-identification strategy was conceptually established to capture high-quality evidence across biomedical, pharmaceutical, genetic, epigenetic, translational, and clinical domains. The evidence base was designed to encompass peer-reviewed scientific literature, authoritative clinical guidelines, consensus statements, systematic reviews, meta-analyses, pivotal clinical trials, pharmacological studies, molecular investigations, translational research, and relevant regulatory or methodological documentation. Literature identification was centered on combinations of controlled scientific terminology and free-text concepts

related to translational epigenetics, cancer genetics, precision oncology, molecular biomarkers, pharmacoepigenomics, pharmacogenomics, anticancer pharmacotherapy, clinical pharmacology, therapeutic drug monitoring, pharmacovigilance, and evidence-based medicine. Search concepts were organized using Boolean combinations and iterative terminology refinement to accommodate the heterogeneity of nomenclature across molecular oncology and clinical pharmacology. Core conceptual clusters included epigenetic mechanisms, DNA methylation, histone modification, chromatin remodeling, non-coding RNA, oncogenic signaling, tumor-suppressor pathways, germline and somatic variants, next-generation sequencing, liquid biopsy, circulating tumor DNA, multi-omics profiling, molecular classification, targeted therapy, immunotherapy, epigenetic therapy, pharmacogenomics, drug metabolism, drug transport, pharmacodynamic biomarkers, treatment resistance, adverse drug reactions, and clinical outcomes. Where appropriate, terminology was expanded to incorporate emerging concepts and synonymous molecular or clinical classifications.

Evidence Selection and Eligibility Principles

Evidence was conceptually prioritized according to methodological rigor, clinical relevance, biological plausibility, reproducibility, and translational applicability. Greater evidentiary weight was assigned to well-designed systematic reviews, meta-analyses, randomized clinical trials, prospective biomarker-validation studies, high-quality cohort studies, authoritative guidelines, and robust mechanistic investigations with demonstrable translational relevance. Foundational studies were retained when they established essential biological principles or provided historically important evidence for subsequent clinical development.

Evidence was considered particularly relevant when it addressed one or more of the following dimensions: molecular mechanisms of carcinogenesis; epigenetic dysregulation; inherited or somatic oncogenetic alterations; clinically validated biomarkers; molecular determinants of treatment response or resistance; pharmacological mechanisms; pharmacokinetic or pharmacodynamic variability; pharmacogenomic or pharmacoepigenomic associations; efficacy and safety of anticancer pharmacotherapies; clinical implementation of precision medicine; pharmacovigilance; or patient-centered outcomes. Evidence characterized by limited methodological transparency, inadequate validation, substantial risk of bias, irreproducible molecular claims, or insufficient clinical relevance was interpreted cautiously and was not treated as equivalent to high-level clinical evidence.

Critical Appraisal of Evidence

The methodological synthesis incorporated a critical appraisal perspective rather than simple aggregation of published findings. Each major evidence category was evaluated with consideration of study design, population characteristics, sample size, comparator selection, endpoint definition, biomarker methodology, analytical reproducibility, statistical methodology, potential confounding, selection bias, external validity, and applicability to clinical practice. For molecular biomarker studies, particular consideration was given to analytical validity, assay standardization, biological heterogeneity, preanalytical variables, threshold determination, sensitivity, specificity, predictive value, and independent validation.

For therapeutic evidence, the appraisal emphasized clinically meaningful endpoints, including overall survival, progression-free survival and disease response, duration of response, toxicity, treatment discontinuation, quality of life, and patient-reported outcomes. Surrogate endpoints were interpreted within the context of their established relationship with patient benefit.

Pharmacological evidence was additionally examined according to dose–response relationships, pharmacokinetic exposure, pharmacodynamic effects, therapeutic window, metabolism, transport, drug–drug interactions, organ-function dependence, and interindividual variability. This approach allowed molecular and pharmacological evidence to be considered within a clinically interpretable framework.

Translational Epigenetic Analysis

The epigenetic component of the methodology focused on the principal regulatory mechanisms capable of altering gene expression and cellular phenotype without necessarily changing the underlying DNA sequence. These included DNA methylation and hydroxymethylation, histone modifications, chromatin remodeling, nucleosome organization, enhancer and promoter regulation, and non-coding RNA-mediated mechanisms. Their relationships with oncogene activation, tumor-suppressor silencing, genomic instability, DNA-repair pathways, cellular differentiation, stemness, immune evasion, metastatic progression, and therapeutic resistance were examined from a translational perspective.

Particular methodological emphasis was placed on the reversibility of epigenetic alterations and their potential pharmacological manipulability. Epigenetic abnormalities were therefore assessed not only as mechanistic contributors to malignancy but also as potential diagnostic, prognostic, predictive, and therapeutic biomarkers. The analysis considered the translational progression from molecular discovery to biomarker validation and pharmacological intervention, including the potential use of epigenetic modulators as monotherapies or rational components of combination treatment strategies.

Oncogenetic and Precision-Medicine Assessment

The oncogenetic methodology incorporated evaluation of both germline susceptibility and somatic tumor alterations. Germline findings were considered in relation to inherited cancer risk, penetrance, familial implications, genetic counseling, surveillance, and risk-reduction strategies. Somatic alterations were examined according to their functional consequences, relationship to tumor biology, prognostic significance, predictive value, and potential therapeutic actionability. The methodological framework recognized that genomic variants require contextual interpretation and that not every molecular alteration represents a clinically actionable target.

Precision-medicine evidence was consequently assessed through the interaction of molecular characteristics with histopathology, disease stage, clinical phenotype, prior treatment, comorbid conditions, pharmacological characteristics, and patient preferences. Molecular stratification was interpreted as one component of a multidimensional clinical decision-making process rather than as a replacement for conventional clinical assessment. Particular attention was given to the distinction between molecularly informed treatment selection and demonstrated improvement in clinical outcomes.

Pharmacological and Clinical Pharmacological Methodology

The pharmacological component examined mechanisms of drug action, molecular targets, receptor and signaling pathways, dose–response relationships, pharmacokinetics, pharmacodynamics, therapeutic windows, adverse drug reactions, and clinically relevant drug–drug interactions. Anticancer pharmacotherapy was considered across major therapeutic classes, including cytotoxic agents, endocrine therapies, molecularly targeted drugs, monoclonal antibodies, immune-modulating therapies, cellular therapies, and epigenetically active agents.

Clinical pharmacology was integrated to evaluate interindividual variability in exposure and response. Particular attention was given to pharmacogenetic and pharmacogenomic determinants of drug metabolism, transport, target engagement, efficacy, and toxicity. The methodology also incorporated the emerging concept of pharmacoepigenomics, examining bidirectional relationships between epigenetic states and pharmacological responses. Therapeutic drug monitoring and pharmacokinetic/pharmacodynamic modeling were considered where concentration–effect relationships provide clinically actionable information.

Biomarker and Multi-Omics Integration

The methodological framework incorporated a multi-omics perspective to avoid reductionist interpretation of isolated molecular variables. Genomic, epigenomic, transcriptomic, proteomic, metabolomic, single-cell, spatial, and clinical data were conceptually integrated according to their complementary biological information. This approach recognizes that genetic alterations may not necessarily translate directly into functional phenotypes and that epigenetic, transcriptional, proteomic, metabolic, and microenvironmental processes may substantially modify the clinical expression of genomic abnormalities.

Biomarker evaluation therefore emphasized the distinction between discovery biomarkers and clinically validated biomarkers. Candidate biomarkers were considered according to analytical performance, biological reproducibility, association with clinically relevant phenotypes, predictive capacity, external validation, and potential clinical utility. Liquid-biopsy and circulating biomarker approaches were evaluated in relation to their potential for minimally invasive disease characterization, longitudinal monitoring, minimal residual disease assessment, treatment-response evaluation, and early identification of molecular resistance.

Therapeutic Response, Resistance, and Dynamic Monitoring

Because malignant disease represents a dynamically evolving biological system, the methodology incorporated longitudinal considerations of treatment response and resistance. Molecular alterations emerging under therapeutic selection were examined as potential mechanisms of primary or acquired resistance. Particular attention was given to clonal evolution, epigenetic plasticity, pathway redundancy, altered drug metabolism, tumor-microenvironment interactions, immune escape, and adaptive signaling.

The methodological framework therefore considered serial molecular assessment as a potential mechanism for dynamic therapeutic stratification. However, molecular detection of treatment resistance was distinguished from demonstrated clinical benefit of biomarker-guided intervention. This distinction is essential for preventing premature clinical adoption of technologically sophisticated monitoring strategies without sufficient prospective evidence that intervention based upon such information improves outcomes.

Evidence Synthesis and Clinical Applicability

The final stage of the methodology consisted of integrative synthesis across molecular, pharmacological, translational, and clinical evidence. Findings were interpreted according to biological coherence, consistency across independent studies, strength of clinical evidence, magnitude of demonstrated benefit, safety considerations, feasibility, and applicability to real-world practice. Where evidence was heterogeneous or incomplete, conclusions were framed conservatively and areas of uncertainty were explicitly recognized.

The methodological synthesis also incorporated principles of evidence-based medicine by considering the hierarchy and quality of evidence, risk–benefit relationships, patient-centered outcomes, external validity, and implementation feasibility. The purpose was not to equate

molecular sophistication with therapeutic superiority but to determine how molecular information can be responsibly integrated into clinically defensible decision-making.

Statistical and Analytical Considerations

Where quantitative evidence was available, interpretation was guided by established principles of biostatistics and clinical epidemiology. Effect estimates, confidence intervals, measures of association, heterogeneity, predictive performance, diagnostic accuracy, and clinically relevant effect sizes were considered according to the underlying study design. Particular caution was applied to exploratory subgroup analyses, multiple molecular comparisons, post hoc biomarker analyses, and small molecularly selected populations, all of which may generate unstable estimates or inflated false-positive findings.

For diagnostic and predictive biomarkers, attention was directed toward discrimination, calibration, sensitivity, specificity, positive and negative predictive values, likelihood ratios, area under the receiver-operating-characteristic curve where applicable, and clinical decision thresholds. For therapeutic investigations, statistical significance was considered insufficient in isolation; the magnitude, precision, consistency, durability, and clinical relevance of observed treatment effects were also examined. This analytical orientation supports a distinction between statistical association and clinically actionable benefit.

Ethical, Regulatory, and Implementation Considerations

Because genomic and epigenomic medicine involves highly informative biological data, the methodology incorporated ethical considerations concerning informed consent, privacy, confidentiality, secondary data use, incidental findings, genetic discrimination, responsible data governance, and equitable access to precision diagnostics and therapeutics. The translational framework also recognized the importance of regulatory oversight, assay validation, clinical laboratory quality assurance, pharmacovigilance, and transparent reporting of benefits and risks. Implementation was considered from a health-system perspective, including availability of molecular diagnostics, professional expertise, laboratory infrastructure, computational capacity, reimbursement, treatment accessibility, and integration of multidisciplinary molecular tumor boards or equivalent clinical decision structures. The methodology therefore treats implementation feasibility as an essential component of translational validity rather than as an issue external to scientific evaluation.

Methodological Limitations and Quality Assurance

The methodology recognizes that an interdisciplinary translational synthesis is subject to limitations arising from heterogeneity in study populations, molecular platforms, assay methodologies, endpoint definitions, clinical contexts, treatment standards, and evidence maturity. Rapid technological evolution may further complicate comparisons between studies conducted at different stages of precision-oncology development. Publication bias, selective reporting, incomplete external validation, and differences in molecular classification systems may also influence the apparent strength of evidence. To mitigate these limitations, the methodological approach emphasized triangulation of evidence across independent biological and clinical domains, preferential consideration of validated findings, explicit differentiation between established evidence and emerging hypotheses, and cautious interpretation of heterogeneous results. The overall methodological objective was to maximize scientific coherence while preserving epistemic transparency regarding uncertainty, evidence limitations, and areas requiring prospective validation.

The Methodological Objective

The methodology was designed to provide a rigorous translational framework for connecting molecular mechanisms with clinically actionable cancer care. By integrating epigenetic and oncogenetic science with precision medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, pharmacogenomics, pharmacoepigenomics, biomarker science, pharmacovigilance, and evidence-based medicine, the approach seeks to establish a scientifically defensible pathway from molecular discovery to individualized clinical intervention. The ultimate methodological criterion is therefore not the volume or complexity of molecular information generated, but the extent to which such information can be reproducibly interpreted, clinically validated, pharmacologically optimized, ethically implemented, and translated into measurable improvements in cancer prevention, diagnosis, treatment safety, therapeutic efficacy, and patient-centered outcomes.

RESULTS AND DISCUSSION

Epigenetic Plasticity as a Determinant of Cancer Phenotype

An important conclusion emerging from the integrated analysis is that epigenetic plasticity should be regarded as a fundamental determinant of malignant phenotype rather than as a secondary molecular phenomenon. Cancer cells continuously adapt to changes in nutrient availability, oxygen tension, immune pressure, stromal signaling, and pharmacological exposure. Epigenetic mechanisms provide a highly flexible regulatory architecture through which these environmental and intracellular signals can be translated into altered transcriptional programs. Consequently, epigenetic plasticity may facilitate transitions between proliferative, invasive, stem-like, quiescent, and drug-tolerant cellular states.

This observation has substantial implications for precision oncology. Conventional genomic classification frequently assumes that a patient's molecular profile remains relatively stable, whereas epigenetic states may fluctuate considerably over the course of disease. A therapeutically relevant molecular phenotype may therefore arise from the interaction between fixed genomic alterations and dynamically regulated epigenetic programs. This supports the development of longitudinal molecular profiling strategies capable of capturing temporal biological changes rather than relying exclusively on baseline tumor characterization.

Pharmacoepigenomics and Individual Variability in Therapeutic Response

The integration of pharmacoepigenomics into clinical pharmacology provides an additional explanatory framework for interindividual variability in anticancer treatment outcomes. Epigenetic mechanisms can regulate the expression of drug-metabolizing enzymes, membrane transporters, receptors, signaling proteins, DNA-repair factors, apoptotic mediators, and immune-regulatory molecules. Consequently, epigenetic variation may influence both pharmacokinetic exposure and pharmacodynamic sensitivity.

This relationship is particularly important because conventional pharmacogenomic models generally emphasize relatively stable DNA sequence variation, whereas epigenetic regulation may represent a dynamic and potentially reversible determinant of drug response. The resulting conceptual model is therefore multidimensional: therapeutic response reflects the interaction between inherited genetic architecture, tumor-acquired genomic abnormalities, epigenetic state, drug exposure, pharmacological target engagement, immune context, and patient-specific clinical characteristics. The translational significance of pharmacoepigenomics consequently lies in its potential to identify patients who may benefit from particular therapeutic strategies or who may be predisposed to treatment toxicity. However, the field remains comparatively immature, and clinically actionable pharmacoepigenomic biomarkers require rigorous prospective validation before routine incorporation into therapeutic algorithms.

Precision Oncology and Therapeutic Drug Optimization

The findings further demonstrate that precision medicine should extend beyond selection of the correct therapeutic class toward optimization of the complete pharmacotherapeutic regimen. Even when a tumor possesses a validated molecular target, therapeutic efficacy may depend on adequate drug exposure, tissue penetration, target engagement, treatment schedule, adherence, metabolism, drug interactions, and organ-function-dependent clearance. Clinical pharmacology therefore provides an essential bridge between molecular diagnosis and effective treatment. Pharmacokinetic and pharmacodynamic characterization can identify clinically relevant exposure–response relationships, while therapeutic drug monitoring may be valuable for selected agents with narrow therapeutic indices or substantial interindividual pharmacokinetic variability. Integration of molecular biomarkers with pharmacokinetic and pharmacodynamic information could ultimately facilitate a more comprehensive model of individualized dosing.

Molecularly Guided Combination Therapy

A further result of the synthesis is the increasing scientific rationale for mechanism-based combination therapy. Malignant cells frequently activate compensatory signaling pathways when a single molecular pathway is inhibited. Simultaneous targeting of complementary mechanisms may therefore provide greater therapeutic depth and reduce the probability of adaptive escape. Epigenetic agents are particularly attractive combination partners because they can modify transcriptional states, antigen presentation, differentiation programs, DNA-repair pathways, and cellular sensitivity to other therapies. Combination strategies involving epigenetic modulation and immunotherapy, targeted therapy, endocrine therapy, or DNA-damaging agents may therefore have biological plausibility. Nevertheless, mechanistic synergy does not guarantee clinical synergy. Combination regimens can increase cumulative toxicity, pharmacokinetic interactions, treatment complexity, and financial burden. The translation of mechanistic combinations into clinical practice should consequently depend on robust pharmacological characterization and appropriately designed clinical trials.

Immuno-Epigenetic Interactions

The integrated evidence also highlights the importance of interactions between epigenetic regulation and antitumor immunity. Epigenetic mechanisms can influence antigen expression, major histocompatibility complex presentation, cytokine signaling, immune-cell recruitment, and immune-checkpoint pathways. Conversely, inflammatory and immune signals can modify epigenetic states within malignant cells and the tumor microenvironment. This bidirectional relationship creates an important translational opportunity. Epigenetic modulation may potentially convert immunologically poorly responsive tumors into phenotypes more susceptible to immune-mediated elimination. Such approaches represent an emerging component of precision immuno-oncology. Their clinical development, however, requires careful identification of biologically appropriate patient populations and rigorous assessment of immune-related toxicity.

Liquid Biopsy and Longitudinal Molecular Surveillance

The synthesis further supports liquid biopsy as a potentially transformative component of dynamic cancer management. Circulating tumor DNA and related circulating molecular analytes may provide minimally invasive information regarding tumor burden, molecular heterogeneity, residual disease, treatment response, and emerging resistance. Compared with repeated tissue biopsy, liquid biopsy can potentially facilitate serial sampling and therefore

provide a temporal representation of tumor evolution. This characteristic is particularly relevant to precision oncology because treatment-induced molecular changes may precede radiographic or clinical progression.

Nevertheless, analytical sensitivity and specificity remain critical limitations. Low levels of circulating tumor-derived material, biological variation, technical differences among assays, and potential non-tumor sources of circulating DNA can complicate interpretation. Accordingly, molecular detection should not automatically be equated with clinically significant disease progression unless validated thresholds and clinical decision pathways have been established.

Artificial Intelligence and Computational Precision Oncology

The increasing volume and complexity of molecular data has created a substantial role for computational biology, machine learning, artificial intelligence, and advanced statistical modeling. These approaches can facilitate pattern recognition across high-dimensional genomic and epigenomic datasets and may support prediction of therapeutic response, prognosis, toxicity, and disease evolution. However, the results indicate that computational sophistication does not eliminate fundamental methodological requirements. AI-derived models remain vulnerable to biased training datasets, overfitting, data leakage, population shift, inadequate external validation, and limited interpretability. Clinical implementation therefore requires prospective validation, transparent model development, calibration, reproducibility, and assessment of whether algorithmic recommendations improve patient outcomes. AI should consequently function as an augmentation of multidisciplinary clinical reasoning rather than an autonomous replacement for oncological, pharmacological, or clinical judgment.

Real-World Evidence and Translational Validation

Randomized trials remain indispensable for determining efficacy, but real-world evidence provides complementary information concerning treatment effectiveness in heterogeneous clinical populations. Patients encountered in routine practice frequently differ from trial participants in age, comorbidity burden, previous treatment, organ function, socioeconomic circumstances, and medication exposure.

Integration of real-world clinical data with molecular and pharmacological information can therefore provide valuable evidence concerning the generalizability of precision oncology strategies. Real-world evidence may additionally contribute to detection of rare adverse reactions, treatment discontinuation patterns, adherence problems, healthcare utilization, and long-term outcomes. The optimal translational model therefore involves convergence between controlled experimental evidence and systematically collected real-world evidence rather than privileging either evidence stream in isolation.

Patient-Centered Precision Oncology

A particularly important conclusion is that precision medicine must remain patient-centered. Molecularly optimal treatment is not necessarily synonymous with clinically optimal treatment if toxicity, treatment burden, accessibility, financial consequences, or patient preferences are inadequately considered. Precision oncology should therefore incorporate shared decision-making, patient-reported outcomes, functional status, quality of life, and individual treatment priorities. The ultimate objective is not simply molecular matching between tumor and drug but optimization of the overall benefit–risk relationship for the individual patient.

Clinical Implementation and Multidisciplinary Integration

Successful implementation requires collaboration among oncologists, clinical pharmacologists, pharmacists, geneticists, molecular pathologists, laboratory scientists, bioinformaticians, epidemiologists, statisticians, and other healthcare professionals. Molecular tumor boards and multidisciplinary precision-medicine teams can provide structured mechanisms for integrating complex molecular information with clinical circumstances. Such organizational integration is essential because no individual discipline can independently interpret the complete spectrum of molecular, pharmacological, statistical, ethical, and clinical information generated by modern oncology.

From Molecular Discovery to Actionable Clinical Knowledge

The overarching result of the present synthesis is that translational oncology should be understood as a continuous knowledge-conversion process: **Molecular discovery → mechanistic validation → biomarker development → analytical validation → clinical validation → therapeutic stratification → pharmacological optimization → prospective clinical evaluation → pharmacovigilance → real-world effectiveness → continuous refinement of personalized care.** This pathway illustrates that molecular discovery represents only the initial stage of translational achievement. The clinically meaningful endpoint is the generation of reproducible and actionable knowledge capable of changing clinical management and improving patient outcomes.

Integrative Interpretation

Taken together, the results demonstrate that the future architecture of cancer medicine will increasingly depend upon integration rather than specialization in isolation. Translational epigenetics provides insight into regulatory plasticity; oncogenetics defines inherited and somatic susceptibility; precision medicine organizes molecular information around individualized decisions; translational medicine establishes the bridge between discovery and clinical application; pharmacology explains therapeutic mechanisms; clinical pharmacology characterizes variability in exposure and response; pharmacotherapy converts mechanistic knowledge into treatment; and evidence-based medicine determines whether these innovations provide meaningful clinical benefit. The scientific significance of this integration lies in its capacity to transform cancer management from predominantly reactive treatment of established disease toward increasingly predictive, preventive, adaptive, and individualized care. The ultimate objective is therefore not merely to identify molecular abnormalities, but to determine **which abnormalities matter clinically, when they matter, how they should be therapeutically targeted, which patients are most likely to benefit, how treatment-related risks can be minimized, and whether the resulting intervention produces demonstrable improvement in patient-centered outcomes.**

Epigenome–Genome Interdependence in Malignant Transformation

An increasingly important conclusion from the integrated scientific perspective is that the genome and epigenome should not be considered independent determinants of carcinogenesis. Rather, malignant transformation emerges from continuous interaction between genetic alterations and regulatory mechanisms controlling their functional expression. Mutations affecting chromatin remodelers, histone-modifying enzymes, DNA-methylation machinery, and transcriptional regulators can generate broad epigenomic consequences, while aberrant epigenetic states can alter the expression of genes involved in DNA repair, cell-cycle regulation,

apoptosis, differentiation, and immune surveillance. This reciprocal relationship has significant implications for molecular classification. A mutation may have markedly different biological consequences depending upon the epigenomic context in which it occurs. Consequently, future precision oncology may increasingly require identification of **functional molecular states** rather than merely cataloguing individual sequence variants. Such an approach could improve discrimination between biologically consequential alterations and molecular abnormalities with limited therapeutic significance.

Epigenetic Biomarkers for Cancer Prevention and Early Detection

The translational potential of epigenetic biomarkers extends beyond established malignancy toward prevention and early detection. Because epigenetic alterations may arise during early stages of neoplastic transformation, they may theoretically provide molecular signals preceding clinically detectable disease. DNA methylation patterns, circulating nucleic acids, and other epigenetically regulated molecular signatures therefore represent important areas of investigation for population-level risk stratification and early diagnosis. The principal challenge is achieving sufficient specificity to distinguish malignant transformation from physiological aging, inflammation, tissue injury, and other non-neoplastic processes. A clinically useful early-detection biomarker must demonstrate not only high analytical performance but also an acceptable balance between sensitivity, specificity, false-positive rates, downstream diagnostic procedures, psychological consequences, and healthcare costs.

Thus, the scientific objective should not simply be earlier molecular detection but **earlier detection that produces a net clinical benefit.** This distinction is fundamental to evidence-based cancer prevention.

Epigenetic Ageing, Environmental Exposure, and Cancer Susceptibility

The integrated framework additionally supports investigation of relationships among biological ageing, environmental exposures, epigenetic remodeling, and cancer susceptibility. Epigenetic patterns are responsive to endogenous and exogenous influences, including metabolic status, chronic inflammation, environmental toxicants, nutritional conditions, and other exposures. Long-term accumulation of regulatory alterations may contribute to cellular dysfunction and create biological environments favorable to malignant transformation. This perspective expands cancer prevention from identification of inherited genetic susceptibility toward consideration of modifiable molecular determinants. However, associations between environmental exposure, epigenetic alteration, and cancer risk require careful causal interpretation. Correlation alone cannot establish that a specific epigenetic alteration mediates carcinogenesis. Longitudinal epidemiological studies, mechanistic experiments, and Mendelian or other causal-inference approaches may therefore be necessary to distinguish causal molecular pathways from epiphenomena.

Tumor Microenvironment and Epigenetic Regulation

The tumor microenvironment represents another major determinant of cancer behavior. Malignant cells interact continuously with cancer-associated fibroblasts, endothelial cells, immune populations, extracellular matrix components, and soluble mediators. These interactions can induce epigenetic remodeling and alter transcriptional states associated with invasion, metastasis, immune escape, and therapeutic resistance. The findings therefore support a transition from tumor-cell-centered oncology toward **ecosystem-level precision oncology.** Molecular characterization of malignant cells alone may be insufficient when therapeutic response is substantially influenced by stromal or immune components. Integration of tumor-

cell genomics and epigenomics with microenvironmental and spatial information may provide a more biologically complete representation of disease.

Single-Cell and Spatial Precision Oncology

Single-cell and spatial molecular technologies provide an increasingly sophisticated means of resolving intratumoral heterogeneity. Conventional bulk sequencing averages molecular signals across multiple cellular populations and may therefore obscure rare but clinically consequential subclones. Single-cell approaches can identify distinct cellular states, lineage relationships, resistant populations, and interactions among malignant and non-malignant cells. Spatial technologies add an additional dimension by determining where specific molecular phenotypes occur within the tumor architecture. This information may be particularly relevant for understanding immune exclusion, metastatic niches, vascular interactions, and localized therapeutic resistance. The clinical translation of these technologies remains dependent upon analytical standardization, reproducibility, cost-effectiveness, and demonstration of incremental clinical value over established diagnostic approaches.

Molecular Residual Disease and Post-Treatment Surveillance

An important emerging application of precision oncology is molecular assessment following apparently successful treatment. Molecular residual disease detection may identify persistent malignant material at levels below conventional radiographic detection. Such information could potentially enable earlier intervention in patients at elevated risk of recurrence. However, the clinical interpretation of molecular residual disease remains complex. Molecular positivity does not necessarily indicate inevitable clinical relapse, while molecular negativity does not guarantee permanent disease eradication. The value of molecular surveillance therefore depends upon validated assays, clinically meaningful thresholds, appropriate timing, and evidence demonstrating that treatment decisions based on molecular findings improve outcomes.

Precision Medicine in Metastatic Disease

Metastatic cancer presents a particularly demanding context for precision medicine because metastatic lesions may exhibit molecular divergence from the primary tumor. Different metastatic sites can contain distinct genomic and epigenomic profiles, creating spatial heterogeneity within the same patient.

The findings support consideration of metastatic-site biology when clinically feasible, particularly when disease behavior becomes discordant with the original molecular classification. Liquid biopsy may provide complementary information concerning multiple disease compartments, although its capacity to accurately represent all metastatic sites remains variable. Consequently, metastatic precision oncology should increasingly recognize cancer as a distributed and evolving biological system rather than a uniform molecular entity.

Therapeutic Resistance as a Pharmacological and Evolutionary Phenomenon

Resistance should not be conceptualized exclusively as a failure of drug potency. It can arise through pharmacokinetic mechanisms, target modification, pathway substitution, altered cellular state, microenvironmental protection, immune escape, and clonal evolution. These mechanisms demonstrate that therapeutic resistance represents an interaction between pharmacology and tumor evolution. From a clinical pharmacology perspective, inadequate drug exposure may generate apparent resistance without true biological insensitivity. Conversely, adequate exposure may select for resistant cellular populations. Distinguishing

pharmacokinetic resistance from pharmacodynamic or biological resistance is therefore critical for appropriate therapeutic modification.

Pharmacokinetic–Pharmacodynamic–Molecular Integration

The synthesis supports a more advanced model in which molecular biomarkers are integrated with quantitative pharmacology. Pharmacokinetic measurements characterize systemic and tissue exposure, whereas pharmacodynamic biomarkers provide evidence of biological target engagement. Molecular profiling can then identify whether the tumor possesses the biological prerequisites for therapeutic response. This three-dimensional framework can be conceptualized as: **Molecular eligibility → adequate pharmacological exposure → demonstrable target engagement → biological response → clinically meaningful outcome.** Failure at any stage may explain treatment nonresponse. Such a model could improve interpretation of therapeutic failure and support more rational treatment modification.

Therapeutic Index and Personalized Toxicity Management

Precision medicine should address toxicity with the same intensity devoted to therapeutic efficacy. Anticancer agents frequently possess narrow therapeutic windows, and individual susceptibility to toxicity can vary substantially. Pharmacogenomic variation, organ function, concomitant medications, age-related physiological changes, immune characteristics, and previous treatment can all influence adverse-event risk. The integration of pharmacogenetic information with clinical pharmacology and pharmacovigilance may therefore support individualized toxicity prevention. The future objective is not merely to identify patients most likely to respond but to identify those most likely to experience unacceptable toxicity before treatment exposure occurs.

Drug–Drug Interactions in Molecularly Stratified Oncology

The increasing complexity of precision oncology also increases the potential for clinically important drug–drug interactions. Patients receiving targeted anticancer agents frequently receive supportive medications, antimicrobials, analgesics, anticoagulants, anticonvulsants, endocrine therapies, and other concomitant treatments. Interactions involving metabolic enzymes, transport proteins, QT-prolonging mechanisms, immune pathways, or overlapping toxicities may significantly modify treatment safety. Clinical pharmacology and pharmacist-led medication review are therefore indispensable components of precision oncology. Molecularly individualized therapy without comprehensive medication reconciliation would represent an incomplete model of personalized care.

Polypharmacy and Multimorbidity

The growing population of cancer survivors and older adults with cancer has increased the importance of multimorbidity and polypharmacy. Patients may simultaneously require treatment for cardiovascular, metabolic, neurological, infectious, psychiatric, or other chronic conditions. Therapeutic decisions must consequently consider competing risks, drug interactions, cumulative toxicity, adherence, and life expectancy. Precision pharmacotherapy should therefore be individualized according to the complete clinical phenotype rather than tumor characteristics alone. A biologically optimal anticancer treatment may not represent the optimal clinical intervention if its toxicity or interaction profile is incompatible with the patient's broader therapeutic needs.

Precision Oncology and Health Equity

An important societal finding is that technological advancement does not automatically produce equitable healthcare. Access to genomic sequencing, epigenetic testing, specialized pathology, targeted medicines, molecular tumor boards, and advanced clinical trials varies considerably between healthcare systems and socioeconomic groups. If precision medicine is implemented without explicit equity strategies, technological innovation may increase rather than reduce disparities. Equitable precision oncology therefore requires affordable diagnostics, transparent reimbursement policies, representative clinical research populations, accessible genetic counseling, and infrastructure capable of delivering molecularly guided care across diverse settings.

Reproducibility and Standardization

Reproducibility represents one of the central scientific requirements for translational oncology. Differences in specimen collection, tissue processing, sequencing platforms, bioinformatic pipelines, molecular definitions, statistical thresholds, and reporting practices can produce substantially different results across studies. Standardized analytical pipelines, reference materials, quality-control procedures, transparent reporting, external validation, and harmonized terminology are therefore essential. Without methodological standardization, apparent precision may represent technical variation rather than true biological heterogeneity.

Clinical Decision Support and Molecular Tumor Boards

The increasing complexity of molecular information necessitates structured clinical decision-support systems. Molecular tumor boards can provide multidisciplinary interpretation of genomic and epigenomic findings while incorporating pathological, pharmacological, clinical, and evidence-based considerations. The principal value of such structures lies not merely in identifying molecular targets but in determining whether a proposed intervention has sufficient evidence, whether the molecular alteration is biologically meaningful, whether an appropriate drug is available, and whether the expected benefit justifies the potential toxicity and resource requirements.

Regulatory Science and Companion Diagnostics

Precision oncology increasingly depends upon the coordinated development of therapeutic agents and diagnostic assays. Companion diagnostics can identify patients most likely to benefit from particular treatments or those at increased risk of adverse reactions. The analytical performance of the diagnostic platform therefore becomes directly relevant to therapeutic safety and efficacy. Regulatory science must consequently evaluate not only the drug but also the reliability, reproducibility, clinical validity, and appropriate interpretation of the diagnostic technology used to select patients.

The Emerging Concept of Adaptive Precision Oncology and Integrative Interpretation

The accumulated findings support movement toward **adaptive precision oncology,** in which treatment decisions evolve according to longitudinal clinical, molecular, pharmacological, and response data. Instead of assigning a fixed therapeutic pathway at diagnosis, adaptive approaches may modify treatment as disease biology changes. Such a model integrates real-time or serial molecular information with pharmacological exposure, imaging, clinical status, and patient-reported outcomes. The objective is to minimize unnecessary treatment, respond rapidly to emerging resistance, and preserve therapeutic options for future disease states. The

extended analysis ultimately demonstrates that the most advanced model of personalized cancer medicine is neither purely genomic nor purely pharmacological. It is an integrated **molecular–pharmacological–clinical–evidence ecosystem.** Within this ecosystem, translational epigenetics explains regulatory plasticity; oncogenetics defines inherited and somatic susceptibility; precision medicine organizes molecular heterogeneity around individualized decisions; translational medicine converts discoveries into clinically relevant interventions; pharmacology defines mechanisms of therapeutic action; clinical pharmacology quantifies variability in exposure and response; pharmacotherapy implements treatment; pharmacovigilance protects patients from avoidable harm; and evidence-based medicine determines whether the entire intervention produces meaningful clinical benefit.

The scientific endpoint is therefore the transformation of molecular complexity into **actionable, reproducible, clinically validated, ethically responsible, and patient-centered knowledge.** This represents the essential transition from molecular oncology to truly integrated precision cancer medicine, in which prevention, diagnosis, therapeutic selection, dosing, response assessment, toxicity management, resistance surveillance, and survivorship are continuously connected through a rigorous translational framework.

Epigenetic Therapeutic Memory and Treatment Adaptation

An increasingly relevant concept emerging from translational epigenetics is the possibility of **therapeutic memory,** whereby prior pharmacological exposure produces persistent alterations in cellular regulatory states that influence subsequent treatment responses. Unlike permanent genomic mutations, some epigenetic modifications may remain reversible yet persist sufficiently to modify cellular phenotype after the initiating stimulus has been removed. This phenomenon may contribute to drug-tolerant states, altered differentiation, persistent stress responses, and subsequent therapeutic resistance. From a clinical pharmacological perspective, therapeutic history should therefore be considered not merely as a record of previously administered agents but as a potential determinant of the current molecular and pharmacological phenotype. This concept provides a rationale for investigating treatment sequencing according to molecular state rather than relying exclusively upon conventional lines of therapy.

Epigenetic Reprogramming and Cancer Stemness

The integrated evidence further indicates that epigenetic regulation is closely associated with cellular plasticity and cancer stem-like phenotypes. Stemness-associated transcriptional programs can promote self-renewal, metastatic dissemination, resistance to apoptosis, and reduced sensitivity to conventional anticancer treatment. Epigenetic mechanisms may stabilize these phenotypes and permit malignant cells to transition between differentiated and stem-like states. This observation has important therapeutic implications. Eradication of the dominant tumor population may not necessarily eliminate rare cells capable of regenerating disease. Precision therapy may therefore require simultaneous consideration of proliferating tumor cells, treatment-tolerant populations, and stem-like cellular compartments.

Metabolic–Epigenetic Interdependence

Cancer metabolism and epigenetic regulation are increasingly recognized as interconnected biological systems. Metabolites can function as substrates or cofactors for enzymes responsible for DNA and histone modification. Consequently, metabolic reprogramming can influence epigenetic states, while epigenetic alterations can regulate metabolic pathways. This bidirectional relationship creates a potentially important therapeutic interface between metabolic pharmacology and epigenetic oncology. It also suggests that metabolic

characteristics of tumors may influence sensitivity to epigenetic therapies. Future precision oncology strategies may therefore benefit from simultaneous characterization of molecular, epigenetic, and metabolic phenotypes.

DNA Damage Response, Epigenetics, and Therapeutic Sensitivity

The relationship between epigenetic regulation and DNA damage-response pathways represents another major translational opportunity. Epigenetic alterations can modify expression and accessibility of genes involved in DNA repair, replication, checkpoint regulation, and apoptosis. Conversely, DNA damage can induce epigenetic remodeling as part of cellular stress responses. These interactions provide a mechanistic basis for combining epigenetically active agents with therapies that induce or exploit DNA damage. However, therapeutic benefit depends upon identifying biologically appropriate patient populations and avoiding excessive toxicity arising from simultaneous disruption of multiple cellular repair mechanisms.

Synthetic Lethality and Molecularly Guided Pharmacotherapy

The findings support synthetic lethality as an important conceptual strategy for precision oncology. When tumor cells possess a specific molecular deficiency, inhibition of a complementary pathway may selectively compromise malignant cells while producing comparatively less damage to normal tissue. The approach illustrates how oncogenetics can directly inform pharmacotherapy. Nevertheless, the clinical translation of synthetic-lethal relationships requires careful confirmation that the molecular alteration is functionally present, sufficiently prevalent, analytically detectable, and associated with a reproducible therapeutic response.

Precision Prevention and Risk-Adapted Intervention

Precision medicine should not be restricted to treatment of established malignancy. The integration of oncogenetics, epigenetic biomarkers, environmental determinants, family history, and clinical risk factors creates opportunities for individualized cancer prevention. Risk-adapted prevention may involve differentiated surveillance intensity, earlier screening, behavioral interventions, preventive pharmacotherapy where evidence supports it, or prophylactic interventions in selected high-risk populations. The central principle remains proportionality: increasingly intensive preventive interventions should correspond to sufficiently strong evidence that the anticipated reduction in cancer risk outweighs potential harms.

Epigenetic Epidemiology and Population Health

Epigenetic epidemiology may provide an additional framework for understanding population-level differences in cancer susceptibility. Large-scale studies can investigate relationships among environmental exposures, social determinants, lifestyle factors, biological ageing, epigenetic patterns, and cancer incidence. However, population-level associations require cautious interpretation because epigenetic marks may reflect both causes and consequences of disease. Longitudinal study designs, repeated measurements, causal-inference methods, and careful control of confounding are therefore necessary to strengthen mechanistic interpretation.

Pharmacological Modulation of the Tumor Microenvironment

The tumor microenvironment represents a major therapeutic target because stromal and immune components can protect malignant cells from pharmacological elimination. Epigenetic modulation may alter communication between tumor cells and their surrounding microenvironment, potentially influencing inflammatory signaling, vascularization, immune recruitment, and extracellular matrix remodeling. The emerging implication is that effective pharmacotherapy may increasingly require simultaneous targeting of malignant-cell intrinsic mechanisms and microenvironmental processes. Such strategies should be developed according to mechanistic evidence and carefully evaluated for additive or synergistic toxicity.

Precision Immunopharmacology

The integration of molecular oncology with immunopharmacology represents a particularly dynamic area of translational research. The effectiveness of immune-directed therapies depends upon tumor antigenicity, immune-cell infiltration, checkpoint signaling, cytokine networks, antigen presentation, and the immunosuppressive characteristics of the tumor microenvironment. Genetic and epigenetic information may help identify immunologically responsive phenotypes. However, immune response is highly dynamic and context dependent. Consequently, static molecular biomarkers may need to be complemented by functional immune measurements and longitudinal assessment.

Pharmacodynamic Biomarkers as Evidence of Target Engagement

A major methodological advance is the distinction between identifying a molecular target and demonstrating that a drug has successfully modulated that target. Pharmacodynamic biomarkers can provide evidence that the intended biological pathway has been affected. This distinction is critically important in translational medicine. Therapeutic failure may result from inadequate target engagement rather than absence of biological dependence. Integration of pharmacodynamic measurements with drug exposure and clinical response may therefore facilitate more precise interpretation of treatment outcomes.

Therapeutic Drug Monitoring and Individualized Exposure

Therapeutic drug monitoring may represent an important component of individualized oncology for selected medicines where exposure correlates sufficiently with efficacy or toxicity. Variability may arise from genetic differences, hepatic or renal function, interacting medicines, body composition, inflammation, nutritional status, and other patient-specific factors. The integration of therapeutic drug monitoring with molecular biomarkers could facilitate a more comprehensive treatment model in which both **tumor susceptibility** and **patient exposure** are individualized. Such an approach may reduce underexposure, minimize excessive toxicity, and improve pharmacological efficiency when validated exposure targets are available.

Pharmacogenomics Beyond Drug Metabolism

Pharmacogenomics should not be conceptualized exclusively in terms of hepatic drug-metabolizing enzymes. Genetic variation may influence transport proteins, therapeutic targets, immune pathways, DNA repair, receptor signaling, and susceptibility to adverse drug reactions. The future precision pharmacology should integrate pharmacokinetic and pharmacodynamic

genetic determinants. This broader perspective may improve prediction of both treatment efficacy and treatment-related harm.

Molecular Classification and Histopathological Integration

Although molecular oncology has transformed disease classification, histopathology remains an essential component of cancer diagnosis. Molecular findings must be interpreted within morphological, anatomical, and clinical context. The strongest precision-medicine models therefore integrate histopathological architecture with genomic, epigenomic, transcriptomic, and proteomic information. This multidisciplinary approach reduces the likelihood that isolated molecular findings will be interpreted independently of the biological and clinical characteristics of the tumor.

Digital Pathology and Computational Morphology

Digital pathology provides an additional bridge between morphological assessment and computational precision medicine. Quantitative image analysis can identify subtle architectural, cellular, and spatial features that may correlate with molecular characteristics and treatment outcomes. When combined with molecular profiling, computational pathology may generate integrated diagnostic models capable of linking tissue morphology with genomic and epigenomic phenotypes. However, external validation and standardized image acquisition remain essential for reliable clinical implementation.

Clinical Trial Design in the Precision-Medicine Era

Precision oncology requires evolution of conventional clinical-trial methodology. Molecularly defined patient populations may be relatively small, while tumor heterogeneity can produce multiple clinically relevant subgroups. Adaptive designs, basket trials, umbrella trials, platform trials, and biomarker-enriched studies can potentially accelerate evaluation of molecularly guided interventions. Nevertheless, methodological complexity must be balanced against statistical validity, control-group integrity, multiplicity, and interpretability of results.

Surrogate Endpoints and Molecular Response

Molecular response measures may provide earlier evidence of biological activity than conventional clinical endpoints. However, a molecular change should not automatically be regarded as a validated surrogate for survival, quality of life, or durable disease control. The distinction between **biological response** and **patient benefit** is therefore essential. Molecular endpoints may accelerate development programs when appropriately validated, but regulatory and clinical decisions should remain grounded in evidence demonstrating that the surrogate reliably predicts meaningful outcomes.

Real-Time Translational Medicine

The convergence of rapid molecular diagnostics, liquid biopsy, digital pathology, computational analytics, and pharmacological monitoring creates the possibility of increasingly real-time translational medicine. Clinical decisions may evolve continuously as new biological and pharmacological information becomes available. Such a model could transform cancer management from episodic decision-making toward continuous disease-state assessment. However, increased monitoring must be justified by clinical utility; information abundance without actionable interpretation can increase complexity, anxiety, cost, and unnecessary intervention.

Precision Survivorship and Long-Term Pharmacotherapy

Precision oncology extends beyond active treatment. Survivorship may involve long-term surveillance, management of treatment-related toxicity, secondary malignancy risk, recurrence monitoring, rehabilitation, and chronic medication use. Molecular information may potentially contribute to individualized surveillance strategies, while clinical pharmacology can help manage long-term medication interactions and toxicity. The concept of precision medicine should therefore encompass the entire cancer trajectory rather than ending at initial therapeutic response.

Knowledge Translation Medicine, Professional Education and Scientific Synthesis

The rapid expansion of molecular oncology creates a substantial requirement for interdisciplinary professional education. Clinicians, pharmacists, laboratory professionals, geneticists, and other healthcare providers must understand the principles and limitations of genomic and epigenomic testing.

Effective knowledge translation requires not only dissemination of molecular discoveries but also education concerning variant interpretation, evidence hierarchies, pharmacogenomics, drug interactions, pharmacovigilance, ethical considerations, and communication of uncertainty to patients. The cumulative evidence supports a fundamental transformation in the conceptual architecture of cancer medicine. The modern oncology paradigm is moving from a relatively static classification of malignancy toward a **dynamic, multidimensional, molecularly informed, pharmacologically optimized, and evidence-governed system of individualized care.** The principal scientific contribution of integrating translational epigenetics with oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine is the creation of a coherent framework capable of connecting molecular complexity with therapeutic decision-making.

The ultimate translational pathway can therefore be represented as: **Cancer susceptibility → molecular initiation → epigenetic and genomic remodeling → tumor evolution → molecular characterization → biomarker validation → individualized risk stratification → precision diagnosis → pharmacological target identification → patient-specific therapeutic selection → pharmacokinetic/pharmacodynamic optimization → dynamic response monitoring → resistance detection → pharmacovigilance → real-world evaluation → adaptive therapeutic refinement → long-term personalized care.**

Within this framework, the principal objective of precision oncology is not simply to generate more molecular information. Rather, it is to **convert molecular information into validated clinical knowledge that improves prevention, diagnosis, therapeutic efficacy, safety, survival, quality of life, and equity of care.** This represents the highest-order translational challenge and simultaneously the principal opportunity for contemporary cancer science.

Integrated Molecular Architecture of Contemporary Oncology

The integrated analysis demonstrates that contemporary oncology is increasingly defined by the convergence of genomic, epigenomic, transcriptomic and proteomic, metabolic, immunological, pharmacological, and clinical information. The principal finding of this synthesis is that malignant disease cannot be adequately characterized through a single molecular layer or a purely anatomical classification system. Cancer represents a dynamic biological system in which genetic alterations, epigenetic states, cellular differentiation programs, tumor-microenvironment interactions, immune surveillance, metabolic adaptation, and therapeutic selection continuously interact. This multidimensional architecture provides the

scientific rationale for precision oncology while simultaneously explaining why individual biomarkers frequently demonstrate limited predictive capacity when interpreted in isolation.

Translational Epigenetics and Oncogenesis

The synthesized evidence supports translational epigenetics as a major component of modern cancer biology. Epigenetic dysregulation can influence tumor-suppressor silencing, oncogene activation, DNA-repair capacity, genomic stability, stem-cell-like phenotypes, cellular differentiation, immune evasion, and therapeutic resistance. The reversibility of many epigenetic abnormalities establishes a pharmacological basis for therapeutic modulation and supports investigation of epigenetic states as diagnostic, prognostic, predictive, and therapeutic biomarkers.

Oncogenetics and Molecular Risk Stratification

The analysis demonstrates that oncogenetics contributes to precision cancer care at both preventive and therapeutic levels. Germline pathogenic variants can identify individuals and families with increased susceptibility to malignancy, supporting risk-adapted surveillance, genetic counseling, and preventive strategies. Somatic genomic profiling characterizes established tumors and can identify alterations with diagnostic, prognostic, or therapeutic relevance. A critical finding is that molecular actionability remains context dependent: detection of a genomic variant does not necessarily establish driver status, therapeutic availability, or clinical benefit. Variant interpretation must therefore integrate molecular function, tumor type, disease stage, coexisting alterations, previous treatment, and the strength of clinical evidence.

Precision Medicine as an Integrative Clinical Paradigm

The results indicate that precision medicine is most scientifically robust when conceptualized as an integrative clinical paradigm rather than as a synonym for genomic sequencing. Molecular information must be interpreted alongside histopathology, disease stage, previous treatment, pharmacokinetics, organ function, immune status, toxicity risk, patient preferences, and treatment accessibility. Precision oncology should also be understood as a longitudinal process because tumor biology evolves through clonal selection, epigenetic remodeling, microenvironmental adaptation, and treatment-induced pressure. Repeated molecular assessment may therefore be informative in selected clinical circumstances when the resulting information can meaningfully alter management.

Pharmacology and Clinical Pharmacology in Precision Oncology

The integrated findings strongly support the central role of pharmacology in translating molecular knowledge into therapeutic action. Molecularly targeted treatment remains fundamentally a pharmacological intervention, dependent upon target engagement, exposure, pharmacodynamic effect, therapeutic window, tissue distribution, metabolism, elimination, drug interactions, and patient-specific determinants of response. Pharmacogenomics, pharmacoepigenomics, pharmacokinetics, and pharmacodynamics collectively provide a more comprehensive basis for precision pharmacotherapy than any single molecular determinant. The findings support expansion from a conventional drug–disease model toward a drug–molecular phenotype–patient model. The optimal treatment is determined not only by whether a tumor contains a theoretically actionable alteration but also by whether the selected agent can

achieve adequate exposure, maintain an acceptable safety profile, overcome relevant resistance mechanisms, and produce clinically meaningful benefit.

Pharmacotherapy and Epigenetically Directed Therapeutic Strategies

The results demonstrate that pharmacological manipulation of epigenetic pathways represents an important translational strategy. Agents directed against DNA methylation machinery, histone-modifying enzymes, chromatin-regulatory proteins, and related epigenetic processes provide proof of principle that aberrant cellular states can be therapeutically modified. Epigenetic modulation may additionally influence differentiation, antigen presentation, immune recognition, DNA-damage responses, and cellular susceptibility to other pharmacological interventions, providing a rationale for biomarker-guided combination strategies. Nevertheless, combination therapy increases pharmacological complexity and may amplify toxicity, pharmacokinetic interactions, and treatment burden. The evidence therefore supports rational rather than indiscriminate combination pharmacotherapy, with selection guided by mechanistic complementarity, biomarker evidence, pharmacological feasibility, and demonstrated clinical benefit.

Biomarker Development and Clinical Utility

One of the most important findings is the distinction between biomarker discovery and biomarker implementation. Modern sequencing and epigenomic technologies generate numerous candidate markers, but only a subset demonstrates reproducible clinical value. Biomarkers must progress through analytical validation, biological characterization, clinical association, predictive assessment, external validation, and demonstration of clinical utility. Liquid-biopsy approaches, including circulating tumor DNA and epigenetically informative circulating nucleic acids, offer opportunities for minimally invasive longitudinal assessment, but their interpretation remains constrained by tumor fraction, biological heterogeneity, preanalytical variability, assay sensitivity, and non-tumor sources of circulating DNA.

Multi-Omics Integration and Systems Oncology

The findings indicate that multi-omics integration can provide a more comprehensive representation of tumor biology than isolated genomic analysis. Genomics identifies sequence alterations; epigenomics characterizes regulatory states; transcriptomics describes gene-expression programs; proteomics reflects functional signaling; metabolomics captures biochemical adaptation; and single-cell and spatial technologies reveal cellular heterogeneity and tissue organization. However, increased informational complexity introduces risks of overfitting, batch effects, platform variability, and limited external validity. Robust computational methodology, independent validation, transparent reporting, and clinical interpretability are therefore essential.

Tumor Heterogeneity, Evolution, and Therapeutic Resistance

The integrated results reinforce tumor heterogeneity as a fundamental limitation of static precision medicine. A single tumor may contain molecularly distinct subclones with different proliferative capacities, metastatic potential, immune interactions, and drug sensitivities. Treatment can impose selective pressure favoring resistant populations. Epigenetic plasticity adds another dimension because cellular states may change reversibly under environmental and pharmacological pressure. Consequently, resistance may emerge through both genetic selection

and non-genetic adaptation, supporting investigation of longitudinal molecular monitoring and adaptive therapeutic strategies.

Evidence-Based Medicine and Clinical Decision-Making

The results strongly support the principle that molecular sophistication must remain subordinate to demonstrable clinical benefit. Evidence-based medicine provides the framework for determining whether molecularly informed interventions improve outcomes relative to established care. Randomized controlled trials, prospective biomarker validation, systematic reviews, meta-analyses, comparative effectiveness research, and real-world evidence collectively establish efficacy, safety, generalizability, and effectiveness. Statistically significant molecular associations should not automatically be interpreted as clinically actionable findings; effect magnitude, absolute benefit, toxicity, quality of life, durability of response, and patient preferences must also be considered.

Pharmacovigilance, Safety and Risk Management

The analysis identifies pharmacovigilance as an essential component of precision oncology. Molecularly targeted and immune-modulating therapies can produce distinctive and sometimes delayed toxicities. Continuous post-marketing surveillance, active safety monitoring, pharmacoepidemiological studies, and real-world data are therefore necessary to identify emerging safety signals. Precision pharmacovigilance may ultimately integrate genomic, epigenomic, clinical, and pharmacological characteristics to identify individuals at increased risk of adverse drug reactions, although such predictive approaches require rigorous validation and protection against algorithmic bias.

Ethical, Economic, and Health-System Implications

The findings demonstrate that successful precision oncology depends upon factors extending beyond molecular science. Genomic and epigenomic testing raises issues concerning informed consent, privacy, incidental findings, secondary data use, familial implications, data governance, and potential discrimination. Economic considerations are equally important because advanced diagnostics, computational infrastructure, targeted medicines, and longitudinal monitoring may impose substantial costs. Clinical utility, cost-effectiveness, equitable access, and health-system feasibility should therefore be evaluated alongside technical performance.

Translational Gaps and Future Research Priorities

Despite substantial progress, persistent translational gaps include incomplete understanding of epigenetic causality, inconsistent biomarker reproducibility, limited prospective validation of molecular signatures, underrepresentation of diverse populations, uncertainty concerning optimal combination pharmacotherapy, and insufficient evidence linking dynamic molecular monitoring with improved clinical outcomes. Future research should prioritize prospective biomarker-driven trials, longitudinal multi-omics studies, standardized assays, integrated pharmacokinetic and pharmacodynamic measurements, validated pharmacogenomic and pharmacoepigenomic algorithms, real-world evidence, and implementation science.

ANALYSIS

The results support a comprehensive scientific model in which translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine function as interconnected components of modern cancer care. The central implication is that molecular information

achieves its greatest clinical value when integrated with pharmacological principles, rigorous evidence evaluation, longitudinal disease assessment, and individualized patient characteristics. The emerging paradigm therefore moves beyond the question of which cancer a patient has toward determining which molecularly defined disease state is present, how that state is evolving, which therapeutic mechanisms are appropriate, how the patient is expected to respond, what toxicity risks may arise, and whether the intervention has demonstrated meaningful clinical benefit. The future of cancer medicine will depend not simply upon generating increasingly comprehensive molecular datasets but upon converting those datasets into reproducible clinical knowledge. The highest level of translational achievement will occur when molecular discoveries are accurately validated, pharmacologically interpreted, clinically tested, ethically implemented, and continuously evaluated through evidence-based medicine. Such integration provides a strong scientific foundation for advancing personalized cancer prevention, precision diagnosis, therapeutic optimization, treatment safety, resistance management, and patient-centered outcomes.

The integrated scientific analysis of translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine demonstrates that contemporary oncology is undergoing a fundamental transition from predominantly population-based therapeutic paradigms toward dynamic, molecularly stratified, patient-specific clinical care. The central analytical finding is that malignant disease should no longer be conceptualized exclusively according to anatomical location, histopathological classification, or isolated genetic abnormalities. Rather, cancer represents a continuously evolving biological system generated through interactions among genomic instability, epigenomic remodeling, transcriptional regulation, cellular plasticity, metabolic reprogramming, immune surveillance, tumor-microenvironment interactions, pharmacological pressure, and host-specific determinants.

Molecular Integration as the Foundation of Modern Oncology

The analysis indicates that no single molecular layer can adequately explain cancer initiation, progression, therapeutic response, or resistance. Genomic information provides an essential description of sequence-level alterations, whereas epigenomic information contributes an understanding of how these alterations are functionally expressed. Transcriptomic, proteomic, metabolomic, immunological, and spatial information further characterize the biological consequences of molecular alterations.

Accordingly, the analytical model should progress from **single-biomarker interpretation toward integrated molecular phenotyping.** This transition is particularly important because the same genomic alteration may generate different phenotypes depending upon cellular context, epigenetic state, coexisting molecular abnormalities, and tumor microenvironment.

Translational Epigenetics as a Functional Interface

The analysis identifies epigenetics as a critical interface connecting inherited or acquired genomic information with environmental and cellular influences. DNA methylation, histone modifications, chromatin remodeling, enhancer activity, and non-coding RNA networks collectively regulate transcriptional states that may determine cellular differentiation, proliferation, invasion, immune evasion, and drug sensitivity. The analytical significance of epigenetic regulation derives particularly from its dynamic and potentially reversible nature. Unlike many genomic alterations, epigenetic states may change in response to environmental conditions and therapeutic pressure. This creates both a biological challenge and a therapeutic opportunity. Consequently, epigenetic biomarkers should be evaluated not only as static

diagnostic variables but also as **dynamic indicators of disease state and treatment adaptation.**

Oncogenetics and the Complexity of Molecular Actionability

The analysis demonstrates that identifying a pathogenic or potentially actionable alteration is only the beginning of molecular interpretation. Clinical actionability depends upon the biological relevance of the alteration, tumor context, disease stage, available therapies, evidence strength, coexisting molecular abnormalities, and patient-specific characteristics. This distinction is fundamental because **molecular detectability does not equal therapeutic utility.** Precision oncology therefore requires multidisciplinary interpretation capable of distinguishing clinically consequential molecular alterations from findings whose therapeutic significance remains uncertain.

Tumor Heterogeneity as a Central Analytical Problem

Tumor heterogeneity represents one of the most important limitations of precision medicine. A malignant lesion may contain multiple subclones with different molecular profiles, proliferative capacities, metastatic potential, immune interactions, and pharmacological sensitivities. The analysis therefore supports a dynamic model of cancer evolution in which therapeutic intervention acts as a selective pressure. Treatment may eliminate sensitive populations while enriching resistant clones or inducing non-genetic adaptive states. It explains why a molecular profile obtained at diagnosis may become insufficient at recurrence or progression. Precision oncology should therefore increasingly incorporate **temporal molecular assessment** when clinically justified.

Epigenetic Plasticity and Therapeutic Resistance

A particularly important analytical conclusion is that therapeutic resistance cannot be explained exclusively through acquisition of new genetic mutations. Cancer cells may develop drug-tolerant states through epigenetic reprogramming, altered differentiation, transcriptional adaptation, metabolic changes, or microenvironmental protection.

This observation has substantial pharmacological implications. Resistance should be investigated through simultaneous consideration of:

- Genetic resistance;
- Epigenetic resistance;
- Pharmacokinetic resistance;
- Pharmacodynamic resistance;
- Pathway compensation;
- Tumor-microenvironment-mediated resistance;
- Immune-mediated resistance.

Such multidimensional analysis is more consistent with the biological complexity of treatment failure than a mutation-centered model alone.

Pharmacology as the Translational Bridge

The analysis establishes pharmacology as a central bridge between molecular discovery and clinical implementation. Identification of a molecular target does not automatically guarantee therapeutic success. Drug efficacy depends upon target engagement, appropriate exposure, tissue penetration, pharmacodynamic response, therapeutic index, metabolism, elimination, drug interactions, and adherence.Consequently, precision oncology should evolve from a simple **gene-to-drug matching model** toward a:**molecular phenotype → pharmacological**

exposure → target engagement → biological response → clinical outcome framework. This model integrates molecular eligibility with quantitative pharmacology and clinical outcome assessment.

Pharmacoepigenomics and Individualized Therapeutic Response

The analysis further indicates that epigenetic regulation may contribute to variability in pharmacological response by modifying expression of drug-metabolizing enzymes, transporters, receptors, signaling proteins, DNA-repair pathways, and immune-regulatory mechanisms. Pharmacoepigenomics therefore provides a potentially important extension of conventional pharmacogenomics. Whereas inherited genetic variants may represent relatively stable determinants of treatment response, epigenetic regulation can be dynamic and potentially influenced by disease progression and previous treatment. This creates an opportunity for longitudinal personalization of pharmacotherapy but simultaneously introduces significant methodological challenges concerning reproducibility, causality, and clinical validation.

Biomarkers: From Discovery to Clinical Utility

The analysis identifies a critical distinction between **biomarker discovery, biomarker validation, and clinical utility.** A biomarker may demonstrate a statistically significant association with cancer without being clinically useful. For implementation, the biomarker must demonstrate adequate analytical performance, reproducibility, biological plausibility, clinical validity, and evidence that its use improves decision-making or patient outcomes. This principle is particularly important for multi-omics and artificial-intelligence-derived biomarkers, where enormous numbers of candidate associations can be identified.

Multi-Omics and Systems-Level Interpretation

The integration of genomics, epigenomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics, immunology, and spatial biology offers a more comprehensive representation of tumor biology. However, greater molecular dimensionality simultaneously increases the risk of overfitting, technical artifacts, batch effects, false discovery, and limited external validity. Therefore, the analytical value of multi-omics medicine depends less on the quantity of molecular data generated than on the **quality, reproducibility, interpretability, and clinical relevance of the integrated model.**

Evidence-Based Medicine as the Final Validation Layer

A central analytical conclusion is that evidence-based medicine must remain the ultimate validation framework for molecularly informed interventions. Mechanistic plausibility, molecular association, computational prediction, and early-phase activity cannot independently establish clinical utility. Clinical adoption requires appropriate evidence concerning efficacy, safety, effectiveness, quality of life, cost-effectiveness, and patient-centered outcomes. Thus, precision medicine should not be interpreted as a replacement for evidence-based medicine. Rather: **Precision medicine determines whom and what to target; evidence-based medicine determines whether targeting produces meaningful benefit.**

Pharmacovigilance and Precision Safety

The analysis demonstrates that individualized cancer treatment must include individualized safety assessment. Targeted therapies, immunotherapies, molecularly selected combinations, and complex supportive-care regimens can generate distinctive adverse-event profiles. Precision pharmacovigilance may therefore integrate: **Genomic susceptibility + epigenetic state + pharmacokinetics + pharmacodynamics + comorbidity + concomitant medications**

+ clinical phenotype, to improve prediction, prevention, detection, and management of adverse drug reactions. This represents a transition from reactive pharmacovigilance toward increasingly **predictive and preventive medication-safety science.**

Ethical and Societal Dimensions

The analysis further establishes that molecular precision cannot be separated from ethical and societal considerations. Genomic and epigenomic information creates concerns involving privacy, informed consent, incidental findings, familial implications, data governance, discrimination, and equitable access. Similarly, high-cost molecular diagnostics and targeted therapies may create disparities if precision technologies are concentrated within specialized healthcare systems. Therefore, the true success of precision oncology should be evaluated according to both **scientific sophistication and equitable clinical accessibility.**

Critical Translational Gap

The most significant analytical gap is the distance between molecular discovery and routine clinical implementation. Thousands of molecular abnormalities may be described, yet only a limited proportion become validated clinical biomarkers or therapeutic targets. The translational pathway should therefore be understood as: **Discovery → biological validation → analytical validation → clinical validation → clinical utility → regulatory assessment → implementation → pharmacovigilance → real-world evaluation.** Failure at any stage prevents molecular innovation from becoming meaningful clinical practice.

Analytical Synthesis

Overall, the analysis demonstrates that the future of oncology depends upon integration of **molecular biology, epigenetic science, genetics, pharmacology, clinical pharmacology, computational science, clinical investigation, and evidence-based decision-making.** The most scientifically defensible model is therefore not a purely genomic precision-medicine framework but a **dynamic molecular–pharmacological–clinical framework** in which cancer biology and therapeutic response are continuously reassessed. The ultimate objective is to transform increasingly complex molecular information into clinically actionable knowledge capable of improving: **Cancer prevention → early detection → diagnostic precision → risk stratification → therapeutic selection → individualized dosing → response prediction → toxicity prevention → resistance management → survivorship → quality of life and patient-centered outcomes.** Accordingly, the highest level of translational achievement will not be measured by the number of molecular abnormalities detected, sequencing depth, computational complexity, or biomarker quantity alone. It will be determined by whether molecular discoveries can be **reliably validated, pharmacologically interpreted, clinically implemented, ethically governed, economically justified, and demonstrated through high-quality evidence to improve outcomes for individual patients and populations.**

CONCLUSION

➢ The integration of **translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, and evidence-based medicine** represents a fundamental transformation in contemporary cancer science and clinical practice. The present scientific discourse demonstrates that cancer should no longer be interpreted as a static pathological entity defined exclusively by anatomical

location, histological classification, or isolated genetic alterations. Rather, malignancy constitutes a highly dynamic biological system characterized by continuous interactions among genomic instability, epigenomic remodeling, transcriptional regulation, metabolic adaptation, immune responses, tumor-microenvironment interactions, cellular plasticity, pharmacological exposure, and host-specific determinants.

- Translational epigenetics provides a particularly important conceptual and therapeutic bridge because epigenomic mechanisms regulate gene expression, cellular differentiation, tumor progression, immune recognition, DNA repair, and therapeutic sensitivity. The potentially reversible nature of many epigenetic abnormalities creates opportunities for biomarker development and pharmacological intervention. At the same time, epigenetic plasticity may contribute to treatment adaptation and resistance, demonstrating that molecular phenotypes must increasingly be understood as dynamic rather than permanently fixed.
- Oncogenetics and precision medicine further enable individualized cancer-risk assessment, molecular classification, therapeutic stratification, and prevention. However, the analysis emphasizes that molecular detection does not automatically establish clinical actionability. Genetic and epigenetic findings require rigorous analytical validation, biological interpretation, clinical validation, and evidence demonstrating meaningful clinical utility. Precision medicine should therefore remain firmly integrated with evidence-based medicine rather than operating independently from it.
- Pharmacology and clinical pharmacology provide the essential translational bridge between molecular characterization and therapeutic intervention. The effectiveness of a molecularly selected treatment depends not only upon target identification but also upon pharmacokinetics, pharmacodynamics, target engagement, therapeutic index, drug interactions, patient-specific exposure, and treatment adherence. Pharmacogenomics and pharmacoepigenomics further contribute to understanding interindividual variability in efficacy and toxicity, supporting increasingly individualized pharmacotherapy.
- The analysis additionally demonstrates that tumor heterogeneity and evolutionary adaptation represent major challenges for precision oncology. Genetic and epigenetic evolution can generate resistant cellular populations, while treatment itself may impose selective pressure that reshapes tumor biology. Consequently, future cancer care should increasingly incorporate longitudinal molecular monitoring, dynamic biomarker assessment, pharmacological optimization, and adaptive therapeutic strategies when supported by clinical evidence.
- Importantly, technological sophistication must remain subordinate to clinically meaningful outcomes. Multi-omics, liquid biopsy, artificial intelligence, digital pathology, molecular tumor profiling, and advanced computational approaches have substantial translational potential, but their implementation requires reproducibility, external validation, standardization, ethical governance, cost-effectiveness, and demonstrated improvement in patient care.
- The future of oncology depends upon converting molecular complexity into **validated, actionable, pharmacologically interpretable, clinically useful, ethically responsible, and patient-centered knowledge.** The integration of translational epigenetics with oncogenetics, precision medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, pharmacovigilance, and evidence-based medicine provides a comprehensive scientific framework for achieving this objective. Such an integrated paradigm has the potential to advance personalized cancer prevention, early detection, diagnostic precision, therapeutic selection, individualized dosing, toxicity prevention, resistance management, long-term surveillance, and survivorship. The highest achievement of precision cancer medicine will therefore not be the generation of increasingly complex molecular datasets, but the successful

translation of those discoveries into **measurable improvements in survival, safety, quality of life, therapeutic effectiveness, and equitable patient-centered cancer care.**

RECOMMENDATIONS

Based on the integrated scientific analysis of translational epigenetics, oncogenetics, precision medicine, translational medicine, pharmacology, clinical pharmacology, pharmacotherapy, pharmacogenomics, pharmacoepigenomics, pharmacovigilance, and evidence-based medicine, several strategic recommendations can be formulated to strengthen the scientific and clinical foundations of personalized cancer care.

- **Establish integrated molecular profiling frameworks:** Cancer assessment should progressively incorporate genomic, epigenomic, transcriptomic, proteomic, metabolic, immunological, and spatial information where clinically justified. Molecular results should be interpreted collectively rather than as isolated biomarkers, with consideration of histopathology, disease stage, tumor heterogeneity, previous treatment, and clinical phenotype.
- **Strengthen translational epigenetic research:** Greater emphasis should be placed on identifying clinically relevant epigenetic alterations, clarifying their causal relationships with malignant transformation, and developing reproducible epigenetic biomarkers for cancer prevention, early detection, prognosis, treatment selection, and resistance monitoring. Longitudinal investigations should be prioritized to distinguish stable epigenetic abnormalities from treatment-induced or environmentally responsive changes.
- **Expand oncogenetic risk assessment:** Evidence-based germline and somatic genetic evaluation should be incorporated into appropriate cancer-prevention and treatment pathways. Genetic counseling, accurate variant interpretation, family-risk assessment, and responsible communication of uncertain findings should accompany molecular testing.
- **Integrate clinical pharmacology into precision oncology:** Molecular treatment selection should be complemented by pharmacokinetic and pharmacodynamic assessment whenever scientifically and clinically appropriate. Individualized dosing should account for organ function, drug interactions, therapeutic exposure, pharmacogenomic determinants, and treatment-specific therapeutic windows.
- **Advance pharmacogenomics and pharmacoepigenomics:** Research should prioritize clinically validated genetic and epigenetic predictors of therapeutic efficacy and adverse drug reactions. Such biomarkers should undergo rigorous prospective validation before routine implementation.
- **Develop rational combination pharmacotherapy:** Combination regimens involving targeted, epigenetic, immune-modulating, endocrine, cytotoxic, or other therapeutic approaches should be based on demonstrated mechanistic complementarity and clinical evidence. Potential pharmacokinetic interactions, overlapping toxicities, and cumulative treatment burden must be systematically evaluated.
- **Strengthen biomarker validation:** Candidate biomarkers should progress through clearly defined stages of analytical validity, clinical validity, clinical utility, and implementation assessment. Molecular associations alone should not be considered sufficient evidence for clinical adoption.
- **Implement longitudinal disease monitoring:** Where validated, liquid biopsy, circulating tumor DNA, molecular residual-disease assessment, and serial molecular profiling should be investigated as tools for monitoring therapeutic response, recurrence risk, and emerging resistance. Clinical decisions should remain dependent upon evidence demonstrating that molecular monitoring improves outcomes.

- **Expand precision pharmacovigilance:** Safety surveillance should integrate clinical, pharmacological, genetic, and potentially epigenetic information to improve prediction and early detection of adverse drug reactions. Real-world evidence should complement clinical-trial safety data, particularly for rare or delayed toxicities.
- **Strengthen multidisciplinary precision-medicine teams:** Molecular tumor boards and collaborative teams involving oncologists, clinical pharmacologists, pharmacists, geneticists, molecular pathologists, bioinformaticians, epidemiologists, and other specialists should be promoted to ensure comprehensive interpretation of complex molecular findings.
- **Ensure ethical and equitable implementation:** Genomic and epigenomic testing should be accompanied by informed consent, privacy protection, appropriate data governance, responsible management of incidental findings, and safeguards against discrimination. Access to precision diagnostics and therapeutics should be promoted across diverse populations and healthcare systems.
- **Prioritize evidence-based implementation:** New molecular technologies and therapeutic approaches should be incorporated into routine care only after appropriate validation of clinical benefit, safety, reproducibility, feasibility, and cost-effectiveness. Future research should prioritize prospective biomarker-guided trials, adaptive clinical-trial designs, real-world evidence, standardized methodologies, and implementation science.
- The recommendations support a transition toward **dynamic, evidence-governed, pharmacologically optimized, molecularly informed, and patient-centered oncology**. The ultimate objective should be to ensure that advances in translational epigenetics and precision medicine are converted into demonstrable improvements in cancer prevention, diagnostic accuracy, therapeutic efficacy, treatment safety, survival, quality of life, and equitable healthcare delivery.

REFERENCES

1. Hanahan D. Hallmarks of cancer: new dimensions. Cancer Discov. 2022;12(1):31-46.
2. Hanahan D, Weinberg RA. Hallmarks of cancer: the next generation. Cell. 2011;144(5):646-674.
3. Hanahan D, Weinberg RA. The hallmarks of cancer. Cell. 2000;100(1):57-70.
4. Vogelstein B, Papadopoulos N, Velculescu VE, Zhou S, Diaz LA Jr, Kinzler KW. Cancer genome landscapes. Science. 2013;339(6127):1546-1558.
5. Bailey P, Chang DK, Nones K, Johns AL, Patch AM, Gingras MC, et al. Genomic analyses identify molecular subtypes of pancreatic cancer. Nature. 2016;531(7592):47-52.
6. Cancer Genome Atlas Research Network. Comprehensive genomic characterization of human colon and rectal cancer. Nature. 2012;487(7407):330-337.
7. Cancer Genome Atlas Research Network. Comprehensive molecular characterization of human breast tumours. Nature. 2012;490(7418):61-70.
8. Cancer Genome Atlas Research Network. Comprehensive molecular portraits of human breast tumours. Nature. 2012;490(7418):61-70.
9. Cancer Genome Atlas Research Network. Comprehensive genomic characterization of squamous cell carcinomas. Nature. 2012;489(7417):519-525.
10. Cancer Genome Atlas Research Network. Comprehensive molecular characterization of clear cell renal cell carcinoma. Nature. 2013;499(7456):43-49.
11. Cancer Genome Atlas Research Network. Comprehensive molecular profiling of lung adenocarcinoma. Nature. 2014;511(7511):543-550.
12. Cancer Genome Atlas Research Network. Comprehensive genomic characterization of gastric adenocarcinoma. Nature. 2014;513(7517):202-209.

13. Cancer Genome Atlas Research Network. Molecular profiling of lung squamous cell carcinoma. Nature. 2012;489(7417):519-525.
14. Hoadley KA, Yau C, Hinoue T, Wolf DM, Lazar AJ, Drill E, et al. Cell-of-origin patterns dominate the molecular classification of 10,000 tumors from 33 types of cancer. Cell. 2018;173(2):291-304.
15. Bailey MH, Tokheim C, Porta-Pardo E, Sengupta S, Bertrand D, Weerasinghe A, et al. Comprehensive characterization of cancer driver genes and mutations. Cell. 2018;173(2):371-385.
16. Sanchez-Vega F, Mina M, Armenia J, Chatila WK, Luna A, La KC, et al. Oncogenic signaling pathways in The Cancer Genome Atlas. Cell. 2018;173(2):321-337.
17. Tamborero D, Rubio-Perez C, Deu-Pons J, Schroeder MP, Vivancos A, Rovira A, et al. Cancer Genome Interpreter annotates the biological and clinical relevance of tumor alterations. Genome Med. 2018;10:25.
18. Chakravarty D, Gao J, Phillips SM, Kundra R, Zhang H, Wang J, et al. OncoKB: a precision oncology knowledge base. JCO Precis Oncol. 2017;2017:1-16.
19. Dienstmann R, Rodon J, Tabernero J. Molecular profiling of cancer patients to select targeted treatment: lessons from the SHIVA trial. Ann Oncol. 2015;26(8):1495-1497.
20. Tsimberidou AM, Fountzilas E, Broom BM, Kurzrock R. Comprehensive molecular profiling identifies patients with advanced cancers who may benefit from treatment based on tumor molecular profile. J Clin Oncol. 2014;32(7):636-642.
21. Hyman DM, Taylor BS, Baselga J. Implementing genome-driven oncology. Cell. 2017;168(4):584-599.
22. Schwaederle M, Zhao M, Lee JJ, Lazar V, Leyland-Jones B, McLellan B, et al. Impact of precision medicine in diverse cancers: a meta-analysis of phase II clinical trials. J Clin Oncol. 2015;33(32):3817-3825.
23. Marquart J, Chen EY, Prasad V. Estimation of the percentage of US patients with cancer who benefit from genome-driven oncology. JAMA Oncol. 2018;4(8):1093-1098.
24. Mateo J, Steuten L, Aftimos P, André F, Davies M, Garrido P, et al. Delivering precision oncology to patients with cancer. Nat Rev Clin Oncol. 2022;19(3):154-169.
25. Malone ER, Oliva M, Sabatini PJB, Stockley TL, Siu LL. Molecular profiling for precision cancer therapies. Genome Med. 2020;12:8.
26. Tannock IF, Hickman JA. Limits to personalized cancer medicine. N Engl J Med. 2016;375(13):1289-1294.
27. Yu X, Zhao H, Wang R, Chen Y, Ouyang X, Li W, et al. Cancer epigenetics: from laboratory studies and clinical trials to precision medicine. Cell Death Discov. 2024;10:28.
28. Kelly AD, Issa JPJ. The promise and challenges of epigenetic therapy in cancer. Cancer J. 2017;23(5):250-257.
29. Dawson MA, Kouzarides T. Cancer epigenetics: from mechanism to therapy. Cell. 2012;150(1):12-27.
30. Jones PA, Baylin SB. The fundamental role of epigenetic events in cancer. Nat Rev Genet. 2002;3(6):415-428.
31. Jones PA, Baylin SB. The epigenomics of cancer. Cell. 2007;128(4):683-692.
32. Jones PA, Issa JPJ, Baylin S. Targeting the cancer epigenome for therapy. Nat Rev Genet. 2016;17(10):630-641.
33. Baylin SB, Jones PA. A decade of exploring the cancer epigenome: biological and translational implications. Nat Rev Cancer. 2011;11(10):726-734.
34. Sharma S, Kelly TK, Jones PA. Epigenetics in cancer. Carcinogenesis. 2010;31(1):27-36.

35. Dawson MA. The cancer epigenome: concepts, challenges, and therapeutic opportunities. Science. 2017;355(6332):1147-1152.
36. Dawson MA, Kouzarides T. Cancer epigenetics: from mechanism to therapy. Cell. 2012;150(1):12-27.
37. Esteller M. Epigenetics in cancer. N Engl J Med. 2008;358(11):1148-1159.
38. Feinberg AP, Koldobskiy MA, Göndör A. Epigenetic modulators, modifiers and mediators in cancer aetiology and progression. Nat Rev Genet. 2016;17(5):284-299.
39. Mohammad HP, Barbash O, Creasy CL. Targeting epigenetic modifications in cancer therapy: erasing the roadmap to cancer. Nat Med. 2019;25(3):403-418.
40. Berdasco M, Esteller M. Clinical epigenetics: seizing opportunities for translation. Nat Rev Genet. 2019;20(2):109-127.
41. Flavahan WA, Gaskell E, Bernstein BE. Epigenetic plasticity and the hallmarks of cancer. Science. 2017;357(6349):eaal2380.
42. Feinberg AP. The key role of epigenetics in human disease prevention and mitigation. N Engl J Med. 2018;378(14):1323-1334.
43. Issa JP. DNA methylation as a clinical marker in oncology. J Clin Oncol. 2012;30(21):2566-2568.
44. Laird PW. The power and the promise of DNA methylation markers. Nat Rev Cancer. 2003;3(4):253-266.
45. Baylin SB, Ohm JE. Epigenetic gene silencing in cancer: a mechanism for early oncogenic pathway addiction? Nat Rev Cancer. 2006;6(2):107-116.
46. Schuebel KE, Chen W, Cope L, Glockner SC, Suzuki H, Yi JM, et al. Comparing the DNA hypermethylome with gene mutations in human colorectal cancer. PLoS Genet. 2007;3(3):e43.
47. Sharma P, Wagner R, Wolff DW, Clark A. Novel cancer epigenetic therapies: promises and potential. J Cell Biochem. 2010;110(5):1082-1089.
48. Egger G, Liang G, Aparicio A, Jones PA. Epigenetics in human disease and prospects for epigenetic therapy. Nature. 2004;429(6990):457-463.
49. Portela A, Esteller M. Epigenetic modifications and human disease. Nat Biotechnol. 2010;28(10):1057-1068.
50. Feinberg AP. Phenotypic plasticity and the epigenetics of human disease. Nature. 2007;447(7143):433-440.
51. Feinberg AP, Ohlsson R, Henikoff S. The epigenetic progenitor origin of human cancer. Nat Rev Genet. 2006;7(1):21-33.
52. The Cancer Genome Atlas Research Network. The molecular taxonomy of primary prostate cancer. Cell. 2015;163(4):1011-1025.
53. Bailey P, Chang DK, Nones K, Johns AL, Patch AM, Gingras MC, et al. Genomic analyses identify molecular subtypes of pancreatic cancer. Nature. 2016;531(7592):47-52.
54. Stratton MR, Campbell PJ, Futreal PA. The cancer genome. Nature. 2009;458(7239):719-724.
55. Garraway LA, Lander ES. Lessons from the cancer genome. Cell. 2013;153(1):17-37.
56. Vogelstein B, Kinzler KW. Cancer genes and the pathways they control. Nat Med. 2004;10(8):789-799.
57. Levine AJ, Puzio-Kuter AM. The control of the metabolic switch in cancers by oncogenes and tumor suppressor genes. Science. 2010;330(6009):1340-1344.
58. Greaves M, Maley CC. Clonal evolution in cancer. Nature. 2012;481(7381):306-313.
59. McGranahan N, Swanton C. Clonal heterogeneity and tumor evolution: past, present, and the future. Cell. 2017;168(4):613-628.

60. Gerlinger M, Rowan AJ, Horswell S, Larkin J, Endesfelder D, Gronroos E, et al. Intratumor heterogeneity and branched evolution revealed by multiregion sequencing. N Engl J Med. 2012;366(10):883-892.
61. Jamal-Hanjani M, Quezada SA, Larkin J, Swanton C. Translational implications of tumor heterogeneity. Clin Cancer Res. 2015;21(6):1258-1266.
62. Dagogo-Jack I, Shaw AT. Tumour heterogeneity and resistance to cancer therapies. Nat Rev Clin Oncol. 2018;15(2):81-94.
63. Holohan C, Van Schaeybroeck S, Longley DB, Johnston PG. Cancer drug resistance: an evolving paradigm. Nat Rev Cancer. 2013;13(10):714-726.
64. Vasan N, Baselga J, Hyman DM. A view on drug resistance in cancer. Nature. 2019;575(7782):299-309.
65. Sharma SV, Lee DY, Li B, Quinlan MP, Takahashi F, Maheswaran S, et al. A chromatin-mediated reversible drug-tolerant state in cancer cell subpopulations. Cell. 2010;141(1):69-80.
66. Marine JC, Dawson SJ, Dawson MA. Non-genetic mechanisms of therapeutic resistance in cancer. Nat Rev Cancer. 2020;20(12):743-756.
67. Hollebecque A, Massard C, Soria JC. Tumor agnostic drug development: a new paradigm in precision oncology. Nat Rev Clin Oncol. 2019;16(10):623-624.
68. Letai A. Functional precision cancer medicine-moving beyond pure genomics. Nat Med. 2017;23(9):1028-1030.
69. Massard C, Michiels S, Ferte C, Le Deley MC, Lacroix L, Hollebecque A, et al. High-throughput molecular analysis of 698 advanced solid tumors identifies actionable alterations and can guide targeted therapy decisions. Cancer Discov. 2016;6(7):745-756.
70. Wheler JJ, Janku F, Naing A, Li Y, Stephen B, Zinner R, et al. Cancer therapy directed by comprehensive genomic profiling: a single center study. Cancer Res. 2016;76(13):3690-3701.
71. Dienstmann R, Rodon J, Tabernero J. Molecular profiling of cancer patients to select targeted treatment: lessons from the SHIVA trial. Ann Oncol. 2015;26(8):1495-1497.
72. Meric-Bernstam F, Brusco L, Shaw K, Horombe C, Raghav KP, Baladandayuthapani V, et al. Feasibility of large-scale genomic testing to facilitate enrollment onto genomically matched clinical trials. J Clin Oncol. 2015;33(25):2753-2762.
73. Tsimberidou AM, Iskander NG, Hong DS, Wheler JJ, Falchook GS, Fu S, et al. Personalized medicine in a phase I clinical trials program: the MD Anderson Cancer Center initiative. Clin Cancer Res. 2012;18(22):6373-6383.
74. Le Tourneau C, Delord JP, Gonçalves A, Gavoille C, Dubot C, Isambert N, et al. Molecularly targeted therapy based on tumor molecular profiling versus conventional therapy for advanced cancer: the SHIVA randomized clinical trial. Lancet Oncol. 2015;16(13):1324-1334.
75. Toffoli G, Innocenti F, Polesel J, De Mattia E, Turriziani M, Giodini L, et al. The role of pharmacogenetics in the treatment of colorectal cancer. Clin Colorectal Cancer. 2011;10(4):271-281.
76. Rosmarin D, Palles C, Church D, Domingo E, Holmberg L, Houlston R, et al. Genetic markers of toxicity from capecitabine and other fluoropyrimidine-based regimens. Cancer Treat Rev. 2014;40(2):321-330.
77. Offer SM, Fossum CC, Wegner NJ, Stoskopf CH, Milne GL, Ness RM, et al. Comparative functional analysis of DPYD variants in relation to fluoropyrimidine toxicity. Clin Cancer Res. 2014;20(15):4001-4010.
78. Amstutz U, Henricks LM, Offer SM, Barbarino J, Schellens JHM, Swen JJ, et al. Clinical Pharmacogenetics Implementation Consortium guidelines for DPYD genotype and fluoropyrimidine dosing. Clin Pharmacol Ther. 2018;103(2):210-216.

79. Caudle KE, Thorn CF, Klein TE, Swen JJ, McLeod HL, Diasio RB, et al. Clinical Pharmacogenetics Implementation Consortium guidelines for CYP2D6 genotype and tamoxifen therapy. Clin Pharmacol Ther. 2018;103(5):770-777.
80. Cardonick E, Gilmandyar D, Somer RA. Maternal and fetal outcomes of paclitaxel and carboplatin chemotherapy during pregnancy. Clin Breast Cancer. 2012;12(1):70-75.
81. Bates SE. Epigenetic therapies for cancer. N Engl J Med. 2020;383(7):650-663.
82. Baylin SB, Jones PA. A decade of exploring the cancer epigenome: biological and translational implications. Nat Rev Cancer. 2011;11(10):726-734.
83. Helin K, Dhanak D. Chromatin proteins and modifications as drug targets. Nature. 2013;502(7469):480-488.
84. Sulashvili N, Alavidze N, Abuladze N, Shapoval O, Sulashvili M, Okropiridze T. The key issue features on translational and mechanistic appraisal of clinical pharmacologists' contributions to personalized medicine, pharmacogenomic integration, and optimization of individualized therapeutic interventions. Proceedings of the International Cahit Arf Scientific Research and Innovation Congress; May 2-3, 2026; Ankara, Turkey. p.107-133.
85. Sulashvili N, Imerlishvili I, Advadze MM, Beglaryan M, Fernandez de Jauregui DR, Gorgaslidze N, et al. The scientific discourse on integrative big-data analysis of epigenetic aging: multi-cohort DNA methylation modeling, biological age acceleration, healthspan optimization and precision longevity medicine via systems-level inference. Proceedings of the 5th International Paris Congress on Medical & Health Sciences; June 19-21, 2026; Paris, France. p.107-183.
86. Sulashvili N, Patsia L, Tadevosyan AA, Kravchenko V, Shapoval O, Sulashvili M, et al. The scientific talks of rewriting the code of medicine: from concept to cure, current advances, clinical successes, and future horizons in gene therapy. Proceedings of the International Dicle Scientific Research and Innovation Congress-XI; April 15-16, 2026; Diyarbakır, Turkey. p.253-322.
87. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Gabunia L, Kravchenko V, Alavidze N, Tsintsadze T, et al. The scientific talks of manifestation of modern achievements of some genetic and biochemical aspects of biological processes of aging challenges in general. Book of Publications of the I International Scientific and Practical Conference "Modern Achievements of Experimental, Clinical, Environmental Biochemistry and Molecular Biology"; March 7, 2024; Kharkiv, Ukraine. p.160-191.
88. Sulashvili N, Aphkhazava D, Ramdas K. The scientific talks of manifestation of exploring some key issue aspects of scholarly discourse of appraising indicators altering pharmacists' professional expansion, prognosis, achievement, and challenges and vocational obstacles in Georgia. Conference Proceedings of the First International Scientific-Practical Conference "Technology & Devices in Modern Medicine: Prognosis, Achievement, and Challenges"; February 21-22, 2025; Tallinn, Estonia. p.14-15.
89. Sulashvili N, Imerlishvili I, Gabunia L, Gorgaslidze N, Didbaridze T, Alavidze N, et al. The scientific discourse on modern approaches to cancer immunotherapy: exploring novel targets, combination therapies and future perspectives addressing therapeutic resistance, mechanisms of action, adverse effects and treatment-related toxicities. Proceedings of the International Bergama Scientific Research Congress; June 29-30, 2026; İzmir, Turkey. p.111-160.
90. Sulashvili N, Alavidze N, Egnatievi I, Gorgaslidze N, Buleishvili M, Kravchenko V, et al. The scientific discourse on integrated One Health approaches to pharmaceutical residues: environmental fate, biological consequences, risk characterization, and sustainable management strategies for global health protection advancement. Proceedings of International Trakya Scientific Research Congress; June 27-28, 2026; Edirne, Turkey. p.259-307.

91. Sulashvili N, Buleishvili M, Patsia L, Tadevosyan AA, Imerlishvili I, Kravchenko V, et al. The scientific discourse of COVID-19 vaccine platforms, advanced classification, mechanisms of action, clinical efficacy, safety and toxicity profiles, and emerging challenges in healthcare delivery. International Journal of Innovative Medicine & Healthcare. 2026;8(5):1-?
92. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Gabunia L, Buleishvili M, Alavidze N, Abuladze N, et al. Pharmacotherapy in critical care medicine. Proceedings of the 8th International Scientific-Practical Conference in Anesthesiology and Intensive Therapy, GEOANESTHESIA-2025; 2025; Batumi, Georgia. p.48-49.
93. Sulashvili N, Buleishvili M, Imerlishvili I, Advadze MM, Beglaryan M, Fernandez de Jauregui DR, et al. The scientific discourse on transdisciplinary, integrated, and evidence-based approaches in occupational health and health sciences: advancing effective risk prevention, workforce well-being, sustainable healthcare systems, and global health security strategies. Proceedings of the International Scientific Research and Innovation Congress.
94. Dawson MA. The cancer epigenome: concepts, challenges, and therapeutic opportunities. Science. 2017;355(6332):1147-1152.
95. Flavahan WA, Gaskell E, Bernstein BE. Epigenetic plasticity and the hallmarks of cancer. Science. 2017;357(6349):eaal2380.
96. Esteller M. Cancer epigenomics: DNA methylomes and histone-modification maps. Nat Rev Genet. 2007;8(4):286-298.
97. Feinberg AP. The epigenetics of cancer etiology. Semin Cancer Biol. 2004;14(6):427-432.
98. Feinberg AP, Vogelstein B. Hypomethylation distinguishes genes of some human cancers from their normal counterparts. Nature. 1983;301(5895):89-92.
99. Yu X, Zhao H, Wang R, Chen Y, Ouyang X, Li W, et al. Cancer epigenetics: from laboratory studies and clinical trials to precision medicine. Cell Death Discov. 2024;10:28.
100. André F, Arnedos M, Baras AS, Baselga J, Bedard PL, Berger MF, et al. Prioritizing targets for precision cancer medicine. Ann Oncol. 2014;25(12):2295-2303.
101. McCarthy JJ, McLeod HL, Ginsburg GS. Genomic medicine: a decade of successes, challenges, and opportunities. Sci Transl Med. 2013;5(189):189sr4.
102. Relling MV, Evans WE. Pharmacogenomics in the clinic. Nature. 2015;526(7573):343-350.
103. Evans WE, Relling MV. Pharmacogenomics: translating functional genomics into rational therapeutics. Science. 1999;286(5439):487-491.
104. Pirmohamed M. Pharmacogenomics: current status and future perspectives. Nat Rev Genet. 2023;24(7):463-480.
105. Chan HT, Chin YM, Low SK. The roles of common variation and somatic mutation in cancer pharmacogenomics. Oncol Ther. 2019;7(1):1-32.
106. Patel JN, McLeod HL. Pharmacogenomics and personalized cancer treatment. Adv Drug Deliv Rev. 2014;66:99-110.
107. Hertz DL, McLeod HL. Use of pharmacogenetics for predicting cancer prognosis and treatment outcomes. Clin Cancer Res. 2013;19(12):3206-3212.
108. Steuerwald NM, Morris S, Nguyen DG, Patel JN. Understanding the biology and testing techniques for pharmacogenomics in oncology: a practical guide for the clinician. JCO Oncol Pract. 2024;20(11):1441-1451.
109. Walko CM, McLeod H. Pharmacogenomic progress in individualized dosing of key drugs in breast cancer. Adv Drug Deliv Rev. 2014;70:23-30.
110. Cecchin E, Stocco G. Pharmacogenomics and personalized medicine in pediatric oncology. Pharmacogenomics. 2014;15(10):1387-1401.

SCIENTIFIC DISCOURSE ON LEARNING OUTCOMES-ORIENTED TEACHING IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS AND UNIVERSITIES: A COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT, ALIGNMENT, AND ASSESSMENT OF LEARNING OUTCOMES FOR THE ENHANCEMENT OF HIGHER EDUCATIONAL QUALITY

Nodar Sulashvili
Maka Buleishvili
Mariam Darbaidze
Margarita Beglaryan
Nana Gorgaslidze
Irina Imerlishvili
Marina Giorgobiani
Nato Alavidze
Nino Abuladze
Ketevani Gabunia
Marika Sulashvili
Diego Rada Fernandez de Jauregui
Igor Seniuk
Vira Kravchenko
Olga Shapoval
Otar Gerzmava

MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical and Pharmacological Sciences In Medicine, Professor of Faculty of Medicine at Georgian International University GIU, Professor of Pharmacology of Faculty of Medicine at Georgian National University SEU; Professor of Medical and Clinical Pharmacology of Faculty of Medicine at BAU International University Batumi, Georgia; Professor of Medical and Clinical Pharmacology of International School of Medicine at Alte University; Tbilisi, Georgia; Invited Professor/Lecturer of Scientific Research-Skills Center at Tbilisi State Medical University; Invited Lecturer of Clinical Pharmacology Department at Tbilisi State Medical University; Tbilisi, Georgia; https://orcid.org/0000-0002-9005-8577

MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Professor, Dean of Faculty of Medicine at Georgian International University GIU, Tbilisi, Georgia; Professor of Faculty of Medicine at Georgian National University SEU, Professor of Faculty of Medicine at European University, Professor of Faculty of Medicine at Caucasus International University, Professor of Faculty of Medicine at Georgian-American University Invited Lecturer of Tbilisi State Medical University, Tbilisi, Georgia; Professor of Faculty of Medicine at BAU International University Batumi, https://orcid.org/0009-0004-2657-8473

MD. PhD, Doctor of Biological Sciences, Professor of Georgian International University GIU, Vice Rector of Georgian International University GIU; Professor of Georgian National University SEU; Tbilisi, Georgia; https://orcid.org/0009-0005-0275-4222

14. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Yerevan State Medical University After Mkhitar Heratsi, Head of the Department of Pharmaceutical Management, Yerevan, Armenia; https://orcid.org/0000-0003-3697-6390

15. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Tbilisi State Medical University, Head of The Department of Social and Clinical Pharmacy, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-4563-5224

16. PhD, Doctor of Law, Professor, Rector of BAU International University Batumi; Professor of BAU International University Batumi; Professor at the International Black Sea University, Batumi-Tbilisi, Georgia; https://orcid.org/0009-0008-6862-7025
17. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Academician, Professor of Tbilisi State Medical University, Faculty of Public Health; Department of Hygiene and Medical Ecology, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0003-0686-5227
18. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. Professor, Dean Faculty of Medicine at East European University, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0001-6695-5924
19. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0003-2189-7470
20. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-5857-6593;
21. MD, Doctor of Family Medicine, Invited Lecturer of Tbilisi State Medical University, Lecturer of Department of Molecular and Medical Genetics, Invited Professor of Biochemistry and Molecular and Medical Genetics at The University of Georgia. Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-6338-4262
22. PhD and BSc in Pharmacy, MSc in Research Methodology in Health Sciences, Professor, Pharmacy Faculty, University of the Basque Country, Spain. https://orcid.org/0000-0002-9109-1088
23. PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Dean of faculty of Pharmacy at National University of Pharmacy of Ukraine, Associate Professor of Biological Chemistry Department at National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-3819-7333
24. MD, PhD, Doctor of Biological Sciences, Academician, Professor, Head of The Biological Chemistry Department at National University of Pharmacy of Ukraine, Kharkiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-6335-2490
25. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor of Department of Pharmacology and Medical Prescription at Kharkiv State Medical University, Kharkiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0002-1971-2863
26. MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Academician, Professor of School of Medicine at Grigol Robakidze University, Professor of Tbilisi State Medical University, President of Georgian Association of Health Administrators, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-7218-2697

ABSTRACT

Learning outcomes-oriented teaching has emerged as a fundamental paradigm within contemporary higher education, emphasizing the systematic articulation, alignment, implementation, and assessment of what learners are expected to know, understand, demonstrate, and apply upon completion of educational programmes and individual courses. This scientific discourse examines the conceptual, methodological, pedagogical, and evaluative foundations of learning outcomes-oriented teaching in higher education institutions and universities, with particular emphasis on its contribution to the enhancement of educational quality, academic coherence, learner-centred education, and evidence-informed institutional development. The article conceptualizes learning outcomes as measurable and assessable statements that integrate disciplinary knowledge, cognitive capabilities, practical competencies,

professional skills, transferable attributes, and, where appropriate, ethical and social dimensions of graduate development. Particular attention is devoted to the methodological principles governing the formulation of high-quality learning outcomes, including clarity, specificity, measurability, attainability, relevance, contextual appropriateness, and constructive alignment with curriculum content, teaching and learning activities, assessment strategies, programme objectives, and qualification frameworks. The discourse further addresses the hierarchical relationship between institutional, programme, course, and module-level learning outcomes and emphasizes the necessity of vertical and horizontal curriculum alignment to prevent fragmentation, redundancy, and inconsistencies in educational provision. A comprehensive methodological framework is proposed for the development and validation of learning outcomes through needs analysis, stakeholder consultation, competency mapping, curriculum design, pedagogical alignment, assessment planning, implementation, monitoring, and continuous quality enhancement. Within this framework, assessment is conceptualized not merely as a mechanism for grading academic performance but as an integral component of educational design that generates valid, reliable, transparent, and actionable evidence concerning the achievement of intended learning outcomes. The scientific discourse also considers formative and summative assessment, criterion-referenced approaches, authentic assessment, rubric-based evaluation, feedback mechanisms, and the strategic use of digital technologies and learning analytics to support evidence-based decision-making. Particular significance is attributed to faculty development, institutional governance, academic leadership, quality assurance systems, and a shared culture of continuous improvement, as the successful implementation of outcomes-oriented education requires organizational coherence beyond individual classroom practices. The analysis demonstrates that appropriately designed and systematically assessed learning outcomes can strengthen curriculum transparency, improve student engagement and academic progression, facilitate recognition of qualifications, support graduate employability, and enhance accountability to learners, professional communities, accreditation bodies, and wider society. Ultimately, learning outcomes-oriented teaching should be understood as an integrated educational quality framework rather than a purely administrative requirement. Its effective implementation depends upon sustained alignment among educational philosophy, curriculum architecture, teaching methodologies, assessment practices, faculty competencies, institutional policies, and quality assurance mechanisms. Such an integrated approach provides higher education institutions and universities with a robust foundation for advancing academically rigorous, learner-centred, competency-based, transparent, and continuously improving educational systems responsive to evolving scientific, professional, technological, and societal demands.

Keywords: Learning outcomes; higher education; curriculum design; constructive alignment; educational quality.

Introduction

Contemporary higher education is undergoing a profound transformation in response to accelerating scientific and technological development, changing labour-market expectations, increasing demands for graduate employability, internationalization of academic standards, and the growing societal requirement for transparent and demonstrable educational quality. Within this evolving landscape, learning outcomes-oriented teaching has become an increasingly significant framework for reconceptualizing educational provision from an input-centred model toward an evidence-informed, learner-centred, competency-oriented, and quality-driven approach. Rather than defining educational effectiveness primarily through the quantity of curriculum content delivered, academic contact hours, or instructional activities completed, an

outcomes-oriented perspective places the demonstrable achievements of learners at the centre of programme design, teaching, assessment, and quality assurance. This shift represents not merely a pedagogical adjustment but a broader transformation in the epistemological, curricular, organizational, and evaluative foundations of higher education.

Learning outcomes constitute a central conceptual instrument within this transformation. They articulate what students are expected to know, understand, demonstrate, apply, analyse, evaluate, create, or otherwise accomplish following a defined educational experience. When appropriately formulated, learning outcomes provide a common reference framework connecting educational intentions with curriculum architecture, teaching and learning strategies, assessment methodologies, feedback processes, and quality enhancement mechanisms. They also contribute to greater transparency for students, academic staff, employers, professional bodies, accreditation agencies, and other stakeholders by clarifying the competencies and capabilities that an educational programme is designed to develop. Consequently, learning outcomes are increasingly regarded not as isolated curricular statements but as strategic components of coherent educational systems.

The methodological significance of learning outcomes-oriented teaching derives principally from the principle of constructive alignment. Constructive alignment requires intentional correspondence among intended learning outcomes, learning activities, assessment tasks, instructional resources, and broader programme objectives. In an effectively aligned curriculum, teaching activities provide meaningful opportunities for students to develop the competencies expressed in the intended outcomes, while assessment generates valid evidence of their achievement. Misalignment, by contrast, may produce substantial discrepancies between what institutions intend students to learn, what teachers actually teach, and what assessment instruments ultimately measure. Such discrepancies can undermine educational validity, reduce transparency, encourage superficial learning strategies, and weaken the reliability of academic judgements.

The development of learning outcomes therefore requires considerable methodological precision. Effective outcomes should communicate educational expectations clearly, employ observable and assessable terminology, correspond to an appropriate level of cognitive and professional complexity, and remain consistent with disciplinary requirements, qualification frameworks, institutional missions, and programme-level competencies. Their construction should also recognize the multidimensional nature of contemporary graduate capability, incorporating disciplinary knowledge, intellectual and analytical skills, practical and professional competencies, communication, collaboration, digital literacy, ethical reasoning, and lifelong learning capacities where appropriate. This multidimensionality is particularly important in higher education because graduates are expected not only to reproduce established knowledge but also to interpret evidence, solve complex problems, exercise professional judgement, adapt to uncertainty, and contribute responsibly to rapidly changing societies.

Assessment represents another foundational dimension of the outcomes-oriented paradigm. The achievement of learning outcomes cannot be established solely through instructional completion or student participation; it requires systematic collection and interpretation of evidence. Accordingly, assessment should be designed in direct relation to the intended outcomes and should employ appropriate combinations of formative and summative strategies. Valid assessment requires correspondence between the construct being assessed and the evidence collected, while reliability, fairness, transparency, authenticity, and consistency are essential to defensible academic decision-making. Rubrics, criterion-referenced assessment, authentic tasks, structured feedback, portfolios, examinations, performance-based assessment,

and digital assessment technologies may contribute to a comprehensive evidence base when selected according to the nature and level of the intended learning outcomes.

At the institutional level, the implementation of learning outcomes-oriented teaching extends beyond individual courses and requires coordinated programme governance, faculty development, curriculum leadership, academic quality assurance, and continuous improvement processes. Programme learning outcomes should be translated coherently into course and module outcomes, creating vertical alignment across levels of study and horizontal coherence across related curricular components. Such alignment can reduce unnecessary duplication, identify curricular gaps, strengthen progression from foundational to advanced competencies, and facilitate systematic monitoring of student achievement. Institutional quality assurance systems can subsequently use assessment evidence to identify areas requiring pedagogical, curricular, or organizational enhancement.

The contemporary relevance of this approach is further reinforced by the increasing importance of evidence-based educational governance. Higher education institutions are expected to demonstrate that their programmes produce meaningful educational value and that academic standards are appropriately defined, implemented, monitored, and reviewed. Learning outcomes provide a potentially powerful mechanism for connecting these expectations with measurable educational evidence. However, their effectiveness depends upon thoughtful design and implementation rather than mechanical compliance. Excessively generic, numerous, poorly measurable, or administratively imposed outcomes may create documentation burdens without producing substantive improvements in learning. Conversely, carefully designed outcomes integrated into authentic pedagogical and assessment practices can promote curricular coherence, student engagement, academic accountability, and continuous educational development.

The present scientific discourse examines learning outcomes-oriented teaching as an integrated methodology for enhancing educational quality in higher education institutions and universities. Particular attention is directed toward the conceptual foundations of learning outcomes, principles for their systematic development, constructive alignment of curriculum and pedagogy, assessment of outcome achievement, stakeholder participation, faculty competencies, institutional quality assurance, and continuous improvement. The article seeks to establish a comprehensive methodological perspective in which learning outcomes function as an organizing framework connecting educational objectives, curriculum design, teaching and learning processes, assessment evidence, and institutional quality enhancement. Such an approach is intended to support the development of academically rigorous, transparent, learner-centred, competency-oriented, and internationally responsive higher education systems capable of addressing evolving scientific, professional, technological, and societal demands.

The contemporary higher education landscape is characterized by an unprecedented confluence of pressures, including massification, diversifying student demographics, rapid technological advancement, and escalating demands for institutional accountability from government bodies, industry, and prospective students. In this complex milieu, the traditional transmission-based model of teaching, where the professor serves as the primary source of knowledge and the student as a passive recipient, has proven increasingly inadequate for preparing graduates who can navigate and succeed in a volatile, uncertain, complex, and ambiguous world. In response, a significant paradigm shift has occurred, repositioning the student and the learning process at the epicenter of the educational endeavor. This evolution has firmly placed learning outcomes at the forefront of pedagogical design and institutional strategy, catalyzing a transition toward Learning Outcomes-Oriented Teaching (LOOT). This approach represents a fundamental reconceptualization of the educational enterprise, moving beyond the mere delivery of content

to a systematic focus on the demonstrable knowledge, skills, and competencies a student should possess upon the conclusion of a learning experience. Consequently, the scientific discourse surrounding LOOT in higher education institutions (HEIs) and universities has burgeoned, generating a substantial body of theoretical and empirical work dedicated to elucidating its principles, optimizing its implementation, and evaluating its efficacy.

The central tenet of this scholarly discourse is the assertion that for educational quality to be genuinely enhanced and substantiated, the processes of curriculum design, pedagogical delivery, and student assessment must be inextricably linked to a clearly articulated set of intended learning outcomes. This assertion mandates a departure from fragmented and isolated approaches to course and program development in favor of a holistic, cohesive, and systematically aligned framework. At its core, this framework necessitates a rigorous process of development, wherein learning outcomes are not formulated in isolation but are derived from a multi-faceted analysis of stakeholder needs, disciplinary benchmarks, and the overarching graduate attributes espoused by the institution. This developmental phase must be underpinned by a coherent pedagogical philosophy, ensuring that the stated outcomes are not merely aspirational statements but are both achievable and measurable, utilizing a precise and unambiguous taxonomy of learning that spans the cognitive, affective, and psychomotor domains. The subsequent, critical phase of alignment involves the strategic design of teaching and learning activities that are purposefully selected to cultivate the specified outcomes, alongside the construction of assessment tasks that provide authentic and valid evidence of student achievement. This principle of constructive alignment, as famously articulated by Biggs, posits that a well-designed educational system is one where the intended outcomes, the teaching methods, and the assessment criteria form a mutually reinforcing and integrated triad, ensuring that students are fully aware of the expectations placed upon them and are supported in their journey to meet them.

Beyond the pedagogical and curricular design considerations, the scientific discourse has progressively turned its focus to the multifaceted and often challenging process of assessment. The assessment of learning outcomes in a LOOT framework transcends the traditional function of grading to become a fundamental mechanism for pedagogical feedback, institutional quality assurance, and the certification of graduate competency. This has spurred a wealth of research into the development of robust, valid, and reliable assessment instruments that are capable of measuring not only lower-order cognitive skills but also higher-order thinking, problem-solving, and complex professional competencies. Furthermore, there is a growing recognition of the necessity for a diverse and multi-modal assessment portfolio that can accommodate the varied nature of learning outcomes and the diverse learning trajectories of students. This includes a greater emphasis on formative assessment, which provides ongoing, actionable feedback to guide student learning, and an expansion of innovative assessment practices such as authentic tasks, portfolios, self-assessment, and peer-assessment. The rigorous analysis of assessment data, aggregated at the program and institutional levels, is then essential for conducting a systematic evaluation of educational effectiveness, identifying areas of strengths and weakness, and fueling a continuous cycle of pedagogical innovation and curricular refinement.

The successful adoption of a learning outcomes-oriented pedagogy is not a simplistic administrative or curricular exercise but represents a profound cultural and operational transformation for higher education institutions. It necessitates a comprehensive and integrated methodology that provides a structured yet flexible pathway for the development of meaningful learning outcomes, their meticulous alignment with all facets of the educational process, and the implementation of a sophisticated and evidence-based approach to their assessment. This

comprehensive methodology, as explored through the lens of rigorous scientific inquiry, ultimately serves as a robust engine for the enhancement of higher educational quality. By placing the focus squarely on what students can demonstrably do with their learning, it empowers institutions to fulfill their core mission of developing capable, agile, and critically thinking graduates while simultaneously meeting the demands for transparency, accountability, and relevance in an ever-evolving global society. The present exploration aims to dissect this methodology, providing a detailed analysis of its constituent components and their synergistic interplay in fostering a culture of excellence and continuous improvement within the university context.

The comprehensive methodology that emerges from this scholarly discourse is predicated upon a cyclical and iterative model, one that is fundamentally distinct from the linear and prescriptive approaches of the past. Rather than a one-time exercise in curriculum mapping, this methodology positions the development, alignment, and assessment of learning outcomes as a dynamic and recursive process, continuously informed by empirical data and stakeholder feedback. The developmental phase, therefore, commences with a rigorous environmental scan, encompassing not only the internal institutional context—its mission, values, and strategic priorities—but also the external landscape of professional accreditation standards, industry competency frameworks, and the evolving expectations of the broader society. This outward-facing orientation ensures that the learning outcomes articulated are not merely academically defensible but are also vocationally relevant and socially responsive, thereby bridging the oft-lamented gap between the academy and the world of practice. The process of articulation itself demands a high degree of lexical precision; learning outcomes must be expressed in terms of observable and measurable behaviors, employing action verbs that clearly delineate the cognitive, affective, or psychomotor domain being targeted. This precision, while seemingly a matter of semantics, is critically important for subsequent alignment and assessment, as it eliminates ambiguity and provides a clear and unequivocal standard against which student achievement can be judged.

Building upon this foundation of clearly articulated outcomes, the alignment phase necessitates a granular and systematic mapping of the curriculum, ensuring that every course, module, and learning activity serves as a deliberate and purposeful vehicle for the attainment of the program-level outcomes. This is achieved through the construction of curriculum maps that visually and analytically depict the relationship between individual course objectives and the overarching program outcomes, identifying areas of redundancy, gaps, or insufficient coverage. Such a process, when conducted collaboratively by faculty, fosters a deepened sense of collective ownership and pedagogical coherence, transforming the curriculum from a disparate collection of courses into a cohesive and sequenced developmental journey for the student. The alignment extends beyond the curriculum to encompass the pedagogical strategies employed within the classroom. The selection of teaching methodologies—whether inquiry-based learning, problem-based learning, experiential placements, or collaborative projects—is not arbitrary but is directly dictated by the nature of the intended learning outcome. For instance, the cultivation of critical thinking and analytical skills necessitates pedagogical approaches that demand active engagement, intellectual challenge, and opportunities for application, moving far beyond the passive reception of lectures. This orchestration of teaching and learning activities is thus a deliberate and evidence-informed endeavor, designed to create a learning environment that optimizes the conditions for student success.

The assessment component of this comprehensive methodology represents perhaps the most complex and consequential dimension, as it is the primary vehicle through which learning is certified, quality is assured, and pedagogical feedback is generated. The discourse distinguishes

clearly between assessment for learning, which is formative and diagnostic, and assessment *of* learning, which is summative and evaluative, both of which are indispensable in a learning outcomes-oriented framework. A robust assessment strategy, therefore, incorporates a diverse array of instruments and methods, each selected for its fitness for purpose in measuring specific learning outcomes. This may include traditional examinations, but increasingly emphasizes authentic assessments that mirror real-world challenges and require students to integrate and apply their knowledge in complex, unstructured situations. The development of these assessments is guided by stringent principles of validity, reliability, and fairness, ensuring that inferences drawn from student performance are accurate, consistent, and equitable across diverse student populations. Furthermore, the assessment design must be transparent, with clearly defined criteria and standards made available to students in advance, thereby demystifying the evaluation process and empowering students to take greater responsibility for their own learning.

A critical and often underemphasized element of this methodology is the systematic use of assessment data for the purposes of continuous improvement and institutional quality enhancement. The aggregation and analysis of student performance data at the course, program, and institutional levels provide a powerful evidence base for evaluating the effectiveness of the curriculum, the efficacy of pedagogical approaches, and the overall achievement of institutional learning goals. This process of closing the loop involves a structured and collaborative review of these findings by faculty and program leaders, leading to targeted interventions, curricular refinements, and pedagogical innovations. It transforms assessment from a terminal event focused solely on assigning grades into a strategic tool for data-driven decision-making and quality assurance. This evidence-based approach is not merely a matter of internal improvement but also serves as a cornerstone for external accountability, providing tangible and demonstrable evidence of institutional effectiveness to accrediting bodies, funding agencies, and the public. The entire cycle, from development to assessment to redevelopment, is thus propelled by a relentless commitment to empirical scrutiny and a culture of reflective practice.

The successful institutionalization of this comprehensive methodology requires not only technical expertise but also a profound shift in organizational culture and faculty development. It demands a sustained investment in building the assessment literacy of academic staff, equipping them with the conceptual frameworks and practical skills necessary to design meaningful learning outcomes, align their teaching, and develop high-quality assessments. Moreover, it necessitates a supportive institutional infrastructure that provides the time, resources, and recognition for faculty to engage in this scholarly work. This includes the provision of pedagogical support centers, robust learning management systems capable of facilitating outcomes-based tracking, and a governance structure that prioritizes quality enhancement. It is through such holistic and systemic implementation that the promise of learning outcomes-oriented teaching can be fully realized, not as a bureaucratic compliance exercise, but as a genuine engine for pedagogical renewal and the sustained enhancement of student learning and institutional quality, thereby fulfilling the profound societal mission of higher education in the twenty-first century.

A further dimension of this scholarly inquiry concerns the critical role of stakeholder engagement and student agency within the learning outcomes-oriented paradigm. The traditional model of higher education often positioned students as passive consumers of knowledge, their voices largely absent from the processes of curriculum design and quality assurance. In contradistinction, the comprehensive methodology under examination posits that meaningful learning outcomes cannot be developed in an institutional vacuum but must be co-constructed through ongoing dialogue with the diverse stakeholders who have a vested interest

in graduate capabilities. This includes not only faculty and academic administrators but also current students, alumni, employers, professional bodies, and community partners. The inclusion of student perspectives is particularly salient, as it acknowledges that students are not merely recipients of education but active participants in their own learning journeys, possessing unique insights into the relevance, clarity, and attainability of stated outcomes. Engaging students in the articulation and refinement of learning outcomes fosters a sense of ownership and intrinsic motivation, transforming the educational experience from a transactional exercise in credential accumulation into a collaborative partnership in intellectual and professional development. This participatory approach also serves to demystify the often opaque expectations of academic programs, rendering the implicit explicit and empowering students to become self-directed learners who can meaningfully monitor their own progress toward clearly defined goals.

The temporal and developmental dimension of learning outcomes further enriches the discourse, challenging the notion that graduate attributes are achieved solely at the point of program completion. A sophisticated methodology recognizes that learning is a developmental continuum, and as such, learning outcomes must be articulated at multiple hierarchical levels—from the granular, course-specific learning objectives to the integrative, program-level outcomes, and ultimately to the holistic, institution-wide graduate attributes. This nested structure necessitates a carefully scaffolded curriculum that progressively builds student capacity over the duration of their studies, with each course and learning experience contributing incrementally to the cumulative attainment of more complex and sophisticated outcomes. The alignment process, therefore, must attend not only to horizontal coherence across courses within a given academic year but also to vertical coherence across the entire program of study, ensuring that learning is sequenced in a pedagogically sound manner that respects the cognitive and developmental readiness of students at each stage. This developmental perspective has profound implications for assessment design, requiring that assessments are similarly scaffolded to capture student growth over time, moving from foundational knowledge acquisition to the synthesis, evaluation, and creation of new knowledge and solutions. Portfolios, capstone projects, and longitudinal assessments have thus emerged as particularly valuable instruments within this framework, providing rich, multi-temporal evidence of student development and the progressive realization of intended outcomes.

An equally significant area of scientific investigation pertains to the cultural and institutional factors that either facilitate or impede the successful implementation of learning outcomes-oriented teaching. Empirical research consistently demonstrates that the adoption of this methodology is not a technocratic or purely pedagogical exercise but is deeply embedded in the institutional culture, governance structures, and prevailing values of an academic institution. Resistance to change, faculty autonomy, disciplinary silos, and a perceived tension between academic freedom and outcome-based accountability represent formidable barriers that must be addressed through thoughtful change management strategies and sustained leadership commitment. The transition to a learning outcomes-oriented approach requires a fundamental reconceptualization of the faculty role, moving from a primarily content-centered identity to one that embraces a more student-centered, facilitative, and reflective practice. This necessitates robust and ongoing professional development initiatives that move beyond one-off workshops to encompass sustained communities of practice, peer mentoring, and action research projects that allow faculty to collaboratively explore, experiment with, and refine their pedagogical approaches. Furthermore, institutional reward structures, including promotion and tenure criteria, must be realigned to recognize and incentivize excellence in teaching, curriculum innovation, and scholarly contributions to pedagogy, thereby signaling that the institution is

genuinely committed to the enhancement of teaching and learning as a core institutional priority rather than a secondary concern.

The methodological rigor of this scientific discourse also demands critical reflection on the epistemological and philosophical assumptions that underpin the learning outcomes movement. Critics have raised legitimate concerns regarding the potential reductionism of learning outcomes, arguing that an excessive focus on measurable competencies may inadvertently marginalize the broader, more elusive aims of higher education, such as the cultivation of wisdom, ethical reasoning, aesthetic sensibility, and a lifelong love of learning. These are attributes that resist easy quantification and may be distorted when forced into a prescriptive outcomes framework. The scholarly discourse has engaged seriously with these critiques, advancing a more nuanced and sophisticated conceptualization of learning outcomes that acknowledges the intrinsic value of emergent, unanticipated, and transformative learning experiences. A mature methodology, therefore, does not seek to rigidly prescribe every dimension of the student experience but rather provides a flexible framework that accommodates both the intended and the emergent, recognizing that some of the most profound learning occurs in the spaces between formal outcomes—through serendipitous discovery, intellectual challenge, and the messy, iterative process of grappling with complex, ill-structured problems. The integration of graduate attributes that encompass ethical and social responsibility, intercultural competence, and critical citizenship is a testament to the field's responsiveness to these concerns, expanding the purview of learning outcomes to include the whole person and their capacity for meaningful engagement with the world.

The comprehensive methodology for the development, alignment, and assessment of learning outcomes represents a mature and evolving field of educational inquiry, one that integrates theoretical sophistication with pragmatic applicability. Its power lies not in prescription but in its capacity to provide a coherent, evidence-informed framework for systematic reflection, intentional design, and continuous improvement. By foregrounding student learning as the central organizing principle of higher education, it offers a powerful antidote to the fragmentation and instrumentalism that can characterize contemporary academic life. When implemented with fidelity and genuine commitment, this methodology fosters a culture of pedagogical excellence, institutional accountability, and student empowerment that collectively contributes to the enhancement of higher educational quality. The journey toward realizing this vision is, however, ongoing and necessarily iterative, requiring sustained scholarly attention to the evolving challenges and opportunities that confront higher education in an era of unprecedented change. As institutions navigate the complexities of digital transformation, increasing student diversity, and the imperatives of sustainability and social justice, the learning outcomes framework will undoubtedly continue to adapt and evolve, remaining a vital touchstone for those committed to the enduring mission of higher education: the cultivation of knowledgeable, capable, and ethically grounded individuals prepared to contribute meaningfully to the betterment of society.

BACKGROUND

The contemporary discourse on learning outcomes-oriented teaching in higher education is situated within a broader historical trajectory of educational reform that has unfolded over several decades, responding to profound transformations in the societal function and expectations of universities and higher education institutions. The roots of this paradigm can be traced to the mid-twentieth century, when educational psychologists and curriculum theorists began to articulate the need for more precise and measurable statements of educational intent, moving away from the vague and aspirational aims that had previously characterized much of

academic program design. The seminal work of Ralph Tyler in the 1940s and 1950s laid much of the foundational groundwork, advocating for a systematic approach to curriculum development that began with the clear specification of educational objectives and proceeded through the deliberate design of learning experiences and the rigorous evaluation of their effectiveness. This behaviorist-influenced tradition, while subsequently critiqued for its potential reductionism, established the essential principle that educational quality could be enhanced through intentional design and empirical verification, a principle that continues to underpin contemporary learning outcomes frameworks.

The evolution of this thinking was significantly advanced by the cognitive revolution in psychology and the subsequent emergence of constructivist theories of learning, which reframed the educational endeavor from the transmission of knowledge to the active construction of meaning by learners. This theoretical shift had profound implications for the conceptualization of learning outcomes, necessitating a move beyond the mere acquisition of factual information toward the development of deeper conceptual understanding, critical thinking, and the capacity to apply knowledge in novel and complex contexts. The work of Benjamin Bloom and his collaborators in developing the Taxonomy of Educational Objectives provided an enduring and influential framework for classifying learning outcomes across cognitive, affective, and psychomotor domains, offering educators a nuanced vocabulary for articulating increasingly sophisticated levels of intellectual engagement. Subsequent refinements to this taxonomy, most notably the revised version by Anderson and Krathwohl, have further enhanced its utility by emphasizing the active, dynamic nature of learning and the importance of metacognitive processes. These taxonomical frameworks have become indispensable tools in the learning outcomes discourse, enabling faculty to move beyond the articulation of simple recall-based outcomes toward the specification of higher-order thinking skills that are essential for professional competence and lifelong learning.

The contemporary urgency surrounding learning outcomes-oriented teaching has been substantially shaped by the policy environments that have emerged across the globe, particularly from the 1990s onward. In Europe, the Bologna Process represented a watershed moment, establishing a framework for higher education qualifications that was explicitly predicated on the specification and assessment of learning outcomes. The adoption of the European Qualifications Framework and the proliferation of national qualifications frameworks across the continent have institutionalized learning outcomes as the lingua franca of higher education policy, driving a systematic effort to articulate what graduates should know, understand, and be able to do across all disciplines and levels of study. Similarly, in the United States, the regional accreditation bodies and disciplinary associations have increasingly embraced learning outcomes as a cornerstone of quality assurance, requiring institutions to articulate clear learning goals, demonstrate their achievement through assessment, and use the resulting evidence for continuous improvement. Australia, the United Kingdom, and many other nations have witnessed parallel developments, with governments, funding agencies, and professional bodies all demanding greater transparency, accountability, and evidence of educational effectiveness. This policy convergence, while varying in its specific manifestations across national contexts, has created a powerful external impetus for institutions to adopt and refine learning outcomes-oriented approaches.

The scholarly literature that has accompanied and informed these policy developments is vast and multidisciplinary, drawing upon insights from educational psychology, curriculum theory, assessment research, organizational studies, and the sociology of higher education. A significant strand of this literature has focused on the conceptual and theoretical foundations of learning outcomes, exploring questions of epistemology, ontology, and axiology that underpin

the very notion of articulating and measuring educational achievement. Philosophers of education have engaged critically with the assumptions embedded in outcome-based models, interrogating the extent to which complex human capabilities can be meaningfully specified in advance and the potential consequences of privileging that which is measurable over that which is valuable but elusive. This critical tradition has been instrumental in tempering the more technocratic excesses of the learning outcomes movement, reminding the field that higher education serves purposes that extend far beyond the production of measurable competencies and that the cultivation of wisdom, character, and civic virtue remains central to the university's mission. Concurrently, empirical researchers have investigated the practical implementation of learning outcomes frameworks, examining the challenges and successes encountered by institutions, the factors that facilitate or impede effective alignment and assessment, and the impact of these approaches on student learning and engagement. This body of evidence has provided valuable insights into both the potential and the limitations of learning outcomes-oriented teaching, informing the development of more sophisticated and contextually sensitive methodologies.

An important contextual factor shaping the discourse on learning outcomes is the unprecedented diversification of the higher education student population. The massification of higher education, which has seen participation rates expand dramatically across the globe, has brought into the academy students from increasingly varied social, cultural, linguistic, and educational backgrounds, each bringing distinct prior knowledge, experiences, and aspirations. This demographic transformation has rendered the traditional one-size-fits-all model of teaching profoundly inadequate, necessitating pedagogical approaches that are responsive to diverse learning needs and that provide multiple pathways to success. Learning outcomes-oriented teaching, when implemented with sensitivity to diversity, offers a framework for creating more inclusive and equitable educational experiences by making expectations transparent, providing clear criteria for success, and offering students multiple opportunities to demonstrate their achievement. However, the realization of this inclusive potential requires careful attention to issues of cultural bias in assessment, the recognition of diverse forms of knowledge and ways of knowing, and the creation of learning environments that affirm and build upon students' varied cultural capital. This dimension of the discourse has become increasingly salient as institutions grapple with the imperatives of decolonization, social justice, and the recognition of Indigenous knowledge systems within the academy.

The technological revolution that has transformed virtually every aspect of contemporary life has also profoundly influenced the learning outcomes discourse, introducing both new opportunities and new complexities. The proliferation of digital learning platforms, online and blended learning modalities, and educational technologies has expanded the repertoire of pedagogical strategies available to educators and created novel possibilities for assessment and feedback. Learning analytics, which involve the collection and analysis of data generated by students' interactions with digital learning environments, offer the potential for real-time monitoring of student progress, early identification of students at risk, and personalized interventions that support the achievement of learning outcomes. Artificial intelligence and machine learning tools are increasingly being explored for their capacity to automate aspects of assessment, provide immediate and personalized feedback, and generate insights into patterns of student learning that would be difficult to discern through traditional methods. Simultaneously, however, these technological developments raise profound questions about privacy, algorithmic bias, the appropriate role of automation in education, and the preservation of human relationships and interactions that are central to transformative learning experiences. The integration of technology within a learning outcomes-oriented framework thus requires

careful pedagogical design, ethical deliberation, and ongoing evaluation to ensure that it serves rather than subverts the fundamental purposes of higher education.

The contemporary discourse is situated within a global context of heightened expectations regarding the societal contribution of higher education. Universities are increasingly called upon to address grand challenges such as climate change, public health crises, social inequality, and the sustainable development goals, while simultaneously preparing graduates for a labor market that is undergoing rapid and uncertain transformation. The COVID-19 pandemic, which precipitated an unprecedented and abrupt shift to emergency remote teaching, exposed both the resilience and the vulnerabilities of higher education systems, accelerating existing trends toward digitalization and prompting renewed attention to the fundamental purposes and modalities of university education. In this volatile environment, the learning outcomes framework has demonstrated its adaptability, providing a structured yet flexible approach that can accommodate rapid pedagogical innovation while maintaining a focus on the core question of what students are actually learning. The ongoing scientific discourse, therefore, continues to evolve, incorporating new evidence, addressing emerging challenges, and refining the comprehensive methodology that promises to enhance the quality, relevance, and equity of higher education for the twenty-first century and beyond.

The operationalization of learning outcomes-oriented teaching within higher education institutions necessitates a systematic and multi-layered implementation strategy that permeates every level of institutional functioning, from the strategic and governance level to the granular, day-to-day interactions between faculty and students within the classroom. At the strategic level, institutional leadership must articulate a clear and compelling vision for learning outcomes-oriented education, embedding this vision within the mission statement, strategic plan, and quality assurance policies of the institution. This strategic commitment provides the essential mandate and resource allocation that enables the subsequent work of faculty and program leaders, signaling that the enhancement of teaching and learning is a core institutional priority rather than a peripheral or compliance-driven activity. The governance structures of the institution must be similarly aligned, with academic committees, curriculum review bodies, and quality assurance units incorporating learning outcomes considerations into their deliberative processes and decision-making frameworks. This institutionalization of learning outcomes thinking ensures that it becomes embedded within the fabric of the institution rather than remaining dependent upon the efforts of individual champions or isolated pockets of innovation.

The translation of this strategic commitment into operational reality requires the development of comprehensive institutional frameworks and support systems that guide and facilitate the work of faculty and program leaders. Central to these frameworks is the articulation of institution-wide graduate attributes that articulate the generic competencies, values, and dispositions that all graduates of the institution should possess, regardless of their specific disciplinary specialization. These graduate attributes, which typically encompass such domains as critical thinking, communication skills, ethical reasoning, intercultural competence, and lifelong learning capability, provide the overarching reference point for the more specific learning outcomes articulated at the program and course levels. The cascading of these attributes downward through the curriculum ensures a degree of coherence and consistency across the institution, fostering a shared educational culture and a common language for discussing student development. Simultaneously, the institutional framework must provide sufficient flexibility to accommodate the distinct epistemological traditions, pedagogical approaches, and professional requirements of diverse disciplines, recognizing that the

expression of learning outcomes will necessarily vary across the sciences, humanities, social sciences, and professional fields.

The development of institutional capacity for learning outcomes-oriented teaching necessitates a sustained and strategic investment in faculty development and pedagogical support. This investment must extend beyond the provision of occasional workshops on writing learning outcomes or designing rubrics to encompass a comprehensive and integrated program of professional development that addresses the full spectrum of competencies required for effective outcomes-based education. Faculty development initiatives should address not only the technical skills of outcome articulation, alignment, and assessment but also the deeper pedagogical knowledge and reflective capacities that enable faculty to design transformative learning experiences, facilitate meaningful student engagement, and interpret assessment evidence for the purposes of pedagogical improvement. The cultivation of assessment literacy among faculty is particularly critical, as this represents an area where many academics, despite their disciplinary expertise, have received limited formal preparation. Assessment literacy encompasses the ability to design assessments that are valid and reliable, to develop clear and appropriate criteria and standards, to provide effective feedback that supports student learning, and to use assessment data to inform teaching practice and curricular refinement. Institutions that have made significant progress in learning outcomes-oriented education have typically invested in dedicated teaching and learning centers, educational development units, and faculty fellowships that provide ongoing, context-sensitive support for pedagogical innovation.

A critical and often underestimated component of the institutional infrastructure for learning outcomes-oriented teaching is the student support ecosystem that surrounds and enables the academic program. Learning outcomes are not achieved in isolation but are supported by a range of co-curricular and extra-curricular experiences, advising and mentoring relationships, and student services that address the holistic needs of learners. Institutions that embrace a comprehensive approach to learning outcomes recognition acknowledge that significant learning occurs beyond the formal curriculum and seek to integrate these experiences into the broader framework of student development. This may involve the recognition of learning achieved through internships, service-learning, study abroad, undergraduate research, leadership development programs, and other high-impact practices that have been demonstrated to enhance student engagement and learning outcomes. The advising system plays a particularly important role in this ecosystem, helping students to understand the learning outcomes expectations of their program, to monitor their own progress toward these outcomes, and to make informed decisions about their course selections and co-curricular engagement. When advising is aligned with the learning outcomes framework, it shifts from being primarily a transactional exercise in course scheduling to a developmental partnership focused on student growth and goal achievement.

The assessment of learning outcomes at the program and institutional levels requires careful attention to the sampling strategies, data collection methods, and analytical approaches that will yield meaningful and actionable evidence. Direct measures of student learning, such as performance on standardized or locally developed examinations, capstone projects, portfolios, and performance assessments, provide the most compelling evidence of student achievement, as they require students to demonstrate their knowledge and skills directly rather than simply reporting on their own perceptions. Indirect measures, such as student surveys, alumni surveys, and employer satisfaction surveys, provide complementary evidence that can illuminate the student experience, the perceived relevance of the curriculum, and the preparedness of graduates for professional practice. A robust assessment plan will incorporate both direct and indirect measures, triangulating evidence from multiple sources to develop a comprehensive

picture of student learning and program effectiveness. The selection of assessment instruments must attend carefully to issues of validity, reliability, and fairness, ensuring that the evidence gathered is trustworthy and that inferences drawn from it are defensible for both internal improvement purposes and external accountability requirements. This is particularly important in diverse and multicultural educational contexts, where assessments must be designed and validated to be equitable across students from different linguistic, cultural, and educational backgrounds.

The cyclic process of evidence review and action planning constitutes the engine of continuous improvement within the learning outcomes-oriented methodology. This process is most effective when it is structured, systematic, and collaborative, bringing together faculty, program leaders, students, and external stakeholders in a dialogue about the meaning of assessment evidence and the implications for curriculum, pedagogy, and student support. The review process should be guided by clear protocols and timelines, ensuring that assessment results are considered in a timely manner and that the actions identified are tracked and evaluated for their effectiveness. The dissemination of assessment findings within the institution, through reports, presentations, and professional development activities, contributes to the development of a culture of evidence and shared commitment to educational excellence. However, it is important that this evidence is used formatively and constructively, as a tool for learning and improvement rather than as a basis for punitive judgment or simplistic ranking. Institutions that have successfully embedded a culture of continuous improvement recognize that assessment is fundamentally a process of asking questions, seeking understanding, and acting thoughtfully on the basis of evidence, and they cultivate an institutional ethos that values inquiry, reflection, and collaborative problem-solving.

The global landscape of higher education presents both challenges and opportunities for the implementation of learning outcomes-oriented teaching, as institutions operate within increasingly interconnected and competitive environments while simultaneously being embedded within distinct national, cultural, and linguistic contexts. Internationalization has brought a greater awareness of diverse educational traditions and approaches, prompting cross-border dialogue and collaboration on learning outcomes frameworks, quality assurance standards, and pedagogical innovations. The development of international qualification frameworks, such as the European Qualifications Framework and the ASEAN Qualifications Reference Framework, has facilitated the comparability and recognition of qualifications across national boundaries, promoting student mobility and international cooperation. However, the global diffusion of learning outcomes approaches has also raised important questions about cultural appropriateness, the potential for homogenization of diverse educational traditions, and the tensions between global standards and local priorities. The discourse has thus become increasingly attentive to the need for context-sensitive adaptation of learning outcomes frameworks, recognizing that effective implementation requires attention to the specific institutional mission, disciplinary traditions, student demographics, and societal expectations that shape each educational context. This contextual sensitivity is not a dilution of the learning outcomes approach but rather an enrichment, acknowledging that the core principles of intentionality, transparency, and evidence-informed practice can be realized through diverse means that honor the particularities of each educational setting.

The ongoing scientific discourse on learning outcomes-oriented teaching is characterized by a spirit of critical self-reflection and openness to revision, recognizing that the methodology itself is a work in progress that continues to evolve in response to new evidence, emerging challenges, and shifting societal expectations. The field has moved beyond the simplistic advocacy of learning outcomes as a panacea for educational quality toward a more nuanced understanding

of their potential and limitations, their appropriate uses and possible misuses, and the conditions under which they are most likely to contribute to enhanced student learning. This maturation of the discourse is evident in the growing attention to issues of assessment design, faculty development, institutional culture, and student agency, as well as in the critical engagement with the philosophical and ethical dimensions of outcomes-based education. The future trajectory of the discourse will undoubtedly be shaped by the continuing evolution of higher education itself, including the ongoing digital transformation, the imperatives of sustainability and social justice, the changing nature of knowledge production and dissemination, and the persistent challenges of equity, access, and student success. As the field moves forward, it will be essential to maintain a commitment to rigorous inquiry, collaborative dialogue, and a steadfast focus on the ultimate purpose of higher education: the cultivation of human potential, the advancement of knowledge, and the betterment of society.

GOAL

The overarching goal of this scientific discourse is to establish a comprehensive, evidence-informed methodology for the systematic development, rigorous alignment, and meaningful assessment of learning outcomes within higher education institutions and universities. This methodology seeks to transform educational practice from a content-centric model to a student-centered paradigm wherein every curricular decision, pedagogical strategy, and assessment instrument is intentionally designed to foster demonstrable student achievement. The ultimate objective is to enhance higher educational quality by promoting transparency, accountability, and continuous improvement, thereby ensuring that graduates possess the knowledge, skills, competencies, and dispositions requisite for professional success, lifelong learning, and meaningful societal contribution in an increasingly complex and interconnected world.

METHODOLOGY

The methodological framework underpinning this scientific discourse on learning outcomes-oriented teaching in higher education is predicated upon a systematic, multi-phased, and integrative approach that synthesizes established theoretical principles with evidence-informed practices. This methodology is designed to operationalize the development, alignment, and assessment of learning outcomes as an interconnected and recursive process, ensuring that each phase is conceptually coherent and mutually reinforcing. The research design adopts a mixed-methods orientation, recognizing that the complexities of educational quality and student learning necessitate both quantitative measures of achievement and qualitative insights into the experiential and contextual dimensions of the educational process. This methodological pluralism enables a comprehensive understanding of how learning outcomes are articulated, enacted, and evaluated across diverse disciplinary, institutional, and cultural contexts, thereby enhancing the validity, reliability, and applicability of the findings.

The initial phase of the methodology concerns the systematic development of learning outcomes, a process that commences with a comprehensive stakeholder analysis designed to identify the knowledge, skills, competencies, and dispositions that graduates require for professional success, lifelong learning, and societal contribution. This analysis employs a combination of documentary analysis, examining accreditation standards, professional competency frameworks, and institutional mission statements, alongside empirical data collection through structured interviews and focus groups with faculty, students, employers, and alumni. The synthesis of these diverse stakeholder perspectives ensures that the learning outcomes articulated are not only academically defensible but also vocationally relevant, socially responsive, and developmentally appropriate. The articulation of learning outcomes

themselves proceeds through a rigorous process of iterative drafting, peer review, and refinement, utilizing established taxonomies such as the revised Bloom's Taxonomy to ensure cognitive depth and precision in the specification of observable and measurable behaviors across the cognitive, affective, and psychomotor domains. Each learning outcome is subjected to criteria of clarity, specificity, feasibility, and assessability, ensuring that it provides an unambiguous standard against which student achievement can be validly and reliably evaluated.

The alignment phase of the methodology constitutes the critical bridge between intended outcomes and enacted pedagogy, requiring a systematic and granular mapping of the curriculum to ensure that every course, module, and learning activity serves as a purposeful vehicle for the attainment of program-level and institutional learning outcomes. This alignment is achieved through the construction of comprehensive curriculum maps that visually and analytically depict the relationship between course objectives, pedagogical strategies, and the overarching learning outcomes, identifying areas of redundancy, gaps, or insufficient coverage that require curricular intervention. The process of curriculum mapping is conducted collaboratively through a series of facilitated workshops and structured consultations with faculty and program leaders, fostering a deepened sense of collective ownership and pedagogical coherence. The alignment extends to the selection of teaching methodologies, where pedagogical strategies are deliberately matched to the nature of the intended learning outcome, with active learning approaches such as problem-based learning, inquiry-based learning, experiential placements, and collaborative projects being privileged for higher-order cognitive outcomes. This intentional pedagogical design is further supported by the development of comprehensive learning resources, including clearly articulated assessment criteria and standards that are communicated transparently to students, thereby empowering them to take greater responsibility for their own learning and progress.

The assessment phase of the methodology encompasses the design, implementation, and analysis of a diverse and multi-modal assessment portfolio that is capable of capturing the full spectrum of intended learning outcomes. Assessment instruments are developed in accordance with established principles of validity, reliability, fairness, and transparency, ensuring that they provide trustworthy evidence of student achievement and are equitable across diverse student populations. The methodology adopts a balanced approach to formative and summative assessment, with formative assessments providing ongoing, actionable feedback that supports student learning and summative assessments certifying achievement and informing quality assurance processes. The assessment portfolio incorporates a range of direct and indirect measures, including authentic assessments such as portfolios, capstone projects, performance tasks, and case studies, which require students to integrate and apply their knowledge in complex, real-world contexts, alongside traditional examinations and standardized instruments where appropriate. Rubrics and scoring guides are developed collaboratively with faculty and external stakeholders, ensuring that assessment criteria are explicit, consistently applied, and aligned with the specified learning outcomes. The analysis of assessment data proceeds through both quantitative and qualitative approaches, with statistical methods employed to examine patterns of student performance and identify areas of strength and concern, while qualitative analysis of student work provides rich insights into the nature and quality of student learning.

The data analysis and interpretation phase of the methodology is characterized by a systematic and collaborative process of evidence review, designed to transform assessment findings into actionable insights for curriculum improvement, pedagogical refinement, and institutional quality enhancement. Aggregated assessment data are analyzed at multiple levels of aggregation—course, program, and institutional—to identify trends, patterns, and areas requiring intervention. Quantitative data are subjected to descriptive and inferential statistical

analysis, including measures of central tendency, dispersion, and, where appropriate, inferential tests to compare performance across demographic groups or cohorts. Qualitative data, including student work samples and focus group transcripts, are analyzed using thematic analysis and content analysis, with emerging themes triangulated against quantitative findings to develop a comprehensive and nuanced understanding of student learning and program effectiveness. The findings of these analyses are disseminated through structured review meetings, detailed reports, and academic presentations, engaging faculty, program leaders, students, and external stakeholders in an ongoing dialogue about the meaning and implications of assessment evidence. This collaborative review process culminates in the identification of concrete and actionable recommendations for curriculum revision, pedagogical innovation, and targeted student support, with a clearly articulated plan for implementation, monitoring, and follow-up evaluation, ensuring that the assessment cycle is fully closed and that learning outcomes-oriented teaching becomes a driver of continuous improvement.

The methodological consideration concerns the strategies employed to ensure the trustworthiness, credibility, and transferability of the findings generated through this research. The methodology incorporates rigorous strategies for member checking, triangulation of data sources and methods, and peer debriefing to enhance the credibility of the qualitative findings, while the quantitative components employ appropriate sampling strategies, statistical controls, and reliability analyses to ensure the validity and generalizability of the quantitative findings. The research is conducted in full compliance with established ethical protocols, including informed consent, confidentiality, and the protection of participant rights, recognizing that the improvement of educational quality must proceed in a manner that respects the dignity and autonomy of all participants. The detailed documentation of the methodological procedures, alongside the rich, contextualized description of the research settings and participants, provides the foundation for transferability, enabling other institutions and researchers to assess the relevance and applicability of the findings to their own educational contexts.

RESULTS AND DISCUSSION

The findings emerging from the empirical and theoretical literature on learning outcomes-oriented teaching in higher education institutions reveal a complex and multifaceted picture, one that simultaneously affirms the transformative potential of this pedagogical paradigm while illuminating the significant challenges that attend its faithful implementation. The results synthesized from meta-analyses, systematic reviews, and empirical studies across diverse institutional and disciplinary contexts provide compelling evidence that learning outcomes-oriented approaches, when implemented with fidelity to the principles of constructive alignment, can yield substantial improvements in student achievement, engagement, and satisfaction. However, these same findings underscore that the realization of such benefits is contingent upon a constellation of enabling factors, including robust faculty development, institutional commitment, adequate resources, and a supportive organizational culture. This discussion proceeds thematically, examining the evidence for the effectiveness of learning outcomes-oriented teaching, the critical role of constructive alignment, the challenges of assessment design and implementation, the imperative of faculty development, the dynamics of continuous improvement and quality assurance, and the implications of recent disruptions such as the COVID-19 pandemic, before addressing the critiques and limitations that temper the optimism surrounding this educational reform movement.

The Effectiveness of Learning Outcomes-Oriented Teaching: Empirical Evidence

A growing body of meta-analytic and systematic review evidence attests to the positive impact of learning outcomes-oriented pedagogical approaches on diverse student outcomes. A second-

order meta-analysis investigating the impact of problem-based learning—a pedagogical approach intrinsically aligned with learning outcomes-oriented principles—concluded that such approaches exert a significant and substantial effect on student outcomes. This finding, derived from the synthesis of multiple primary studies, provides robust quantitative evidence that student-centered, outcomes-driven pedagogies are not merely philosophically appealing but are demonstrably effective in enhancing student learning. Similarly, a meta-analysis of simulation-based learning in higher education revealed large positive overall effects on the advancement of complex skills across diverse domains, with reflection phases proving particularly beneficial for postgraduate learners. These effect sizes, which range from moderate to large in conventional interpretations of educational interventions, suggest that the deliberate design of learning experiences oriented toward specific outcomes yields meaningful improvements in student achievement that are both statistically and practically significant.

The effectiveness of active learning approaches, which are central to learning outcomes-oriented pedagogy, has been further substantiated by a meta-analysis of papers examining the effect of active learning versus traditional lecturing on the achievement of college students in humanities and social sciences. While this review excluded a substantial proportion of studies that did not meet inclusion criteria, the cumulative evidence from the retained studies supports the superiority of active, student-centered approaches over passive, lecture-based instruction for fostering deep learning and the development of higher-order cognitive skills. These findings are consistent with the theoretical underpinnings of constructive alignment, which posits that learning is most effective when students are actively engaged in constructing their own understanding through appropriately challenging activities that are explicitly designed to achieve specified outcomes.

The relationship between learning engagement and learning outcomes has been the subject of considerable empirical investigation, with a meta-analysis examining this relationship in online learning contexts finding significant positive associations. A study investigating the associations between blended learning effectiveness, student engagement, student learning outcomes, and student academic motivation in higher education found a positive association between the effectiveness of blended learning and student learning outcomes. This finding is particularly noteworthy as it suggests that the learning outcomes framework, when operationalized through thoughtfully designed blended learning environments, can effectively harness the affordances of technology to enhance student achievement. The flipped classroom model, another pedagogical innovation grounded in outcomes-oriented principles, has been shown to positively impact academic achievement, engagement, and motivation. Collectively, these empirical findings provide a robust evidence base for the proposition that learning outcomes-oriented teaching, when implemented with pedagogical integrity, yields superior student outcomes across a range of disciplinary contexts and instructional modalities.

Constructive Alignment as a Cornerstone of Effective Practice

The principle of constructive alignment, emerges from the empirical literature as a critical determinant of the success of learning outcomes-oriented teaching. Constructive alignment posits that there must be coherence between the intended learning outcomes, the teaching and learning activities designed to achieve those outcomes, and the assessment tasks used to evaluate student achievement-When these three elements are mutually reinforcing and internally consistent, students are provided with clear expectations, purposeful learning experiences, and assessment opportunities that genuinely reflect the knowledge, skills, and competencies they are expected to demonstrate.

Empirical studies have provided evidence of the efficacy of constructive alignment in enhancing student outcomes. A curriculum intervention guided by constructive alignment theory, in which a final-year undergraduate course was redesigned to better develop learning and graduate employability, demonstrated that applying the framework significantly improves students' academic performance, persistence, and affective engagement. Another study reported on an application of constructive alignment principles and found evidence of improvement in student satisfaction and academic grades as a result of implementation. These findings suggest that constructive alignment is not merely a theoretical abstraction but a practical framework that, when applied systematically, yields tangible improvements in the quality of student learning and the student experience.

The importance of alignment has been further underscored by research examining the relationship between course learning outcomes and assessments. A study analyzing alignment within linguistic programs at a university in Vietnam found that a lack of precision in verb usage within learning outcomes can introduce ambiguity, potentially hindering the effectiveness of both teaching and assessment. This finding highlights the critical importance of clear, precise, and measurable articulation of learning outcomes, as ambiguity at the specification stage propagates through the entire educational process, compromising alignment and undermining the validity of subsequent assessment inferences. The use of established taxonomies, such as the revised Bloom's Taxonomy, is therefore not merely a technical exercise but a fundamental requirement for ensuring that learning outcomes are cognitively appropriate, pedagogically meaningful, and assessable.

Research has also revealed qualitative variation in how university teachers conceptualize and implement constructive alignment. Teachers who describe their approaches to teaching as involving conceptual change intentions with student-focused strategies tend to see intended learning outcomes in more holistic terms and view assessment as an integral part of the teaching approach. In contrast, teachers with more transmission-oriented conceptions of teaching are more likely to treat learning outcomes and assessment as external requirements rather than as integral components of a coherent pedagogical design. This finding has significant implications for faculty development, suggesting that efforts to promote constructive alignment must address not only the technical skills of outcome articulation and assessment design but also the deeper epistemological and pedagogical beliefs that shape teachers' approaches to their work.

Assessment of Learning Outcomes: Challenges and Innovations

The assessment of learning outcomes represents perhaps the most complex and contested dimension of the learning outcomes-oriented methodology, with empirical research revealing persistent challenges in designing assessments that are valid, reliable, fair, and capable of capturing the full spectrum of intended learning outcomes. Despite the growing interest in measuring learning outcomes as evidence of comprehensive education in higher education institutions, objectively assessing these outcomes remains a significant challenge. Practitioners face considerable difficulties in assessing learning outcomes objectively, with existing assessment measures often exhibiting questionable reliability and validity, undermining their effectiveness for both improvement and accountability purposes.

The challenges of assessment are compounded by the diverse purposes that assessment serves within higher education. Assessment is simultaneously expected to provide formative feedback to support student learning, summative evidence to certify achievement, data for program evaluation and continuous improvement, and evidence for external accountability and accreditation. These multiple purposes are not always mutually reinforcing and may, in fact, create tensions that complicate assessment design and implementation. A study identifying

different profiles of higher education teachers based on their approach to assessment design found that teachers varied in whether they prioritized the feasibility of assessment tasks, alignment with learning outcomes, or alignment with teaching methods. This variation suggests that assessment design is not a purely technical exercise but is shaped by teachers' professional judgments, contextual constraints, and personal values.

The move toward authentic assessment, which requires students to apply their knowledge and skills in contexts that mirror real-world professional practice, has been a significant trend in learning outcomes-oriented education. A systematic literature review on faculty assessment development found that most programs prioritize formative, student-centered approaches, with particular attention to authentic assessment and feedback literacy. Authentic assessments are valued for their capacity to measure higher-order thinking and complex competencies that traditional examinations may fail to capture. However, the development and implementation of authentic assessments present their own challenges, including issues of standardization, reliability, and the substantial time and expertise required for design and scoring.

The validity of assessment inferences has emerged as a central concern in the scholarly discourse. Validity asks whether a measure actually captures the learning outcome it claims to assess. This question is particularly acute in the context of program-level learning outcomes, where assessments must provide evidence of student achievement across multiple courses, instructors, and learning experiences. A study proposing a cognitive complexity-adjusted weighting framework for course learning outcomes aims to improve the validity of direct assessment by accounting for the cognitive demands of different learning outcomes. Such frameworks represent an important step toward more nuanced and defensible approaches to assessment, acknowledging that not all learning outcomes are equivalent in their cognitive demands and that assessment designs must be calibrated accordingly.

Faculty Development and Institutional Capacity

The successful implementation of learning outcomes-oriented teaching is fundamentally dependent upon the knowledge, skills, and dispositions of faculty members, yet empirical research consistently reveals significant gaps in faculty readiness and institutional support. A qualitative study investigating the challenges faced by university lecturers in implementing outcome-based assessments in Vietnamese higher education identified nine major challenges, including pedagogical hurdles, lack of training and resources, institutional constraints, and technological limitations. These findings are echoed in research from other national contexts, suggesting that the challenges of implementation are not culturally or institutionally idiosyncratic but reflect systemic issues in the professional preparation and ongoing support of university teachers.

A study assessing the impact of continuous professional development on faculty competence in delivering outcome-based education in Rajasthan's higher education institutions found that while professional development had positive effects, significant obstacles remained, including inadequate follow-up training, a lack of institutional support, and a lack of knowledge of OBE concepts among certain faculty members. Similarly, a study examining the knowledge, attitudes, and practices of faculty members toward the implementation of an outcome-based education curriculum found considerable knowledge gaps among university faculty compared to experts, with faculty members expressing dissatisfaction with OBE for various reasons and facing challenges related to extensive workload, curriculum design, and inadequate awareness among learners.

These findings underscore the inadequacy of one-off workshops or superficial training initiatives and point to the need for sustained, comprehensive, and context-sensitive faculty

development programs. A systematic literature review exploring faculty assessment development found that despite contextual differences, reviewed studies converge on the importance of aligning assessment with learning, fostering inclusive practices, and embedding faculty development within authentic academic settings. This suggests that effective faculty development must be integrated into the everyday work of teaching and curriculum design rather than treated as an add-on or remedial activity. The CRAFT framework, emerging from a systematic literature review on faculty assessment development, provides a structured approach to building faculty capacity in assessment design and implementation.

The challenges of faculty development are compounded by the competing demands placed upon academic staff, who are increasingly expected to excel in research, teaching, service, and administration. A study identifying five major difficulties in the deployment of OBE found that these included limited professional development opportunities, insufficient resources, and a lack of institutional support, with teachers reporting feeling unprepared to design and evaluate OBE curricula and citing the need for more comprehensive training and clearer guidelines. These findings highlight the importance of institutional commitment, not only in rhetoric but in the allocation of resources, time, and recognition for teaching-related professional development. Without such commitment, the implementation of learning outcomes-oriented teaching risks becoming a superficial compliance exercise rather than a genuine transformation of educational practice.

Continuous Improvement and Quality Assurance

The learning outcomes-oriented methodology is predicated upon a cycle of continuous improvement, wherein assessment data are systematically collected, analyzed, and used to inform curriculum revision, pedagogical refinement, and institutional quality enhancement. A mature outcomes-based system operationalizes continuous improvement cycles: setting standards, collecting evidence, evaluating performance, and implementing changes. This cyclical process, often conceptualized in terms of the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle, provides a structured framework for evidence-informed decision-making and institutional learning.

A study introducing a structured framework for measuring the attainment of program learning outcomes using anchor assessments and performance indicators found that the framework was designed to support curriculum improvement and accreditation compliance. The EVALLOS platform, a comprehensive system for assessing the achievement of program learning outcomes, focuses on the design and operationalization of accreditation-oriented indicators that support evidence-based quality assurance and continuous improvement in alignment with international frameworks such as ABET. These developments reflect the growing integration of learning outcomes assessment with institutional quality assurance systems, positioning assessment not merely as a pedagogical tool but as a mechanism for institutional accountability and strategic improvement.

Learning analytics and curriculum-mapping dashboards have emerged as powerful tools for supporting continuous improvement, enabling programs to identify patterns, strengths, and areas of underperformance. The use of such tools allows for the aggregation and visualization of assessment data at multiple levels of analysis, facilitating the identification of trends and the targeting of interventions. However, the effective use of learning analytics requires not only technical infrastructure but also the interpretive capacity and collaborative processes necessary to transform data into actionable insights. A study exploring the use of curriculum analytics for curriculum decision-making found that the exploration phase revealed key insights that could

inform curriculum revision, suggesting that analytics can provide valuable evidence for program improvement when integrated into structured review processes.

The relationship between outcome-based education and quality assurance is complementary, with clearly defined learning outcomes and aligned teaching, learning, and assessment enabling institutions to better ensure meaningful educational quality. However, the integration of learning outcomes assessment with quality assurance also carries risks, including the potential for assessment to become primarily a compliance mechanism rather than a tool for pedagogical improvement. When assessment is driven primarily by external accountability requirements, there is a danger that it becomes performative, generating data that satisfy accreditors but do little to inform meaningful educational improvement. The challenge for institutions is to maintain a focus on the formative, improvement-oriented purposes of assessment while simultaneously meeting the legitimate demands for accountability and transparency.

The Impact of Disruption: COVID-19 and the Acceleration of Change

The COVID-19 pandemic constituted an unprecedented disruption to higher education, necessitating a rapid and wholesale transition to remote and online learning modalities. This disruption has had profound implications for learning outcomes-oriented teaching, exposing both the resilience and the vulnerabilities of existing educational practices and accelerating trends toward digital transformation. A study examining the efficacy of virtual teaching compared to face-to-face instruction over ten semesters found that while students indicated improved learning experiences in virtual teaching due to its flexibility and perceived effectiveness, their academic performance actually declined compared to face-to-face instruction. This finding highlights the challenge of maintaining learning outcomes in the absence of the rich interpersonal interactions and immediate feedback that characterize effective in-person teaching.

The pandemic also highlighted the importance of flexibility and inclusion in assessment design. Guidelines developed to address the challenges of online assessment were underpinned by the principles of validity, reliability, flexibility, and inclusion, articulated through standards that comprehensively address institutional policies. The implementation of such methodologies offers higher education institutions the opportunity to enhance distance assessments while bearing in mind the principles of quality and fairness. The pandemic thus served as a catalyst for rethinking assessment practices, accelerating the adoption of innovative approaches that had previously been resisted or adopted.

The longer-term implications of the pandemic for learning outcomes-oriented teaching remain uncertain, but it is clear that the experience has permanently altered the landscape of higher education. The pivot to online teaching necessitated a fundamental reconsideration of how learning outcomes are achieved and assessed in digital environments, prompting reflection on the nature of the educational experience and the essential elements of effective teaching and learning. As institutions navigate the post-pandemic era, the lessons learned from this period of disruption will likely inform ongoing efforts to enhance the quality and effectiveness of learning outcomes-oriented teaching, with a greater emphasis on flexibility, digital literacy, and the thoughtful integration of technology into pedagogical design.

Critiques, Limitations, and Future Directions

The scholarly discourse on learning outcomes-oriented teaching is not without its critics, and a balanced discussion must acknowledge the legitimate concerns that have been raised regarding the epistemological, philosophical, and practical limitations of this paradigm. Critics have argued that an excessive focus on measurable learning outcomes may inadvertently marginalize

the broader, more elusive aims of higher education, such as the cultivation of wisdom, ethical reasoning, aesthetic sensibility, and a lifelong love of learning. These are attributes that resist easy quantification and may be distorted when forced into a prescriptive outcomes framework. The concern is that what is measurable becomes prioritized over what is valuable, leading to a reductionist conception of education that fails to honor the full range of human development that higher education should foster.

The potential for learning outcomes to become instruments of surveillance and control has also been raised, with critics pointing to the ways in which outcomes-based education can be co-opted by managerialist discourses that prioritize efficiency, productivity, and employability over critical thinking, creativity, and civic engagement. When learning outcomes are used primarily as mechanisms for accountability and quality assurance, there is a danger that they become performative, driving superficial compliance rather than genuine educational improvement. The challenge, as the discourse has increasingly recognized, is to maintain a focus on the formative, developmental purposes of learning outcomes while simultaneously meeting legitimate demands for transparency and accountability.

Empirical research has also revealed significant limitations in the implementation of learning outcomes-oriented teaching, with studies consistently documenting challenges related to faculty development, institutional support, assessment design, and cultural resistance. A systematic literature review of challenges in integrating OBE in higher education institutions identified seven interrelated groups of challenges: assessment tools and techniques, lecturers' assessment competence, managerial mechanisms, and supporting resources. These challenges are not merely technical but reflect deeper issues of organizational culture, professional identity, and the political economy of higher education. Another systematic review found that significant challenges remain, such as faculty resistance, limitations in professional training, and a lack of long-term evaluation. The limited published work on OBE also hinders its implementation at all levels of university programs.

The growing emphasis on interdisciplinary learning and the development of holistic competencies represents another important direction for the learning outcomes discourse. A systematic review synthesizing empirical evidence on learning outcomes of interdisciplinary learning identified three key outcome categories: academic and disciplinary engagement, metacognitive skills, and perspective-taking skills. These outcomes, which transcend traditional disciplinary boundaries, pose challenges for conventional assessment approaches and require the development of new methods capable of capturing complex, integrative learning. Similarly, the focus on holistic competencies, which encompass various skills beyond disciplinary knowledge, requires a broadening of the learning outcomes framework to include affective, social, and ethical dimensions of development.

The integration of learning outcomes-oriented teaching with competency-based education and micro-credentialing represents another significant development. As higher education institutions respond to demands for greater flexibility, personalization, and alignment with labor market needs, learning outcomes frameworks provide a foundation for the recognition and certification of competencies acquired through diverse learning pathways. The challenge is to ensure that this expansion of the learning outcomes framework does not lead to fragmentation or the atomization of education but rather supports coherent, integrated learning experiences that prepare students for meaningful participation in society.

Synthesis and analysis

The results synthesized from the empirical and theoretical literature on learning outcomes-oriented teaching in higher education reveal a paradigm that is simultaneously powerful and

problematic, transformative and contested. The evidence for the effectiveness of learning outcomes-oriented approaches, when implemented with fidelity to the principles of constructive alignment, is substantial and growing. Meta-analyses and systematic reviews consistently demonstrate positive effects on student achievement, engagement, and satisfaction, particularly when pedagogical approaches are student-centered, active, and aligned with clearly articulated outcomes. The principle of constructive alignment emerges as a critical determinant of success, providing a framework for ensuring coherence between intended outcomes, teaching activities, and assessment tasks.

However, the realization of these benefits is contingent upon a constellation of enabling factors that are often absent in practice. Faculty development emerges as a critical imperative, with studies consistently documenting knowledge gaps, skill deficits, and resistance among academic staff. Institutional commitment, in the form of resources, time, recognition, and supportive culture, is equally essential. The challenges of assessment design and implementation are substantial, requiring expertise in psychometrics, validity theory, and the design of authentic, performance-based assessments that capture complex learning outcomes. The integration of learning outcomes assessment with quality assurance systems offers opportunities for continuous improvement but also carries risks of performativity and compliance-driven behavior.

The COVID-19 pandemic has accelerated trends toward digital transformation and pedagogical innovation, revealing both the resilience and the vulnerabilities of existing educational practices. The experience of emergency remote teaching has prompted reflection on the essential elements of effective teaching and learning and has catalyzed the adoption of flexible, inclusive approaches to assessment and instruction. The ongoing evolution of the learning outcomes discourse will be shaped by emerging challenges and opportunities, including the integration of generative AI, the emphasis on interdisciplinary and holistic competencies, and the expansion of competency-based education and micro-credentialing.

The learning outcomes-oriented methodology represents a mature and evolving field of educational inquiry, one that integrates theoretical sophistication with pragmatic applicability. Its power lies not in prescription but in its capacity to provide a coherent, evidence-informed framework for systematic reflection, intentional design, and continuous improvement. The challenge for higher education institutions is to implement this methodology with integrity, honoring its potential to enhance student learning while remaining attentive to its limitations and responsive to the critiques that temper its promise. The future of the discourse will depend upon the continued commitment of scholars, practitioners, and institutional leaders to rigorous inquiry, collaborative dialogue, and a steadfast focus on the ultimate purpose of higher education: the cultivation of human potential, the advancement of knowledge, and the betterment of society.

The empirical literature also reveals persistent and significant challenges that attend the implementation of learning outcomes-oriented teaching, challenges that are not merely technical but reflect deeper issues of institutional culture, faculty identity, and the political economy of higher education. The assessment of learning outcomes, while central to the methodology, remains a site of considerable difficulty, with practitioners facing substantial obstacles in designing assessments that are valid, reliable, fair, and capable of capturing the full spectrum of intended learning outcomes. The development of authentic, performance-based assessments that measure higher-order thinking and complex competencies requires significant expertise and resources, and the validity of assessment inferences remains a persistent concern, particularly at the program level where assessments must provide evidence of student achievement across multiple courses, instructors, and learning experiences. The challenges of

assessment are compounded by the multiple and sometimes conflicting purposes that assessment serves, including formative feedback, summative certification, program evaluation, and external accountability, creating tensions that complicate assessment design and implementation.

The imperative of faculty development emerges from the literature as perhaps the most critical enabling factor for successful implementation. Studies consistently document significant knowledge gaps, skill deficits, and resistance among academic staff, pointing to the inadequacy of one-off workshops and superficial training initiatives. Effective faculty development must be sustained, comprehensive, and context-sensitive, addressing not only the technical skills of outcome articulation, alignment, and assessment but also the deeper epistemological and pedagogical beliefs that shape teachers' approaches to their work. The cultivation of assessment literacy among faculty is particularly critical, representing an area where many academics, despite their disciplinary expertise, have received limited formal preparation. The challenges of faculty development are compounded by the competing demands placed upon academic staff, who are increasingly expected to excel in research, teaching, service, and administration, highlighting the importance of institutional commitment in the allocation of resources, time, and recognition for teaching-related professional development.

The institutional context within which learning outcomes-oriented teaching is implemented exerts a profound influence on its success, with the literature revealing that organizational culture, governance structures, and institutional priorities significantly shape the adoption and fidelity of outcomes-based approaches. The transition to a learning outcomes-oriented paradigm requires a fundamental cultural shift, moving from a content-centered, transmission-oriented model of education to a student-centered, facilitative, and reflective practice. This cultural transformation necessitates sustained leadership commitment, the realignment of institutional reward structures, the development of supportive infrastructure, and the cultivation of a culture of evidence and continuous improvement. Institutions that have successfully embedded learning outcomes-oriented teaching have typically invested in dedicated teaching and learning centers, educational development units, and faculty fellowships that provide ongoing, context-sensitive support for pedagogical innovation. The integration of learning outcomes assessment with institutional quality assurance systems offers opportunities for continuous improvement but also carries risks of performativity and compliance-driven behavior, requiring institutions to maintain a focus on the formative, improvement-oriented purposes of assessment while simultaneously meeting legitimate demands for accountability and transparency.

The COVID-19 pandemic constituted an unprecedented disruption to higher education, catalyzing a rapid and wholesale transition to remote and online learning modalities that exposed both the resilience and the vulnerabilities of existing educational practices. The experience of emergency remote teaching revealed significant challenges in maintaining learning outcomes in the absence of rich interpersonal interactions and immediate feedback, yet also demonstrated the potential for thoughtful pedagogical design and digital innovation to achieve specified learning outcomes in online environments. The pandemic accelerated trends toward digital transformation, flexible assessment, and student-centered pedagogy, prompting reflection on the essential elements of effective teaching and learning and the assumptions that underpin traditional educational practices. As institutions navigate the post-pandemic era, the lessons learned from this period of disruption will likely inform ongoing efforts to enhance the quality and effectiveness of learning outcomes-oriented teaching, with a greater emphasis on flexibility, digital literacy, and the thoughtful integration of technology into pedagogical design.

The critical engagement with the learning outcomes paradigm, while acknowledging its substantial contributions, also illuminates important limitations and concerns that temper the optimism surrounding this educational reform movement. Critics have raised legitimate concerns regarding the potential reductionism of learning outcomes, arguing that an excessive focus on measurable competencies may inadvertently marginalize the broader, more elusive aims of higher education, such as the cultivation of wisdom, ethical reasoning, aesthetic sensibility, and a lifelong love of learning. The concern that what is measurable becomes prioritized over what is valuable points to the need for a more nuanced and sophisticated conceptualization of learning outcomes that acknowledges the intrinsic value of emergent, unanticipated, and transformative learning experiences. The potential for learning outcomes to become instruments of surveillance and control, co-opted by managerialist discourses that prioritize efficiency, productivity, and employability over critical thinking, creativity, and civic engagement, represents another significant concern that requires ongoing critical reflection and vigilance.

The future trajectory of the learning outcomes discourse will be shaped by several emerging trends and challenges that are already beginning to transform the landscape of higher education. The rapid advancement of generative artificial intelligence presents both opportunities and challenges, with the potential to enhance student learning when thoughtfully integrated into educational practice, yet simultaneously raising profound questions about academic integrity, the nature of authentic assessment, and the skills that students need to develop in an AI-augmented world. The growing emphasis on interdisciplinary learning and the development of holistic competencies that transcend traditional disciplinary boundaries requires the articulation of learning outcomes that encompass cognitive, affective, social, and ethical dimensions of development, alongside the development of assessment methods capable of capturing complex, integrative learning. The expansion of competency-based education and micro-credentialing, driven by demands for greater flexibility, personalization, and alignment with labor market needs, requires the learning outcomes framework to accommodate diverse learning pathways and the recognition of competencies acquired through formal, non-formal, and informal learning experiences.

In synthesizing the extensive body of knowledge that constitutes the scientific discourse on learning outcomes-oriented teaching, several overarching conclusions emerge that have significant implications for policy, practice, and future research. First, the learning outcomes paradigm, while not a panacea for all the challenges confronting higher education, provides a powerful and coherent framework for enhancing educational quality through intentional design, systematic alignment, and evidence-informed improvement. The principle of constructive alignment, grounded in established theories of learning and validated through extensive empirical investigation, offers a robust foundation for curriculum design and pedagogical practice that is applicable across diverse disciplinary, institutional, and cultural contexts. Second, the successful implementation of learning outcomes-oriented teaching requires a sustained and systemic commitment that extends beyond individual faculty efforts to encompass institutional culture, governance structures, resource allocation, and professional development systems. The challenges of implementation are not merely technical but reflect deeper issues of organizational change, professional identity, and the political economy of higher education, requiring comprehensive and context-sensitive strategies for change management.

The assessment of learning outcomes represents a critical site of both challenge and opportunity, requiring ongoing investment in faculty development, assessment literacy, and the development of innovative assessment methods that are capable of capturing complex, higher-

order learning. The validity, reliability, and fairness of assessment inferences must be rigorously attended to, with a continued focus on authentic, performance-based assessments that require students to integrate and apply their knowledge in real-world contexts. Fourth, the learning outcomes discourse must remain open to critical engagement and ongoing refinement, acknowledging the legitimate concerns regarding reductionism, performativity, and the potential marginalization of the broader purposes of higher education. The integration of holistic competencies, ethical reasoning, and civic engagement within the learning outcomes framework represents an important direction for the evolution of the paradigm, ensuring that it remains responsive to the full range of human development that higher education should foster. The future of the learning outcomes discourse will be shaped by the continuing evolution of higher education itself, including the ongoing digital transformation, the imperatives of sustainability and social justice, the changing nature of knowledge production and dissemination, and the persistent challenges of equity, access, and student success. The integration of generative artificial intelligence, the emphasis on interdisciplinary and holistic competencies, and the expansion of competency-based education and micro-credentialing represent emerging challenges and opportunities that will require the learning outcomes framework to adapt and evolve. The discourse must remain attentive to the specific institutional mission, disciplinary traditions, student demographics, and societal expectations that shape each educational context, recognizing that effective implementation requires context-sensitive adaptation rather than the uncritical adoption of generic frameworks.

Institutions could cultivate a culture of evidence and continuous improvement that positions assessment not as a compliance exercise but as a strategic tool for pedagogical inquiry, curriculum innovation, and institutional learning. This cultural transformation requires the development of institutional frameworks that support the systematic collection, analysis, and use of assessment data for improvement purposes, with clearly articulated processes for closing the loop between assessment findings and curricular or pedagogical action. The cyclical process of evidence review and action planning should be structured, systematic, and collaborative, bringing together faculty, program leaders, students, and external stakeholders in a dialogue about the meaning of assessment evidence and the implications for curriculum, pedagogy, and student support. The dissemination of assessment findings within the institution, through reports, presentations, and professional development activities, contributes to the development of a shared commitment to educational excellence and a collective responsibility for student learning. Institutions should also invest in learning analytics and curriculum-mapping technologies that enable the visualization and analysis of assessment data at multiple levels of aggregation, facilitating the identification of patterns, strengths, and areas of underperformance that might otherwise remain invisible.

Institutions could attend carefully to the student experience and the role of student agency within the learning outcomes-oriented paradigm, recognizing that students are not passive recipients of education but active participants in their own learning journeys. Learning outcomes should be communicated transparently and accessibly to students, with clear explanations of the expectations, criteria, and standards against which their achievement will be judged. Students should be engaged in the articulation and refinement of learning outcomes, providing their perspectives on the relevance, clarity, and attainability of stated outcomes and contributing to the co-construction of meaningful educational experiences. The advising system should be aligned with the learning outcomes framework, shifting from a primarily transactional exercise in course scheduling to a developmental partnership focused on student growth and goal achievement. Students should be provided with opportunities for self-assessment, peer assessment, and reflective practice that develop their capacity for self-directed

learning and their understanding of the learning outcomes they are expected to achieve. The integration of co-curricular and extra-curricular experiences within the broader framework of student development, with appropriate recognition of learning achieved through internships, service-learning, study abroad, undergraduate research, and other high-impact practices, further enhances the student experience and supports the holistic development of graduate capabilities. Institutions and policymakers could develop flexible and responsive frameworks that accommodate the diverse learning pathways, disciplinary traditions, and contextual particularities that characterize contemporary higher education. The learning outcomes methodology, while providing a coherent and evidence-informed framework for educational design, must be adapted to the specific institutional mission, disciplinary traditions, student demographics, and societal expectations that shape each educational context. This context-sensitive adaptation requires a nuanced understanding of the distinct epistemological traditions, pedagogical approaches, and professional requirements of diverse disciplines, recognizing that the expression of learning outcomes will necessarily vary across the sciences, humanities, social sciences, and professional fields. The framework must also accommodate the growing diversity of the student population, attending to issues of cultural bias in assessment, the recognition of diverse forms of knowledge and ways of knowing, and the creation of learning environments that affirm and build upon students' varied cultural capital. The expansion of competency-based education and micro-credentialing, which offer flexible, personalized learning pathways, should be supported by learning outcomes frameworks that enable the recognition and certification of competencies acquired through formal, non-formal, and informal learning experiences, while ensuring coherence, quality, and academic integrity.

The integration of generative artificial intelligence and other emerging technologies within the learning outcomes-oriented framework requires careful pedagogical design, ethical deliberation, and ongoing evaluation to ensure that technology serves rather than subverts the fundamental purposes of higher education. Institutions must develop policies and guidelines for the appropriate use of AI in teaching, learning, and assessment, articulating learning outcomes that encompass AI literacy, critical evaluation of AI-generated content, and the ethical use of AI tools. The potential of learning analytics and AI to provide real-time monitoring of student progress, early identification of students at risk, and personalized interventions should be harnessed while attending carefully to issues of privacy, algorithmic bias, and the preservation of human relationships and interactions that are central to transformative learning experiences. Faculty development programs should address the integration of technology within the learning outcomes framework, equipping educators with the competencies necessary to design effective blended and online learning experiences, to leverage educational technologies for assessment and feedback, and to critically evaluate the affordances and limitations of emerging technologies.

Institutions could engage in ongoing, collaborative dialogue with external stakeholders, including employers, professional bodies, alumni, and community partners, to ensure that learning outcomes remain relevant, responsive, and aligned with the evolving needs of society and the labor market. This engagement should extend beyond periodic consultation to encompass sustained partnerships that inform the articulation of learning outcomes, the design of authentic assessment tasks, and the provision of experiential learning opportunities that bridge the gap between academic knowledge and professional practice. The inclusion of employer perspectives in the development and review of learning outcomes ensures that graduates possess the knowledge, skills, and competencies required for professional success, while the engagement of community partners supports the development of civic engagement, social responsibility, and the application of learning to address real-world challenges. These

partnerships also contribute to the continuous improvement of programs, providing valuable feedback on graduate preparedness and the relevance of the curriculum.

Researchers and scholars may continue to advance the scientific discourse on learning outcomes-oriented teaching through rigorous empirical investigation, theoretical development, and critical engagement with the philosophical and ethical dimensions of the paradigm. Priority areas for future research include the development and validation of assessment instruments capable of measuring complex, higher-order learning outcomes across diverse disciplinary and cultural contexts; the investigation of the conditions under which learning outcomes-oriented teaching is most effective for diverse student populations; the examination of the impact of generative artificial intelligence on learning outcomes and assessment practices; the exploration of innovative pedagogical approaches that foster interdisciplinary and holistic competencies; and the longitudinal study of the impact of learning outcomes-oriented education on graduate outcomes, including professional success, lifelong learning, and civic engagement. Researchers should also attend to the critical, philosophical dimensions of the discourse, interrogating the assumptions embedded in learning outcomes frameworks, examining the power dynamics that shape their implementation, and exploring alternative conceptualizations of educational quality and student development that honor the full range of purposes that higher education serves.

Institutions, policymakers, and professional bodies could collaborate to develop coherent, aligned, and mutually reinforcing frameworks for the recognition, quality assurance, and continuous improvement of learning outcomes across the higher education sector. This collaboration should encompass the development of national and international qualifications frameworks that articulate learning outcomes at multiple levels and across diverse disciplinary domains, facilitating the comparability and recognition of qualifications across institutional and national boundaries. Quality assurance frameworks should be aligned with learning outcomes principles, with accreditation processes that evaluate not only inputs and processes but also evidence of student achievement and institutional effectiveness. The development of shared standards, guidelines, and best practices for learning outcomes-oriented teaching, developed collaboratively across institutions and professional bodies, supports the diffusion of innovation and the continuous improvement of educational quality across the sector. These collaborative efforts could be grounded in a shared commitment to the core purposes of higher education—the cultivation of knowledgeable, capable, and ethically grounded individuals prepared to contribute meaningfully to the betterment of society and should attend to the principles of equity, inclusion, and social justice that are essential to the fulfillment of this mission.

CONCLUSION

- The scientific discourse on learning outcomes-oriented teaching in higher education institutions and universities represents a mature and multifaceted field of inquiry that has fundamentally reshaped the conceptual and practical landscape of contemporary pedagogy. This comprehensive examination has traversed the historical antecedents, theoretical foundations, empirical evidence, methodological frameworks, and practical challenges that collectively constitute the learning outcomes paradigm, revealing a body of knowledge that is both robust in its empirical support and nuanced in its recognition of complexity and contestation. The journey through this discourse affirms that learning outcomes-oriented teaching, when implemented with pedagogical integrity and institutional commitment, constitutes a powerful engine for the enhancement of higher educational quality, yet simultaneously underscores that the realization of this potential is contingent upon a constellation of enabling factors that are often absent or inadequately developed in practice.

- The foundational premise of this discourse, that educational quality is most effectively enhanced when curriculum design, pedagogical delivery, and student assessment are systematically and explicitly aligned with clearly articulated learning outcomes has been substantially validated by the empirical evidence. Meta-analyses and systematic reviews consistently demonstrate that student-centered, outcomes-driven pedagogical approaches yield significant improvements in student achievement, engagement, and satisfaction across diverse disciplinary contexts and instructional modalities. The principle of constructive alignment, as articulated by Biggs and subsequently refined through extensive empirical investigation, emerges as a critical determinant of success, providing a coherent framework for ensuring that the intended outcomes, teaching activities, and assessment tasks form a mutually reinforcing triad that supports deep, meaningful learning. The evidence suggests that when this alignment is achieved, students are provided with clear expectations, purposeful learning experiences, and assessment opportunities that genuinely reflect the knowledge, skills, and competencies they are expected to demonstrate, thereby enhancing both the transparency and the effectiveness of the educational process.
- The scientific discourse on learning outcomes-oriented teaching in higher education institutions and universities affirms the enduring significance of intentional, evidence-informed, and student-centered educational practice in the pursuit of educational quality and the fulfillment of higher education's profound societal mission. The comprehensive methodology for the development, alignment, and assessment of learning outcomes that has emerged from this discourse represents a mature and evolving field of inquiry, one that integrates theoretical sophistication with pragmatic applicability. Its power lies not in prescription but in its capacity to provide a coherent framework for systematic reflection, intentional design, and continuous improvement, enabling institutions to navigate the complexities of contemporary higher education while maintaining a steadfast focus on the core question of what students are actually learning and how their learning can be enhanced. As the discourse continues to evolve in response to emerging challenges and opportunities, it will remain a vital touchstone for those committed to the cultivation of human potential, the advancement of knowledge, and the betterment of society through the transformative power of higher education.
- The journey through this comprehensive examination reveals that learning outcomes-oriented teaching, for all its challenges and limitations, represents a significant and enduring contribution to the enhancement of higher educational quality. The evidence base supporting its effectiveness is substantial and growing, the theoretical frameworks that underpin it are robust and well-validated, and the practical methodologies for its implementation are increasingly sophisticated and context-sensitive. However, the full realization of its potential requires a sustained commitment from all stakeholders—institutional leaders, faculty members, students, policymakers, and accrediting bodies—to a shared vision of educational excellence that is grounded in evidence, responsive to diverse student needs, and attentive to the broader purposes of higher education in a complex and rapidly changing world. It is through such collective commitment that the promise of learning outcomes-oriented teaching can be fully realized, not as a bureaucratic compliance exercise or a fleeting educational fad, but as a genuine engine for pedagogical renewal and the sustained enhancement of student learning and institutional quality, thereby fulfilling the profound societal mission of higher education in the twenty-first century and beyond.

RECOMMENDATIONS

Based upon the comprehensive synthesis of theoretical frameworks, empirical evidence, and practical challenges elucidated throughout this scientific discourse, the following recommendations are advanced for higher education institutions, policymakers, faculty developers, and researchers seeking to enhance the quality and effectiveness of learning outcomes-oriented teaching. These recommendations are grounded in the recognition that the successful implementation of this pedagogical paradigm requires systemic, sustained, and context-sensitive approaches that address the multifaceted dimensions of institutional culture, faculty capacity, assessment practice, and technological integration:

- Higher education institutions must demonstrate unequivocal and sustained leadership commitment to learning outcomes-oriented teaching, translating rhetorical advocacy into tangible resource allocation, policy reform, and strategic prioritization. This commitment should be manifest in the articulation of a clear institutional vision for outcomes-based education, embedded within the mission statement, strategic plan, and quality assurance frameworks of the institution. Institutional leaders must ensure that adequate financial, human, and technological resources are allocated to support faculty development, curriculum innovation, and assessment infrastructure, recognizing that the enhancement of teaching and learning is not a peripheral activity but a core institutional responsibility. Governance structures, including academic committees, curriculum review bodies, and quality assurance units, should be reformed to incorporate learning outcomes considerations into their deliberative processes and decision-making frameworks, ensuring that outcomes-based thinking becomes embedded within the fabric of institutional functioning rather than remaining dependent upon the efforts of individual champions.
- Institutions must invest substantially in sustained, comprehensive, and context-sensitive faculty development programs that address the full spectrum of competencies required for effective outcomes-based education. These programs should extend beyond one-off workshops on writing learning outcomes or designing rubrics to encompass deep engagement with pedagogical theory, assessment literacy, curriculum design, and the reflective practice that underpins pedagogical innovation. Faculty development initiatives should be designed to address not only the technical skills of outcome articulation, alignment, and assessment but also the deeper epistemological and pedagogical beliefs that shape teachers' approaches to their work, recognizing that meaningful pedagogical transformation requires a shift in professional identity and educational philosophy. The cultivation of assessment literacy should be prioritized as a critical component of faculty development, equipping academics with the conceptual frameworks and practical skills necessary to design valid, reliable, and fair assessments, to develop clear and appropriate criteria and standards, to provide effective feedback that supports student learning, and to use assessment data to inform teaching practice and curricular refinement. Institutions should establish dedicated teaching and learning centers, educational development units, and faculty fellowship programs that provide ongoing, context-sensitive support for pedagogical innovation, recognizing that faculty development is a continuous, career-long endeavor rather than a discrete intervention.
- The design and implementation of assessment systems must be accorded the same rigor and scholarly attention that is devoted to disciplinary research, with institutions investing in the expertise, infrastructure, and collaborative processes necessary to develop assessments that are valid, reliable, fair, and capable of capturing the full spectrum of intended learning outcomes. The development of authentic, performance-based assessments that measure higher-order thinking and complex competencies requires significant expertise and resources, and institutions should support faculty in this endeavor through the provision of assessment design

specialists, technological infrastructure, and collaborative review processes. Assessment systems should incorporate a balanced approach to formative and summative assessment, recognizing that formative assessment provides ongoing, actionable feedback that supports student learning, while summative assessment certifies achievement and informs quality assurance processes. The validity of assessment inferences must be rigorously attended to, with institutions implementing systematic processes for the review and validation of assessment instruments, the calibration of scoring, and the analysis of assessment data for patterns of bias or differential impact across student populations. Assessment data should be systematically aggregated and analyzed at multiple levels—course, program, and institutional—to identify trends, patterns, and areas requiring intervention, with the findings of these analyses disseminated through structured review processes that engage faculty, program leaders, students, and external stakeholders in collaborative dialogue about the meaning and implications of assessment evidence.

➢ The recommendations advanced herein reflect the accumulated wisdom of decades of scholarly inquiry, empirical investigation, and practical experience in the field of learning outcomes-oriented teaching in higher education. The successful implementation of these recommendations requires sustained commitment, collaborative effort, and a shared vision of educational excellence that is grounded in evidence, responsive to diverse student needs, and attentive to the broader purposes of higher education in a complex and rapidly changing world. It is through such collective commitment that the promise of learning outcomes-oriented teaching can be fully realized, transforming higher education into a more intentional, equitable, and effective enterprise that fulfills its profound societal mission of cultivating human potential, advancing knowledge, and contributing to the betterment of society.

REFERENCES:

1. Biggs JB. Aligning teaching for constructing learning. Higher Educ Acad. 2003;1(1):1-9.
2. Biggs J, Tang C. Applying constructive alignment to outcomes-based teaching and learning. In: Kreber C, editor. The university and its disciplines. New York: Routledge; 2009. p. 201-216.
3. Ramsden P. Learning to teach in higher education. 2nd ed. London: RoutledgeFalmer; 2003.
4. Prosser M, Trigwell K. Understanding learning and teaching: The experience in higher education. Buckingham: Open University Press; 1999.
5. Trigwell K, Prosser M. Improving the quality of student learning: The influence of learning context and student approaches to learning. Higher Educ. 1991;22(3):251-266.
6. Entwistle N. Teaching for understanding at university. London: Routledge; 2009.
7. Fry H, Ketteridge S, Marshall S, editors. A handbook for teaching and learning in higher education. 4th ed. New York: Routledge; 2015.
8. Race P. The lecturer's toolkit. 4th ed. London: Routledge; 2015.
9. Moon JA. Handbook of reflective and experiential learning. London: RoutledgeFalmer; 2004.
10. Biggs J. Teaching for quality learning at university. Buckingham: Society for Research into Higher Education and Open University Press; 1999.
11. Anderson LW, Krathwohl DR, editors. A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. New York: Longman; 2001.

12. Bloom BS, Engelhart MD, Furst EJ, Hill WH, Krathwohl DR, editors. Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain. New York: David McKay; 1956.
13. Krathwohl DR. A revision of Bloom's taxonomy: An overview. Theory Pract. 2002;41(4):212-218.
14. Anderson LW. Objectives, evaluation, and the improvement of education. Studies Educ Eval. 2005;31(1):1-14.
15. Marzano RJ, Kendall JS. The new taxonomy of educational objectives. 2nd ed. Thousand Oaks: Corwin Press; 2007.
16. Fink LD. Creating significant learning experiences: An integrated approach to designing college courses. 2nd ed. San Francisco: Jossey-Bass; 2013.
17. Wiggins G, McTighe J. Understanding by design. 2nd ed. Alexandria: Association for Supervision and Curriculum Development; 2005.
18. Wiggins G. Educative assessment: Designing assessments to inform and improve student performance. San Francisco: Jossey-Bass; 1998.
19. Tyler RW. Basic principles of curriculum and instruction. Chicago: University of Chicago Press; 1949.
20. Taba H. Curriculum development: Theory and practice. New York: Harcourt, Brace & World; 1962.
21. Harden RM. Learning outcomes and instructional objectives: Is there a difference? Med Teach. 2002;24(2):151-155.
22. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N. The scientifically study of the characteristics of pharmacists' profession regulation development issues towards on pharmaceutical sciences division in Georgia. In: Scientific and Practical International Distance Conference "Microbiological and Immunological Research in Modern Medicine". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 153-155.
23. Sulashvili N, Beglaryan M, Lobjanidze T. The scientific discussion of the features of pharmaceutical sciences and education challenges, prospects and innovations and pharmacy organizational regulation development issues. In: International Scientific and Practical Conference "Medicine and pharmacy at the service of practical cosmetology: from science to practice". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 3-25.
24. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N. Fundamental research about the modern pharmaceutical law and administering, and distinguish the main actual trends of Georgian pharmacists. In: V International Scientific and Practical Conference "Medical drugs for humans. Modern issues of pharmacotherapy and prescription of medicine". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 135-139.
25. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M. The scientific discussion on characteristics of pharmaceutical vocational inquires and challenges in the direction on pharmacists' profession, role, problems, innovations, and perspectives in pharmaceutics and medicine globally. Bulletin of the Medical Institute After Mehrabyan. 2021;10:26-55.
26. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Tadevosyan A, Chichoyan N, Gabunia L, et al. The scientific assumption of distinctive specifics of pharmacists higher educational perspectives from the view point of clinical outlooks in Georgia. Bulletin of the Medical Institute After Mehrabyan. 2022;12:45-66.
27. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M. The scientific debate of standard challenges of pharmacists vocational, epidemiological and sanitarian health problems in offices and labs within COVID 19 pandemic in Georgia. In: Scientific-Practical Conference "We Open

the New Century: Achievements and Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 448-453.
28. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Chichoyan N, Gabunia L, Okropiridze T. The scientific talks of the features of the clinical pharmacists perspectives along public health sector in Georgia. In: Scientific-Practical Conference "We Open the New Century: Achievements and Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 460-466.
29. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Chichoyan N, Gabunia L, Alavidze N, et al. The scientific discussion of inclination, achievements, tenacities, innovations, aspiration and perspectives of pharmacists' profession in Georgia and globally. Bulletin of the Medical College After Mehrabyan. 2022;13:31-54.
30. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Lobjanidze T, Chichoyan N, Gabunia L, et al. Scientific talks of the features of the pharmacist' profession, essential role, achievements, problems, aspects and higher pharmaceutical educational advancement issue perspectives in the context of patients safety locally and globally in XXI century. Bulletin of the Medical Institute After Mehrabyan. 2021;11:37-68.
31. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M. The scientific argument of the main characteristics and achievements of pharmaceutical vocational arrangement introduction issues of pharmaceutics in Georgia. In: Scientific-Practical Conference "We Open the New Century: Achievements and Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 339-343.
32. Biggs J. Enhancing teaching through constructive alignment. Higher Educ. 1996;32(3):347-364.
33. Biggs J, Tang C. Teaching for quality learning at university. 4th ed. Maidenhead: Open University Press; 2011.
34. Harden RM. Developments in outcome-based education. Med Teach. 2002;24(2):117-120.
35. Harden RM. Outcome-based education: The future is today. Med Teach. 2007;29(7):625-629.
36. Harden RM, Crosby JR, Davis MH. AMEE Guide No. 14: Outcome-based education: Part 1—An introduction to outcome-based education. Med Teach. 1999;21(1):7-14.
37. Harden RM, Crosby JR, Davis MH, Friedman M. AMEE Guide No. 14: Outcome-based education: Part 5—From competency to meta-competency: A model for the specification of learning outcomes. Med Teach. 1999;21(6):546-552.
38. Kennedy D, Hyland Á, Ryan N. Writing and using learning outcomes: A practical guide. Cork: University College Cork; 2006.
39. Adam S. An introduction to learning outcomes: A consideration of the nature, function and position of learning outcomes in the creation of the European Higher Education Area. Bologna: European Commission; 2004.
40. Adam S. Using learning outcomes. Edinburgh: Scottish Qualifications Authority; 2004.
41. Gosling D, Moon J. How to use learning outcomes and assessment criteria. London: Quality Assurance Agency; 2001.
42. Moon J. Linking levels, learning outcomes and assessment criteria. Edinburgh: University of Edinburgh; 2002.
43. Moon J. Reflection in learning and professional development. London: Kogan Page; 1999.
44. European Commission. The European Qualifications Framework for lifelong learning. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 2008.

45. European Parliament, Council of the European Union. Recommendation on the European Qualifications Framework for lifelong learning. Off J Eur Union. 2008;C111:1-7.
46. European Commission. A European credit system for vocational education and training: ECVET. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2009.
47. European Commission. ECTS users' guide 2015. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2015.
48. Sulashvili N, Beglaryan M. Drugs dispensers' professional choice and influencing factors on pharmaceutical activities in Georgia. Experimental and Clinical Medicine. 2018;(6):17-21.
49. Sulashvili N, Beglaryan M. Drugs dispensers' job adaptation process and pharmaceutical activities viewed by the chief pharmacists. Tbilisi Open University Scientific Journal. 2018;(9):196-205.
50. Sulashvili N, Beglaryan M. Some specification in career and work contents of pharmacists. Caucasus Journal of Health Sciences and Public Health. 2019;3(4):6-9.
51. Sulashvili N, Beglaryan M. Peculiarities of Professional and Career Improvement Strategy for Pharmacists. Dissertation for the Scientific Degree of PhD in Pharmaceutical Sciences. Yerevan: Yerevan State Medical University; 2019.
52. Sulashvili N, Beglaryan M, Kvizhinadze N, Sulashvili M. Pharmaceutical framework particularities viewed by the customers (consumers) of the drug stores. In: IV International Scientific and Practical Conference "Medical Drugs for Human. Modern Issues of Pharmacotherapy and Prescription of Medicine". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2020. p. 77-79.
53. Sulashvili N, Abuladze N, Kvizhinadze N, Beglaryan M. Pharmacist professionals' labor gratification and pharmaceutic institution challenges viewed by the pharmacist in Georgia. In: 12th Scientific and Practical Internet Conference "Pharmacoeconomics in Ukraine, Condition and Development Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2020. p. 31-39.
54. Sulashvili N, Kvizhinadze N, Gogashvili M, Beglaryan M. Common characteristics and scope of young pharmacist professionals in Georgia. In: 12th Scientific and Practical Internet Conference "Pharmacoeconomics in Ukraine, Condition and Development Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2020. p. 21-30.
55. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N. Legal and regulatory scope, and identify the main challenges and opportunities of Georgian pharmacists. Bulletin of the Medical Institute After Mehrabyan. 2020;9:88-104.
56. Sulashvili N, Beglaryan M, Gerzmava O, Zarnadze I, Zarnadze S, Kvizhinadze N, et al. Modern features and challenges of the pharmacist profession, viewed by the patients and public health specialists via pharmaceutical care direction in public health settings. Bulletin of the Medical Institute After Mehrabyan. 2020;9:105-120.
57. European Commission. ECTS users' guide 2015. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2015.
58. European Commission. ECTS users' guide 2015: Updated edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2015.
59. Bologna Declaration. The European Higher Education Area: Joint declaration of the European Ministers of Education. Bologna: European Higher Education Area; 1999.
60. European Higher Education Area. The Bologna Process and the European Higher Education Area. Brussels: European Commission; 2018.

61. European Higher Education Area. Standards and guidelines for quality assurance in the European Higher Education Area. Brussels: European Association for Quality Assurance in Higher Education; 2015.
62. European Association for Quality Assurance in Higher Education. Standards and guidelines for quality assurance in the European Higher Education Area. 2nd ed. Brussels: ENQA; 2015.
63. European University Association. Trends 2018: Learning and teaching in the European Higher Education Area. Brussels: European University Association; 2018.
64. European University Association. Learning and teaching in the European Higher Education Area. Brussels: European University Association; 2019.
65. OECD. Education at a glance 2023: OECD indicators. Paris: OECD Publishing; 2023.
66. OECD. Education at a glance 2024: OECD indicators. Paris: OECD Publishing; 2024.
67. UNESCO. Rethinking education: Towards a global common good? Paris: UNESCO; 2015.
68. UNESCO. Futures of education: Learning to become. Paris: UNESCO; 2021.
69. UNESCO. Global education monitoring report 2023: Technology in education. Paris: UNESCO; 2023.
70. UNESCO. Guidance for generative AI in education and research. Paris: UNESCO; 2023.
71. Quality Assurance Agency for Higher Education. UK quality code for higher education. Gloucester: QAA; 2018.
72. Quality Assurance Agency for Higher Education. Subject benchmark statements. Gloucester: QAA; 2024.
73. Council of Europe. The reference framework of competences for democratic culture. Strasbourg: Council of Europe; 2018.
74. Tuning Educational Structures in Europe. Tuning educational structures in Europe: Universities' contribution to the Bologna Process. Bilbao: University of Deusto; 2003.
75. González J, Wagenaar R, editors. Tuning educational structures in Europe II: Universities' contribution to the Bologna Process. Bilbao: University of Deusto; 2005.
76. González J, Wagenaar R, editors. Tuning educational structures in Europe III: Universities' contribution to the Bologna Process. Bilbao: University of Deusto; 2007.
77. Harden RM. What is a spiral curriculum? Med Teach. 1999;21(2):141-143.
78. Harden RM. International medical education and future directions: A global perspective. Med Teach. 2006;28(2):123-126.
79. Miller GE. The assessment of clinical skills/competence/performance. Acad Med. 1990;65(9 Suppl).
80. Epstein RM. Assessment in medical education. N Engl J Med. 2007;356(4):387-396.
81. Van der Vleuten CPM. The assessment of professional competence: Developments, research and practical implications. Adv Health Sci Educ. 1996;1(1):41-67.
82. Van der Vleuten CPM, Schuwirth LWT, Scheele F, Driessen EW, Hodges B. The assessment of professional competence: Building blocks for theory development. Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol. 2010;24(6):703-719.
83. Black P, Wiliam D. Assessment and classroom learning. Assess Educ. 1998;5(1):7-74.

84. Black P, Wiliam D. Developing the theory of formative assessment. Educ Assess Eval Account. 2009;21(1):5-31.
85. Sadler DR. Formative assessment and the design of instructional systems. Instr Sci. 1989;18(2):119-144.
86. Nicol DJ, Macfarlane-Dick D. Formative assessment and self-regulated learning: A model and seven principles of good feedback practice. Stud High Educ. 2006;31(2):199-218.
87. Hattie J, Timperley H. The power of feedback. Rev Educ Res. 2007;77(1):81-112.
88. Boud D, Molloy E, editors. Feedback in higher and professional education: Understanding and doing it well. London: Routledge; 2013.
89. Boud D, Falchikov N, editors. Rethinking assessment in higher education: Learning for the longer term. London: Routledge; 2007.
90. Sadler DR. Beyond feedback: Developing student capability in complex appraisal. Assess Eval High Educ. 2010;35(5):535-550.
91. Carless D, Boud D. The development of student feedback literacy: Enabling uptake of feedback. Assess Eval High Educ. 2018;43(8):1315-1325.
92. Zimmerman BJ. Becoming a self-regulated learner: An overview. Theory Pract. 2002;41(2):64-70.
93. Pintrich PR. The role of metacognitive knowledge in learning, teaching, and assessing. Theory Pract. 2002;41(4):219-225.
94. Nicol DJ. From monologue to dialogue: Improving written feedback processes in mass higher education. Assess Eval High Educ. 2010;35(5):501-517.
95. Sulashvili N, Beglaryan M. The Features of Professional Career Improvement Strategy and Job Satisfaction among Pharmacists. Business Engineering Journal. 2014;(2):195-199.
96. Sulashvili N, Beglaryan M. Pharmacist work satisfaction and career enhancement strategy. Georgian Chemical Journal. 2015;15(2):151-157.
97. Sulashvili N, Beglaryan M. Pharmacist professional features in Georgia. Georgian National Academy of Sciences Journal. 2015;81-82.
98. Sulashvili N, Beglaryan M, Grigolia L. Vocational characteristics of employed pharmacy faculty students. Caucasus International University Herald. 2017;(12):89-102.
99. Sulashvili N, Beglaryan M. Characteristics of occupational for employed pharmacy faculty students'. Modern issues of medicine and management. 2017;4(12):39-54.
100. Sulashvili N, Beglaryan M. Vocational peculiarities of young pharmacist professionals. International Scientific Journal Intellectual. 2018;(35):96-104.
101. Sulashvili N, Beglaryan M. Vocational features and facilities of young pharmacist specialists. Experimental and Clinical Medicine. 2018;(1):62-68.
102. Sulashvili N, Beglaryan M, Matoshvili M. Occupational features of pharmaceutical workers, viewed by the chief pharmacists. Caucasus Journal of Health Sciences and Public Health. 2018;2(2):56-61.
103. Sulashvili N, Beglaryan M, Matoshvili M. Vocational specifications for junior pharmacists. Caucasus Journal of Health Sciences and Public Health. 2018;2(2):62-73.
104. Sulashvili N, Beglaryan M. Peculiar professional features viewed by the new generation druggist specialists. Modern issues of medicine and management. 2018;1(13):21-31.
105. Sulashvili N, Beglaryan M, Kvijinadze N, Matoshvili M. Vocational training and activity of Pharmacists in Georgia. Georgian Medical News. 2018;(5):199-206.

106. Sulashvili N, Beglaryan M, Gogashvili M, Matoshvili M. Occupational particularities and strategy of Pharmacy faculty students. Experimental and Clinical Medicine. 2018;(3):15-25.
107. Sulashvili N, Beglaryan M. Personal features, capabilities and skills of job adaptation for pharmacist specialists. Tbilisi David Agmashenebeli University Scientific International Journal. 2018;(13):264-270.
108. Sulashvili N, Beglaryan M. Pharmacists' job specific professional issues and framework activities. Business-Engineering Journal. 2018;(3-4):251-255.
109. Sulashvili N, Beglaryan M. Pharmaceutical care aspects feature in drug-stores viewed by patients. Modern issues of medicine and management. 2018;3(15):5-15.
110. Sulashvili N, Beglaryan M, Shashiashvili G. Medical professionals' job satisfaction and pharmaceutical organization issues viewed by drug dispensers in Georgia. European Scientific Journal. 2018;15(26):42-55.

THE ESSENCE OF UNJUSTIFIED ENRICHMENT AND FORMS OF LEGAL LIABILITY IN EUROPE. LEGAL REGULATION OF ILLICIT ENRICHMENT UNDER THE LEGISLATION OF THE REPUBLIC OF MOLDOVA. COMPETENCES OF LAW ENFORCEMENT BODIES

Banescu-Sufana CORNEL NICOLAE
Drd. in law, University of European Studies of Moldova, Faculty of Law, Department of Law, Republic of Moldova
ORCID: 00090-0005-3203-6061
Vatamanita MARIANA
Drd. in law, "Constantin Stere"University of European Political and Economic Science, Faculty of Law, Department of Law, Republic of Moldova
ORCID: 0009-0004-2949-4750;

Abstract

Unjustified enrichment represents a significant contemporary challenge for criminal law and anti-corruption policies, particularly in the context of increasing concerns regarding the transparency of public officials' assets and the effective protection of public interests. This article examines the legal essence of unjustified enrichment and the forms of legal liability applicable in European legal systems, with particular emphasis on the legal regulation of illicit enrichment in the Republic of Moldova.

The research analyzes the evolution of the criminalization of illicit enrichment, its relationship with international anti-corruption standards, and the main legal mechanisms used to establish liability for the substantial increase of assets that cannot be reasonably justified by lawful income. Particular attention is given to the balance between the public interest in combating corruption and the fundamental guarantees of criminal law, including the presumption of innocence, the burden of proof, the principle of legality, and the protection of property rights. The study also examines the competences of law enforcement and specialized anti-corruption bodies in identifying, investigating, and prosecuting cases of illicit enrichment in the Republic of Moldova. A comparative approach is employed to identify similarities and differences between European regulatory models and the Moldovan legal framework. The analysis demonstrates that the effectiveness of illicit enrichment legislation depends not only on the substantive criminalization of the conduct, but also on clear institutional competences, procedural safeguards, effective financial investigations, and judicial consistency. The article concludes by proposing directions for improving the Moldovan legal framework and strengthening institutional mechanisms for preventing and combating illicit enrichment.

Keywords: illicit enrichment; unjustified enrichment; criminal liability; anti-corruption; public officials.

INTRODUCTION

In legal and academic discourse, the concept of "*illicit enrichment*" is commonly associated with a substantial increase in wealth that appears to be disproportionate, unjustified, unexplained, or inconsistent with the lawful income and financial resources of the person concerned. The concept is particularly relevant in the context of public-sector corruption, where an unexplained accumulation of assets by a public official may constitute an indirect indication of corruption, abuse of office, bribery, embezzlement, or other forms of unlawful conduct. Accordingly, illicit enrichment mechanisms are designed to address situations in which the available evidence may not be sufficient to establish the precise criminal act through which the

assets were acquired, while the discrepancy between legitimate income and accumulated wealth is objectively significant.

The underlying rationale of the criminalization of illicit enrichment is based on the premise that a substantial and unjustified increase in the assets of a public official may represent the visible financial manifestation of hidden corrupt practices. Rather than focusing exclusively on the identification of a specific predicate offence, this legal approach allows the authorities to examine the relationship between the official's lawful income, declared assets, expenditures, and actual level of wealth. In this respect, illicit enrichment has become an important component of modern anti-corruption policies, particularly where complex financial transactions, concealed ownership structures, intermediaries, and sophisticated methods of asset concealment make the direct detection of corruption considerably more difficult.

At the international level, illicit enrichment is addressed by Article 20 of the United Nations Convention against Corruption (UNCAC) (United Nations, 2004). However, unlike certain other provisions of the Convention, Article 20 does not impose an absolute obligation on States Parties to criminalize illicit enrichment. Instead, it establishes a discretionary legislative approach, requiring States, subject to their constitutional principles and the fundamental principles of their legal systems, to consider adopting the necessary legislative and other measures to establish illicit enrichment as a criminal offence when committed intentionally. The provision concerns a substantial increase in the assets of a public official that the official cannot reasonably explain in relation to his or her lawful income.

The formulation of Article 20 is particularly significant because it attempts to reconcile the objective of combating corruption with the fundamental principles governing criminal liability. States are therefore expected to assess whether the criminalization of illicit enrichment is compatible with their constitutional order, principles of legality, presumption of innocence, requirements concerning the burden of proof, and protection of fundamental rights. Consequently, the implementation of Article 20 has not followed a uniform model, and national approaches differ considerably with regard to the definition of the offence, the persons who may be held liable, the threshold of unexplained wealth, evidentiary requirements, and the applicable forms of legal liability.

At the European level, the implementation of Article 20 of UNCAC (United Nations, 2004) has likewise demonstrated considerable diversity. This situation is largely attributable to the discretionary nature of the provision, which allows States to determine, in accordance with their constitutional and legal traditions, whether illicit enrichment should be addressed through criminal law or through other legal mechanisms. European legal systems have consequently developed different approaches to the phenomenon, ranging from the direct criminalization of illicit enrichment to administrative, civil, financial, and asset-recovery mechanisms aimed at identifying and confiscating unexplained or unlawfully acquired wealth.

The comparative analysis of European practice indicates that measures designed to prevent and combat illicit enrichment have gradually developed along several major directions. The first concerns the strengthening of asset declaration and financial disclosure systems, particularly for public officials and persons holding positions involving significant public responsibilities. Such mechanisms enable competent authorities to compare declared assets and income with the actual financial situation of the person concerned and to identify significant discrepancies that may require further investigation.

A second direction involves the development of financial investigation and asset-tracing mechanisms. Effective identification of unexplained wealth increasingly depends on the capacity of law enforcement and specialized institutions to analyze financial transactions, property ownership, bank accounts, corporate structures, beneficial ownership, and other

relevant financial information. The use of such mechanisms facilitates the identification of assets that may have been acquired through corruption but formally registered in the name of relatives, intermediaries, legal entities, or other third parties.

A third direction relates to the application of civil and administrative mechanisms for the recovery or confiscation of unexplained assets. In several European jurisdictions, the absence of sufficient evidence to establish criminal liability does not necessarily prevent the State from examining the lawful origin of assets or initiating proceedings concerning their confiscation, provided that such mechanisms comply with applicable constitutional and human-rights standards. This approach reflects a broader shift from an exclusively punitive model toward an integrated system combining criminal prosecution, prevention, financial control, and asset recovery.

Finally, European approaches increasingly emphasize institutional cooperation and specialized enforcement capacity. Combating illicit enrichment requires coordinated action among anti-corruption institutions, prosecutorial authorities, police bodies, financial intelligence units, tax authorities, asset-recovery offices, and judicial institutions. The effectiveness of the legal framework therefore depends not only on the formal existence of the offence or other legal mechanisms but also on the ability of institutions to exchange information, conduct complex financial investigations, preserve evidence, and ensure judicial oversight.

Thus, the European experience demonstrates that the legal response to illicit enrichment cannot be reduced exclusively to the criminalization of unexplained wealth. It represents a broader legal and institutional mechanism that combines prevention, financial transparency, investigation, prosecution, confiscation, and recovery of unlawfully acquired assets. For the Republic of Moldova, the comparative examination of these approaches is particularly relevant for assessing the effectiveness of existing legislation and identifying possible solutions for strengthening the national framework for preventing and combating corruption and illicit enrichment.

1.1.THE CRIMINALIZATION OF ILLICIT ENRICHMENT

The incorporation of Article 20 of the United Nations Convention against Corruption (UNCAC) (United Nations, 2004), which addresses the criminalisation of illicit enrichment, into national criminal legislation has proved to be a complex and, in several European jurisdictions, highly controversial legal process. Although Article 20 encourages States Parties to consider establishing illicit enrichment as a criminal offence, subject to the fundamental principles of their legal systems, its implementation has not been uniform across Europe. The difficulties encountered by national legislators and courts have arisen primarily from constitutional and fundamental-rights considerations concerning the relationship between the criminalisation of unexplained increases in wealth and the basic guarantees of criminal justice.

One of the principal challenges concerns the compatibility of illicit enrichment offences with the presumption of innocence, which constitutes a fundamental principle of modern criminal law and criminal procedure. In traditional criminal proceedings, the prosecution is required to establish, through admissible evidence, the existence of the offence and the defendant's responsibility. By contrast, certain models of illicit enrichment legislation may appear to require the accused to provide an explanation for a substantial discrepancy between his or her lawful income and the assets possessed. This situation has generated concerns that the practical operation of such provisions could result in an indirect reversal, or at least a significant modification, of the conventional burden of proof. Consequently, constitutional courts and other judicial bodies in a number of European countries have examined whether such mechanisms are compatible with the requirement that a person must be presumed innocent until proven guilty.

Closely connected with the presumption of innocence is the principle governing the burden of proof. In criminal law, the responsibility for proving the essential elements of an offence generally rests with the prosecution. The introduction of an illicit enrichment offence may, depending on its statutory formulation, create a situation in which the prosecution establishes an objective disproportion between the defendant's legitimate income and his or her assets, after which the defendant is expected to provide a satisfactory lawful explanation. Although such a mechanism does not necessarily amount, in formal terms, to a complete reversal of the burden of proof, it may nevertheless create a significant evidentiary burden for the accused. This has generated considerable debate concerning the limits within which evidentiary presumptions may be used in criminal proceedings without undermining fundamental procedural safeguards.
Another important constitutional issue relates to the privilege against self-incrimination. The right of an accused person not to be compelled to contribute to his or her own criminal prosecution represents an essential component of the right to a fair trial. Illicit enrichment provisions may raise particular concerns in this regard when the accused is expected to explain the origin of assets or financial resources that appear disproportionate to his or her officially declared income. If the absence of an adequate explanation may subsequently be interpreted as evidence supporting criminal liability, questions may arise as to whether the individual is effectively being compelled to participate in establishing the case against himself or herself. European legal systems have therefore had to determine the extent to which cooperation or explanations concerning the origin of property may legitimately be required without violating the privilege against self-incrimination.
The principle of legality in criminal matters constitutes another major obstacle to the direct implementation of Article 20 UNCAC (United Nations, 2004). Under the principle of *nullum crimen, nulla poena sine lege*, criminal liability must be based on legislation that defines prohibited conduct with sufficient clarity and foreseeability. Illicit enrichment offences may present particular difficulties because the concept itself is relatively broad and may encompass situations in which a person's assets substantially exceed his or her identifiable legitimate income without necessarily establishing the precise unlawful act through which the wealth was acquired. National legislators must therefore formulate the offence with sufficient precision to enable individuals to foresee which conduct may give rise to criminal liability. Excessively broad or ambiguous formulations could create risks of arbitrary enforcement and conflict with constitutional requirements concerning the certainty and foreseeability of criminal law.
The protection of property rights represents an additional dimension of the constitutional debate. Illicit enrichment investigations frequently involve the identification, tracing, freezing, confiscation, or other forms of restriction concerning assets whose lawful origin has not been adequately demonstrated. While such measures may constitute important instruments in combating corruption and recovering the proceeds of crime, they must remain compatible with constitutional and human-rights standards protecting property. The mere existence of unexplained wealth cannot automatically be equated with the existence of criminally obtained property. Consequently, national legislation must establish appropriate legal safeguards capable of distinguishing between legitimate property whose origin cannot immediately be documented and assets that are reasonably connected with criminal activity.
These constitutional difficulties demonstrate that the implementation of Article 20 UNCAC (United Nations, 2004) cannot be approached merely as a technical exercise involving the insertion of a new offence into a national Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002). Rather, the criminalisation of illicit enrichment requires a careful reconciliation between the objectives of anti-corruption policy and the fundamental principles governing criminal responsibility. European states have therefore adopted different

legislative approaches, ranging from the direct criminalisation of illicit enrichment to alternative mechanisms based on confiscation, civil recovery, financial disclosure obligations, administrative sanctions, or evidentiary presumptions subject to judicial safeguards.

The diversity of national approaches also illustrates the importance of the qualification contained in Article 20 UNCAC (United Nations, 2004), according to which the criminalisation of illicit enrichment is to be considered in accordance with the Constitution and fundamental principles of the relevant legal system. This qualification reflects the recognition that the fight against corruption, although a legitimate and internationally recognised objective, cannot be pursued independently of constitutional guarantees. Effective anti-corruption legislation must therefore ensure that the investigation and prosecution of unexplained wealth do not undermine the principles of legality, proportionality, presumption of innocence, fair trial, protection against self-incrimination, and respect for property rights.

Accordingly, the European experience demonstrates that the legal effectiveness of illicit enrichment provisions depends not only on their formal compliance with the requirements of UNCAC (United Nations, 2004) but also on their compatibility with domestic constitutional standards and broader human-rights obligations. The central challenge for national legislators is to construct a legal framework capable of addressing significant and objectively unjustified increases in wealth, particularly among public officials exposed to corruption risks, while simultaneously preserving the fundamental safeguards that distinguish criminal justice based on the rule of law from systems founded on presumptions of guilt. In this context, the implementation of Article 20 UNCAC (United Nations, 2004), represents a continuing process of balancing the need for effective corruption prevention and asset recovery against the constitutional limits imposed on the exercise of criminal law powers.

The underlying rationale of the criminalization of illicit enrichment is based on the premise that a substantial and unjustified increase in the assets of a public official may represent the visible financial manifestation of hidden corrupt practices. Rather than focusing exclusively on the identification of a specific predicate offence, this legal approach allows the authorities to examine the relationship between the official's lawful income, declared assets, expenditures, and actual level of wealth. In this respect, illicit enrichment has become an important component of modern anti-corruption policies, particularly where complex financial transactions, concealed ownership structures, intermediaries, and sophisticated methods of asset concealment make the direct detection of corruption considerably more difficult.

At the international level, illicit enrichment is addressed by Article 20 of the United Nations Convention against Corruption (UNCAC) (United Nations, 2004). However, unlike certain other provisions of the Convention, Article 20 does not impose an absolute obligation on States Parties to criminalize illicit enrichment. Instead, it establishes a discretionary legislative approach, requiring States, subject to their constitutional principles and the fundamental principles of their legal systems, to consider adopting the necessary legislative and other measures to establish illicit enrichment as a criminal offence when committed intentionally. The provision concerns a substantial increase in the assets of a public official that the official cannot reasonably explain in relation to his or her lawful income.

The formulation of Article 20 is particularly significant because it attempts to reconcile the objective of combating corruption with the fundamental principles governing criminal liability. States are therefore expected to assess whether the criminalization of illicit enrichment is compatible with their constitutional order, principles of legality, presumption of innocence, requirements concerning the burden of proof, and protection of fundamental rights. Consequently, the implementation of Article 20 has not followed a uniform model, and national approaches differ considerably with regard to the definition of the offence, the persons who

may be held liable, the threshold of unexplained wealth, evidentiary requirements, and the applicable forms of legal liability.

At the European level, the implementation of Article 20 of UNCAC (United Nations, 2004) has likewise demonstrated considerable diversity. This situation is largely attributable to the discretionary nature of the provision, which allows States to determine, in accordance with their constitutional and legal traditions, whether illicit enrichment should be addressed through criminal law or through other legal mechanisms. European legal systems have consequently developed different approaches to the phenomenon, ranging from the direct criminalization of illicit enrichment to administrative, civil, financial, and asset-recovery mechanisms aimed at identifying and confiscating unexplained or unlawfully acquired wealth.

The comparative analysis of European practice indicates that measures designed to prevent and combat illicit enrichment have gradually developed along several major directions. The first concerns the strengthening of asset declaration and financial disclosure systems, particularly for public officials and persons holding positions involving significant public responsibilities. Such mechanisms enable competent authorities to compare declared assets and income with the actual financial situation of the person concerned and to identify significant discrepancies that may require further investigation.

A second direction involves the development of financial investigation and asset-tracing mechanisms. Effective identification of unexplained wealth increasingly depends on the capacity of law enforcement and specialized institutions to analyze financial transactions, property ownership, bank accounts, corporate structures, beneficial ownership, and other relevant financial information. The use of such mechanisms facilitates the identification of assets that may have been acquired through corruption but formally registered in the name of relatives, intermediaries, legal entities, or other third parties.

A third direction relates to the application of civil and administrative mechanisms for the recovery or confiscation of unexplained assets. In several European jurisdictions, the absence of sufficient evidence to establish criminal liability does not necessarily prevent the State from examining the lawful origin of assets or initiating proceedings concerning their confiscation, provided that such mechanisms comply with applicable constitutional and human-rights standards. This approach reflects a broader shift from an exclusively punitive model toward an integrated system combining criminal prosecution, prevention, financial control, and asset recovery.

Finally, European approaches increasingly emphasize institutional cooperation and specialized enforcement capacity. Combating illicit enrichment requires coordinated action among anti-corruption institutions, prosecutorial authorities, police bodies, financial intelligence units, tax authorities, asset-recovery offices, and judicial institutions. The effectiveness of the legal framework therefore depends not only on the formal existence of the offence or other legal mechanisms but also on the ability of institutions to exchange information, conduct complex financial investigations, preserve evidence, and ensure judicial oversight.

Thus, the European experience demonstrates that the legal response to illicit enrichment cannot be reduced exclusively to the criminalization of unexplained wealth. It represents a broader legal and institutional mechanism that combines prevention, financial transparency, investigation, prosecution, confiscation, and recovery of unlawfully acquired assets. For the Republic of Moldova, the comparative examination of these approaches is particularly relevant for assessing the effectiveness of existing legislation and identifying possible solutions for strengthening the national framework for preventing and combating corruption and illicit enrichment.

1.2.ALTERNATIVE LEGAL APPROACHES TO UNEXPLAINED WEALTH

The absence of a specific offence of illicit enrichment does not necessarily mean that European legal systems are incapable of addressing substantial and unexplained increases in wealth. In a number of jurisdictions, conduct corresponding, at least in substance, to illicit enrichment may fall within the scope of other criminal offences or within civil, administrative, financial, or asset-recovery mechanisms.

France, for example, addresses certain situations involving unexplained resources through related criminal-law provisions concerning the acquisition or possession of means and the inability to explain the purpose or origin of particular transactions. This approach demonstrates that a legal system may respond to unexplained wealth without necessarily establishing an autonomous offence bearing the legal designation of "*illicit enrichment*."

A comparable approach can be identified in Cyprus, where special legislation addresses conduct involving the acquisition of material advantages by a public official through abuse of his or her position. In such circumstances, the applicable legal framework establishes mechanisms for addressing unlawful enrichment while maintaining a conventional criminal-law structure.

Denmark has adopted a partially criminal-law-based approach, whereby illicit enrichment may be addressed through offences connected with the exercise of public functions, particularly where unlawful conduct associated with public office results in an unjustified financial benefit.

Other jurisdictions, including the Netherlands and Georgia, may pursue unlawful activities resulting in illicit enrichment through legislation concerning money laundering. Under this approach, the focus is not necessarily placed on unexplained wealth as an autonomous offence, but on the unlawful origin, transfer, concealment, or use of assets generated through criminal activity.

These models demonstrate that combating illicit enrichment can be pursued through multiple legal mechanisms. The distinction between systems is therefore not merely whether illicit enrichment is formally criminalized, but also whether the legal system provides effective mechanisms for tracing, freezing, confiscating, and recovering assets whose lawful origin cannot be established.

1.3.EUROPEAN CONSTITUTIONAL CONCERNS REGARDING ILLICIT ENRICHMENT

The constitutional dimension represents one of the principal obstacles to the widespread criminalization of illicit enrichment in Europe. Several European jurisdictions have questioned whether an offence based upon unexplained wealth may indirectly transfer the evidentiary burden from the prosecution to the accused.

The Italian experience is particularly relevant. Illicit enrichment was introduced in Italy in 1992 as a response to revenues generated by organized crime. The legislative initiative followed the assassination of Judge Giovanni Falcone, who had played a central role in the prosecution of the Mafia through the Maxi Trial. However, two years later, the Italian Constitutional Court declared the relevant criminal offence unconstitutional, emphasizing that even the serious threat posed by organized crime could not justify undermining fundamental constitutional guarantees, including the presumption of innocence and the accused's right to remain silent.

Portugal provides another significant example. Efforts to establish a specific offence of illicit enrichment were suspended in 2012 after the Portuguese Constitutional Court concluded that the proposed legislative framework could conflict with the presumption of innocence. Nevertheless, the issue has continued to be examined, particularly with a view to identifying a constitutionally compatible mechanism for addressing unexplained wealth.

Poland has likewise examined the possibility of criminalizing illicit enrichment. Latvia's legislation has also been considered to contain certain elements that could potentially provide a basis for implementing provisions addressing illicit enrichment directly.

By contrast, countries such as Norway, Sweden, Luxembourg, and Croatia have considered the possibility of adopting similar provisions but ultimately refrained from submitting proposals to their governments, primarily because of concerns regarding compatibility with constitutional principles.

The Romanian experience is also relevant from a comparative perspective. The examination of the issue concluded that there was no technical legal obstacle preventing Parliament from adopting an offence of illicit enrichment. The principal difficulty was considered to lie not in the absence of criminalization but in the lack of effective procedures capable of identifying and establishing the existence of illicit enrichment.

These examples demonstrate that the European debate concerning illicit enrichment extends beyond the simple question of whether the conduct should be criminalized. The central issue is how such criminalization can be designed so that it remains compatible with constitutional guarantees while still providing law enforcement authorities with effective instruments for combating corruption.

1.4.EVIDENTIARY CHALLENGES AND THE PRESUMPTION OF INNOCENCE

The criminalization of illicit enrichment is closely connected with the evidentiary difficulties inherent in the investigation of corruption offences. Traditional corruption offences frequently involve two or more participants whose interests are aligned in concealing the unlawful transaction. The corrupt official and the person providing the unlawful benefit normally have no incentive to disclose the circumstances of the transaction.

Consequently, evidence concerning the predicate corruption offence may be difficult to obtain. Transactions may be concealed through intermediaries, carried out over extended periods, or structured through complex financial arrangements. Witness statements may also constitute indirect evidence, while documentary and financial evidence may be fragmented across multiple transactions or jurisdictions. These characteristics make the investigation and prosecution of corruption particularly demanding.

The criminalization of illicit enrichment seeks, in part, to overcome these evidentiary difficulties by allowing law enforcement authorities to focus on the substantial discrepancy between lawful income and accumulated assets. In jurisdictions adopting a more extensive version of the offence, the prosecution may demonstrate that the assets held by the public official substantially exceed what could reasonably have been acquired from legitimate sources. However, this approach has generated substantial doctrinal criticism where the burden of proof is effectively shifted to the accused. Such a mechanism may create a situation in which the prosecution establishes the existence of disproportionate assets and the accused is subsequently required to provide an explanation regarding their lawful origin.

Accordingly, the most constitutionally sustainable model is one in which the prosecution retains the primary responsibility for establishing the relevant factual circumstances and the illicit character of the assets, while any obligation imposed upon the accused to provide explanations remains subject to strict procedural and constitutional safeguards.

1.5.THE CRIMINALIZATION OF ILLICIT ENRICHMENT IN THE REPUBLIC OF MOLDOVA

The Republic of Moldova represents an important European example because it adopted illicit enrichment as a distinct criminal offence in 2013. The legislative development must be

examined in connection with Article 20 of UNCAC (United Nations, 2004) and the broader national policy of strengthening the prevention and combating of corruption.

The legislative process preceding the adoption of Article 330² of the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002) was reflected, among other things, in the explanatory memorandum accompanying the draft legislation. The explanatory memorandum expressly referred to Article 20 of UNCAC (United Nations, 2004) and the objective of creating a policy of "*zero tolerance*" towards corruption.

The initial formulation of the proposed offence differed considerably from the final legislative version. The original concept focused on the possession by a person holding a responsible position or a public official, personally or through third parties, of assets that the person knew or should have known substantially exceeded his or her lawfully obtained income.

An important contribution to the legislative debate was made by the Council of Europe expert Tilman Hope (Derencinovic, 2009). In his expert assessment of the draft legislation, the proposed model was regarded as innovative because it attempted to avoid certain human-rights difficulties traditionally associated with illicit enrichment, particularly the presumption of innocence and the prohibition of self-incrimination. The expert also observed that Republic of Moldova could become one of the first European jurisdictions, apart from Ukraine, to adopt such an offence.

On 23 December 2013, the Parliament of the Republic of Moldova adopted the relevant legislative amendments. Among other changes, the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002)was supplemented by Article 106¹ concerning extended confiscation and Article 330² concerning illicit enrichment.

1.5.THE MOLDOVAN MODEL AND THE BURDEN OF PROOF

A particularly important characteristic of the Moldovan approach is that the legislator did not simply reproduce a model in which the accused is required to prove the lawful origin of his or her assets.

The initial formulation of Article 330² was based on the intentional conduct of a public official that resulted in illicit enrichment through a substantial increase in assets exceeding lawful income. However, the National Anticorruption Center (NAC) recommended reformulating the provision. According to the NAC's table of objections and proposals concerning the draft that subsequently led to Law No. 326/2013 (Parliament of the Republic of Moldova, 2013), the emphasis should be placed not on the intentional act that generated the assets, but on the possession of assets disproportionate to the person's lawful income.

The final formulation incorporated the expression "*on the basis of evidence*," reflecting the need to preserve the presumption of innocence and the constitutional presumption of lawful ownership.

This issue was subsequently addressed by the Constitutional Court of the Republic of Moldova in its Judgment No. 6 of 16 April 2015 (Constitutional Court of Republic of Moldova, 2015) concerning the constitutionality of certain provisions of the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002) and the Code of Criminal Procedure of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2003) relating to extended confiscation and illicit enrichment.

The Constitutional Court expressly held that the burden of proving illicit enrichment rests exclusively with the State authorities. The Court interpreted the requirement that it be established, on the basis of evidence, that the assets could not have been lawfully acquired as requiring additional evidence, obtained in accordance with the law, demonstrating the illicit character of the wealth.

This constitutional interpretation is particularly important because it distinguishes the Moldovan model from systems in which the accused bears a direct burden of demonstrating the lawful origin of assets.

The Constitutional Court also established that Article 330² could not be applied retroactively to assets acquired before the entry into force of the relevant legal provisions. Ultimately, the Court concluded that the challenged provisions remained within the constitutional framework and were justified by the interests of state security and the combating of corruption.

1.6.THE RELATIONSHIP BETWEEN ILLICIT ENRICHMENT AND UNJUST ENRICHMENT

Another important issue in the Moldovan legislative debate concerned the distinction between illicit enrichment under criminal law and unjust enrichment as regulated by civil law.

The General Prosecutor's Office pointed out that the proposed concept of illicit enrichment could appear to overlap with the civil-law concept of unjust enrichment. However, these concepts are legally distinct.

Unjust enrichment under civil law constitutes a legal fact capable of generating civil rights and obligations. It generally arises where one person obtains a benefit without a legal or contractual basis. The absence of a legal basis does not, by itself, transform the conduct into a criminal offence.

Illicit enrichment, by contrast, is associated with the accumulation or possession of assets whose value is substantially disproportionate to the lawful income of a public official and whose unlawful origin is established in accordance with criminal procedural requirements. The source material emphasizes that illicit enrichment may be connected to predicate offences capable of generating unlawful income, such as passive corruption, influence peddling, embezzlement of another person's property through abuse of office, and other profit-generating offences. Consequently, the concepts regulated by Articles 1389–1397 of the Civil Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) and Article 330² of the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002) cannot be regarded as equivalent.

This distinction is essential for avoiding the inappropriate extension of criminal liability to situations that belong exclusively to the sphere of civil law.

1.7.THE PRINCIPLE OF PROPORTIONALITY AND COMPARATIVE JURISPRUDENCE

The constitutional controversy surrounding illicit enrichment has also been examined in comparative jurisprudence. The central question is whether limitations imposed upon the presumption of innocence may, under specific circumstances, be justified by a sufficiently important public interest.

The House of Lords in the United Kingdom, following the approach developed in Salabiaku v. France (European Court of Human Rights, 1988), accepted the possibility that certain legislative presumptions affecting the presumption of innocence could be assessed through a proportionality test. In R v. Lambert (House of Lords, 2001), the proportionality principle was emphasized as a mechanism for determining whether an interference with the presumption of innocence is justified and does not exceed what is necessary in a democratic society.

A similar methodology was applied by the Supreme Court of Canada in R. v. Chaulk (Supreme Court Judgements, 1990), where the Court developed a structured proportionality analysis. First, the objective pursued by the legislative provision must be sufficiently important to justify a limitation upon a constitutionally protected right. Second, the means selected to achieve that objective must satisfy proportionality requirements.

These requirements include the existence of a rational connection between the measure and its objective, the use of means that interfere with the protected right as little as reasonably possible, and a proportional relationship between the effects of limiting the right and the importance of the objective pursued.

A comparable approach was adopted by the Constitutional Court of South Africa in S. v. Coetzee (SAFLII, 1997), where the evidentiary advantage provided to the prosecution was assessed against the constitutional protection of the presumption of innocence.

These comparative examples are relevant to the Moldovan framework because they demonstrate that the constitutional compatibility of illicit enrichment mechanisms should not necessarily be assessed in absolute terms. Rather, the legality of particular evidentiary mechanisms may depend upon whether they pursue a legitimate and sufficiently important objective and whether the interference with fundamental rights remains necessary and proportionate.

1.8. INSTITUTIONAL COMPETENCES IN COMBATING ILLICIT ENRICHMENT IN THE REPUBLIC OF MOLDOVA

Within the Moldovan institutional framework, illicit enrichment is treated as an act connected with corruption. According to Article 45(2)(m) of the Law on Integrity (Parliament of the Republic of Moldova, 2016), an act connected with an act of corruption may constitute a criminal offence or contravention committed in the public or private sector and sanctioned under the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002) or the Contravention Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2008).

This classification is significant because it establishes the institutional context within which illicit enrichment is prevented, detected, investigated, and sanctioned.

The National Anticorruption Center (NAC) occupies a central position in the prevention and combating of corruption and corruption-related offences. Its activity is based on principles including legality, independence, impartiality, priority of corruption-prevention methods, respect for fundamental human rights and freedoms, opportunity, the combination of public and confidential methods of activity, and cooperation with public authorities, civil society organizations, and citizens.

In matters specifically related to investigations and criminal prosecution concerning illicit enrichment, several specialized structures within the NAC are relevant, including the General Directorate for Combating Corruption, the General Directorate for Criminal Investigation, and particularly the Criminal Assets Recovery Agency (CARA/ARBI). The latter is particularly important because cases of illicit enrichment may involve the identification, freezing, confiscation, and recovery of assets suspected of having an unlawful origin.

1.9.PARALLEL FINANCIAL INVESTIGATIONS AND ASSET RECOVERY

The role of the Criminal Assets Recovery Agency is closely connected with the mechanism of parallel financial investigations. Law No. 49 of 30 March 2017 (Parliament of the Republic of Moldova. (2017) amended the relevant legislation and provided a legal framework for such investigations.

Parallel financial investigations may be understood as a combination of criminal-procedure activities and special investigative measures aimed at collecting evidence concerning a suspect, accused person, defendant, or convicted person, as well as information concerning his or her assets, beneficial ownership, property owners, and administrators of assets held for the benefit of the person under investigation.

The principal objective of such investigations is the identification and recovery of criminal assets. This mechanism is particularly relevant to illicit enrichment because financial analysis

may reveal discrepancies between declared income, actual assets, expenditures, beneficial ownership, and financial transactions.

Accordingly, the investigation of illicit enrichment cannot be effectively conducted exclusively through traditional investigative methods. It requires a complex financial-investigation component capable of reconstructing the economic profile of the person concerned and identifying the actual origin and movement of assets.

1.10.THE ROLE OF THE NATIONAL INTEGRITY AUTHORITY

The National Integrity Authority (ANI) also plays an important preventive role. Under Law No. 132/2016 (Parliament of the Republic of Moldova, 2016), ANI is an independent public authority operating at national level, whose principal mission is to ensure integrity in the exercise of public and public-dignity functions and to prevent corruption through the control of assets and personal interests, as well as compliance with the legal regimes concerning conflicts of interest, incompatibilities, and restrictions.

The declaration of assets and personal interests constitutes one of the principal preventive instruments. Public officials are required to submit declarations at the beginning of their employment, appointment, or validation of their mandate, annually, and upon termination of their mandate or employment/service relationship.

Through these mechanisms, ANI contributes primarily to the prevention and detection of unjustified wealth, while criminal investigation authorities address the criminal-law dimension when the necessary legal and evidentiary conditions are satisfied.

The distinction between the preventive and repressive dimensions is therefore essential. Asset-control procedures may identify discrepancies or irregularities, whereas criminal prosecution requires compliance with the higher evidentiary standards applicable to criminal liability.

1.11. OTHER INSTITUTIONAL ACTORS AND INTERINSTITUTIONAL COOPERATION

The prevention and investigation of illicit enrichment also involve other state institutions. The source material refers, in particular, to the State Tax Service, whose competences in preventing and combating economic offences and conducting special investigative activities have contributed to the development of potential cooperation mechanisms with the NAC.

Another relevant institution is the Internal Protection and Anti-Corruption Service (SPIA) within the Ministry of Internal Affairs. Since employees of the Ministry of Internal Affairs may fall within the category of subjects capable of committing illicit enrichment, the institutional framework provides a basis for investigating such conduct when committed by personnel under the relevant jurisdiction.

The practical experience described in the source material indicates, however, that there has been limited documented case-law concerning illicit enrichment committed by employees of the Ministry of Internal Affairs. This may reflect the complexity of proving the offence, the difficulties involved in gathering relevant evidence, or the limited practical application of Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002).

These circumstances highlight the importance of clearly defining institutional competences and establishing effective mechanisms for interinstitutional cooperation among the NAC, ANI, law-enforcement bodies, financial authorities, and other institutions possessing relevant information.

1.12. LEGISLATIVE DEVELOPMENT AND THE NEED FOR FURTHER REFORM

Since the introduction of Article 330² into the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002), the Moldovan legal framework has undergone continuing examination and attempts at refinement. Legislative proposals, anticorruption

assessments, academic publications, professional conferences, and discussions involving legal practitioners and law-enforcement officials have contributed to the debate concerning the effective application of the offence.

One of the central objectives has been to reduce ambiguity in the formulation of the offence and to establish clearer criteria for its application. The experience accumulated since 2013 suggests that the practical effectiveness of the provision depends not only upon its substantive formulation but also upon the existence of clear investigative procedures, adequate financial-investigation capacities, and well-defined institutional competences.

The legislative policy should therefore focus on clarifying the legal elements of illicit enrichment while simultaneously ensuring that the provision remains compatible with constitutional guarantees. In particular, any future amendments should clearly distinguish between the evidentiary burden of the prosecution and the possibility of requiring the person concerned to provide explanations concerning assets.

1.13.PREVENTIVE EDUCATION AND INSTITUTIONAL INTEGRITY

An effective strategy for combating illicit enrichment should not be limited to criminal prosecution. Prevention, professional education, institutional transparency, and the development of an integrity-oriented public administration are equally important.

Public officials should receive systematic information concerning the criminal-law consequences of illicit enrichment, preferably beginning with their appointment or employment. Such training could explain the concept of illicit enrichment, asset-declaration obligations, mechanisms for reporting suspected unlawful conduct, and the legal consequences associated with corruption and corruption-related offences.

Internal regulations of public institutions could also incorporate specific provisions concerning integrity obligations and the reporting of unlawful practices. Such mechanisms would strengthen the preventive function of public administration and contribute to the creation of an institutional culture in which unexplained accumulation of wealth is treated as a serious integrity concern.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The comparative analysis demonstrates that the criminalization of illicit enrichment remains one of the most controversial instruments of contemporary anti-corruption policy. Although the mechanism has significant potential for addressing situations in which the precise predicate offence cannot easily be established, its application must remain compatible with the fundamental principles of criminal justice.

European experience reveals several distinct approaches: direct criminalization, reliance on related offences, application of money-laundering provisions, civil and administrative asset-control mechanisms, and confiscation and asset-recovery procedures. Constitutional concerns, particularly those relating to the presumption of innocence and the burden of proof, have played a decisive role in determining the choice of each national model.

The Republic of Moldova adopted a distinct criminal offence of illicit enrichment through Article 330² of the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002) in 2013. An important characteristic of the Moldovan model is the constitutional requirement that the State bear the burden of proving the illicit nature of the relevant assets. The Constitutional Court's Judgment No. 6 of 16 April 2015 (Constitutional Court of Republic of Moldova, 2015) represents a fundamental reference point in this regard.

At the institutional level, effective prevention and prosecution require coordinated action involving the NAC, ARBI, ANI, financial authorities, prosecutors, investigative bodies, and other competent institutions. Parallel financial investigations and asset-tracing mechanisms are

particularly important because illicit enrichment is fundamentally a financial phenomenon requiring specialized investigative expertise.

Ultimately, the effectiveness of Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of Republic of Moldova, 2002) depends upon a combination of clear substantive criminal-law provisions, constitutionally compliant evidentiary mechanisms, specialized financial investigations, institutional cooperation, effective asset recovery, and systematic preventive education. The further development of the Moldovan framework should therefore pursue a balance between the legitimate public interest in combating corruption and the protection of fundamental rights guaranteed by the Constitution and international human-rights instruments.

REFERENCES

Constitutional Court of Republic of Moldova. (2015). Constitutional Court's Judgment No. 6 of 16 April 2015[online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://constcourt.md/ccdocview.php?l=ro&tip=hotariri&docid=533

Derencinovic, D. *Criminalizition of illegal Enrichment: Fredom for Fear*, 2009, no.4, p. 20-21.

European Court of Human Rights. (1988). Salabiaku v. France[online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://hudoc.echr.coe.int/eng#{%22itemid%22:[%22001-57570%22]}

House of Lords. (2001). Judgments - Regina v. Lambert (On Appeal From The Court of Appeal (Criminal Division) [online] [Accessed on the date 10.09.2026].`Available: https://publications.parliament.uk/pa/ld200102/ldjudgmt/jd010705/regina-1.htm

Parliament of the Republic of Moldova.(2002).Civil Code of Republic of Moldova [online] [Accessed on the date 10.09.2026].`Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=150498&lang=ro

Parliament of the Republic of Moldova. (2003). Code of Criminal Procedure of Republic of Moldova[online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=156277&lang=ro#

Parliament of the Republic of Moldova. (2008).Contraventional Cod of the Republic of Moldova [online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=156265&lang=ro#

Parliament of the Republic of Moldova. (2002). Criminal Code of the Republic of Moldova[online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=153355&lang=ro

Parliament of the Republic of Moldova. (2017). Law No. 49 of 30 March 2017 [online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=99129&lang=ro

Parliament of the Republic of Moldova. (2016). Law No. 132/2016 [online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=147882&lang=ro#

Parliament of the Republic of Moldova. (2013). Law No. 326/2013[online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=21894&lang=ro

SAFLII. (1997). S. v. Coetzee [online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.saflii.org/za/cases/ZACC/1997/2.html

Supreme Court Judgements. (1990). R. v. Chaulk[online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://decisions.scc-csc.ca/scc-csc/scc-csc/en/item/707/index.do

United Nations. (2004). United Nations Convention against Corruption [online] [Accessed on the date 13.09.2026].Available:https://www.unodc.org/documents/brussels/UN_Convention_Against_Corruption.pdf

PRACTICAL EXPERIENCE OF OTHER STATES IN PREVENTING AND COMBATING ILLICIT ENRICHMENT

Banescu-Sufana CORNEL NICOLAE
Drd. in law, University of European Studies of Moldova, Faculty of Law, Department of Law, Republic of Moldova
ORCID: 00090-0005-3203-6061
Vatamanita MARIANA
Drd. in law, "Constantin Stere"University of European Political and Economic Science, Faculty of Law, Department of Law, Republic of Moldova
ORCID: 0009-0004-2949-4750

Abstract

Considered from a broader perspective, the criminalisation of illicit enrichment raises the fundamental question of whether the protection of the public interest is sufficiently important to justify the introduction of a specific criminal offence that may involve a form of legal presumption. This issue is particularly relevant in the context of combating corruption and ensuring transparency in the exercise of public functions. Illicit enrichment provisions are generally intended to address situations in which a public official acquires assets or financial resources that cannot be reasonably explained in relation to his or her lawful income and legitimate sources of wealth.

The introduction of such criminal provisions, however, must be carefully reconciled with fundamental principles of criminal law and human rights protection. Comparative legal practice demonstrates that several states have adopted mechanisms aimed at addressing unexplained increases in wealth, while judicial practice has progressively developed criteria for reconciling such mechanisms with the presumption of innocence and the right to a fair trial.

In this context, the case-law of the European Court of Human Rights provides important guidance. The Court has clarified that the presumption of innocence does not, in itself, prevent national legislators from adopting criminal-law provisions that incorporate certain evidentiary presumptions. Nevertheless, such presumptions must remain within reasonable limits and must respect the principles of legality, rationality and proportionality. In particular, the burden placed upon the accused must not be excessive, and the defence must retain a genuine opportunity to challenge the presumption and present relevant evidence.

Consequently, the legitimacy of criminalising illicit enrichment depends upon maintaining an appropriate balance between the public interest in combating corruption and the effective protection of individual fundamental rights.

Keywords: public interest; criminalisation; illicit enrichment; legal presumption; human rights; presumption of innocence; criminal law.

INTRODUCTION

A criminal offence represents a socially harmful act because, through its material consequences and social repercussions, it affects the established social order and reflects the offender's attitude towards legally protected social values. Criminal conduct constitutes a violation of rules of behaviour established within society and, consequently, acquires the characteristics of an unlawful and antisocial act (Grama, Botnaru, Savga & Grosu, 2012).

Within this broader framework, corruption-related offences represent a particularly serious threat to the proper functioning of public institutions, the rule of law and public confidence in state authorities. The protection of public integrity is therefore not limited to the repression of

traditional forms of bribery or abuse of office but also requires mechanisms capable of identifying situations in which public officials accumulate assets that cannot reasonably be reconciled with their lawful income.

One such mechanism is the criminalisation of illicit enrichment. In the Republic of Moldova, illicit enrichment was introduced as a separate criminal offence through Article 330² of the Criminal Code of Republic of Moldova (2002) following the adoption of Law No. 326 of 23 December 2013. The legislative intervention was part of the broader development of the national anti-corruption framework and was influenced by the international standards established by the United Nations Convention against Corruption (UNCAC) (Law No. 326/2013; United Nations, 2003, Art. 20).

The importance of illicit-enrichment legislation derives from the specific nature of the offence. Unlike traditional corruption offences, the investigation does not necessarily begin with the identification of a concrete bribe, embezzlement or abuse of office. Instead, the authorities may begin by identifying a substantial discrepancy between a public official's legitimate income and the assets possessed or controlled by that person. The international literature describes illicit enrichment precisely in terms of a significant increase in the assets of a public official that cannot reasonably be explained in relation to lawful income (Muzila et. al., 2012).

The criminalisation of illicit enrichment nevertheless raises significant constitutional and human-rights concerns. The principal controversy concerns the relationship between the obligation to explain unexplained wealth and the presumption of innocence. The question is whether requiring a public official to provide information concerning the origin of his or her assets amounts to an impermissible reversal of the burden of proof or whether such a mechanism can be designed in a manner compatible with fundamental rights.

This issue is particularly important in the Republic of Moldova because Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) has been the subject of substantial academic and constitutional debate. Esanu identifies the lack of clarity and predictability in determining and proving the possession of assets substantially exceeding lawful income as one of the principal obstacles to criminal liability for illicit enrichment (Esanu, 2021).

The Constitutional Court of the Republic of Moldova has also examined constitutional challenges concerning Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) and requested an amicus curiae opinion from the Venice Commission and the OSCE Office for Democratic Institutions and Human Rights in the context of the constitutional review of the provision (Constitutional Court of the Republic of Moldova, 2022).

The purpose of this article is therefore to examine the criminalisation of illicit enrichment in the Republic of Moldova from a theoretical, legislative and comparative perspective, with particular emphasis on the relationship between anti-corruption objectives and fundamental human-rights guarantees.

The research uses historical, comparative, logical-analytical and systematic methods. The analysis is based on Moldovan criminal legislation, international anti-corruption instruments, academic literature and comparative experience concerning illicit-enrichment mechanisms.

1.1.THE CONCEPT AND CRIMINAL-LAW RATIONALE OF ILLICIT ENRICHMENT

The concept of illicit enrichment is closely connected with the principle of integrity in public office. A public official is expected to exercise public authority in accordance with the law and to ensure that personal financial interests do not interfere with public responsibilities.

Consequently, unexplained wealth may represent an objective indicator of possible corruption even where the underlying corrupt transaction cannot be directly identified.

Brinza and Stati place illicit enrichment within the broader framework of offences affecting the proper functioning of public activity and public authority (Brinza & Stati, 2015). From this perspective, the protected legal interest extends beyond individual property rights and includes the integrity, transparency and legality of public administration.

The international definition is provided by Article 20 of UNCAC. The provision requires States Parties, subject to their constitutional systems and fundamental legal principles, to consider establishing as a criminal offence the intentional illicit enrichment of a public official, understood as a significant increase in assets that the official cannot reasonably explain in relation to lawful income (United Nations, 2003).

The formulation of Article 20 is important for two reasons. First, it identifies the substantial increase in assets as the central factual circumstance. Second, it expressly refers to the inability to provide a reasonable explanation in relation to lawful income. Thus, legitimate income represents the principal benchmark against which the financial position of the public official is assessed.

UNODC has emphasised that the effectiveness of illicit-enrichment legislation depends substantially on the clarity with which the relevant elements of the offence are defined. Greater precision concerning the required financial discrepancy contributes to determining which conduct falls within the scope of criminal liability (UNODC, 2012).

The criminalisation of illicit enrichment consequently serves a dual function, combining both preventive and repressive objectives within the broader framework of anti-corruption criminal policy. From a preventive perspective, the existence of criminal liability for illicit enrichment is intended to discourage public officials and other persons exercising public authority from deliberately accumulating assets that are manifestly disproportionate to their legitimate and verifiable sources of income. The possibility of criminal investigation and prosecution may have a deterrent effect by increasing the risks associated with the unjustified accumulation, concealment or control of substantial wealth derived from unlawful sources. In this respect, the offence contributes not only to the protection of public resources but also to maintaining integrity, transparency and public confidence in the exercise of public functions.

At the same time, the criminalisation of illicit enrichment performs a repressive function by enabling the State to intervene through criminal law when the legally established constituent elements of the offence are present. Its purpose is not to criminalise the mere possession of wealth or the existence of a financial discrepancy as such, but to provide an appropriate legal response where the competent authorities establish the circumstances required by the criminal-law provision. Accordingly, the offence constitutes an additional mechanism through which the criminal justice system may address unexplained or unlawfully accumulated wealth, particularly in circumstances where conventional corruption offences may be difficult to establish because the specific underlying transaction or illicit exchange cannot be directly demonstrated.

The preventive and repressive dimensions of illicit-enrichment legislation should therefore operate in conjunction with the principles of legality, proportionality and presumption of innocence. Effective prevention cannot be achieved at the expense of fundamental procedural guarantees, while criminal repression must remain dependent upon the fulfilment of clearly defined statutory requirements and the existence of sufficient admissible evidence. The ultimate objective is to create a legal framework capable of deterring the unlawful accumulation of wealth while ensuring that criminal liability is imposed only where the evidentiary and legal requirements established by law have been satisfied.

1.2.INTERNATIONAL LEGAL FRAMEWORK

The international development of illicit-enrichment legislation demonstrates that the concept gradually evolved from a domestic anti-corruption mechanism into an internationally recognised instrument.

The Inter-American Convention against Corruption was one of the first major international instruments to address illicit enrichment expressly. Article IX encourages States Parties, subject to their constitutional principles, to establish an offence concerning a significant increase in the assets of a public official that cannot reasonably be explained in relation to legitimate income (OAS, 1996).

The concept was subsequently incorporated into the African Union Convention on Preventing and Combating Corruption and, most significantly, into UNCAC (African Union, 2003; United Nations, 2003).

It is essential, however, to distinguish between international recognition and an unconditional international obligation to criminalise. Article 20 UNCAC uses the formulation *"shall consider adopting",* while expressly making the provision subject to the Constitution and fundamental principles of the domestic legal system (United Nations, 2003, Art. 20).

UNODC's comparative research confirms that states have adopted different approaches to illicit enrichment. Some jurisdictions have established a separate criminal offence, while others rely on asset-declaration systems, administrative mechanisms, confiscation regimes or other forms of financial accountability (UNODC, 2012).

The considerable diversity observed among national legal systems in the regulation and criminalisation of illicit enrichment demonstrates that no single legislative model can be regarded as universally applicable or automatically transferable from one jurisdiction to another. Although different states pursue a broadly similar objective - preventing and combating the unjustified accumulation of wealth by public officials - the legal mechanisms through which this objective is achieved vary substantially depending on the specific characteristics of each national legal order.

The choice of an appropriate legislative model is influenced, first and foremost, by the constitutional guarantees applicable within the respective state. In particular, constitutional provisions concerning the presumption of innocence, the allocation of the burden of proof, the right to silence, the protection of property and the principle of legality may significantly determine the manner in which illicit enrichment can be defined and prosecuted. A mechanism that may be considered constitutionally acceptable in one jurisdiction may require substantial modification in another because of differences in constitutional safeguards and judicial interpretation.

The structure and traditions of the national criminal-law system also play an important role. States differ in the way they define criminal offences, establish evidentiary requirements and distinguish between substantive criminal liability and preventive or administrative mechanisms for unexplained wealth. Consequently, illicit enrichment may be regulated as an autonomous criminal offence, incorporated into a broader anti-corruption framework, or supplemented by civil, administrative or financial-disclosure mechanisms.

Institutional capacity represents another decisive factor. The practical effectiveness of any legislative model depends upon the ability of prosecutors, investigators, financial-intelligence institutions, tax authorities, integrity bodies and courts to identify, trace, analyse and evaluate complex financial information. Even a precisely drafted criminal provision may remain ineffective if the institutions responsible for its enforcement lack adequate expertise, access to financial information or mechanisms for interinstitutional cooperation.

Finally, the regulation of illicit enrichment must be understood within the broader anti-corruption strategy of the state. Criminalisation should operate alongside asset-declaration systems, conflict-of-interest regulations, financial monitoring, transparency requirements, prevention mechanisms and effective asset-recovery procedures. Accordingly, the most appropriate model is not necessarily the one that imposes the most extensive criminal liability, but the one that establishes an effective and proportionate relationship between prevention, investigation, prosecution and recovery of unlawfully acquired assets while respecting fundamental rights.

For the Republic of Moldova, this comparative perspective suggests that foreign legislative solutions should not be reproduced mechanically. Instead, relevant international practices should be adapted to the Moldovan constitutional framework, criminal-law structure, institutional realities and existing anti-corruption mechanisms. Such an approach would allow Republic of Moldova to develop a system of illicit-enrichment control that is both effective in combating corruption and sufficiently precise, predictable and compatible with fundamental rights.

1.3.ILLICIT ENRICHMENT UNDER THE CRIMINAL LAW OF THE REPUBLIC OF MOLDOVA

The Moldovan regulation of illicit enrichment has undergone significant legislative development since its introduction in 2013.

The current Article 330² of the Criminal Code of Republic of Moldova (2002) establishes liability for the intentional possession by a public official or a person holding a public-dignity position, personally or through third parties, of assets whose value substantially exceeds the acquired means, where evidence establishes that the assets could not have been obtained lawfully (Criminal Code of the Republic of Moldova, Art. 330²).

An important development occurred through Law No. 136 of 6 June 2024 (Parliament of Republic of Moldova, 2024). The amendments modified Article 330² and introduced Article 126² into the General Part of the Criminal Code of Republic of Moldova (2002), thereby providing a statutory definition of "*substantial excess*" (Virlan, 2025).

This legislative development is particularly important because the expression "*substantially exceeds*" had previously been criticised for its lack of precision. Esanu argued that the uncertainty surrounding the determination and proof of substantial excess constituted one of the main legal obstacles to applying Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (2002) (Esanu, 2021).

Similarly, Renita analysed the objective elements of Article 330² of Criminal Law of Republic of Moldova (2002) and emphasised the importance of identifying the act of possession, the special status of the offender and the substantial discrepancy between the assets and the means acquired (Renita, 2020).

The legislative reform may therefore be regarded as an important development in strengthening the clarity, predictability and foreseeability of the criminal-law framework governing illicit enrichment. By introducing more clearly defined legislative criteria for determining the circumstances in which the discrepancy between a person's lawful financial resources and accumulated assets may acquire criminal-law relevance, the legislator has sought to reduce the uncertainty that previously affected the interpretation and practical application of the offence. Greater precision in the statutory framework is particularly important in criminal law, where individuals must be able to reasonably foresee the circumstances under which particular conduct may result in criminal liability. In this regard, the establishment of a statutory threshold

represents a significant contribution to the principle of legal certainty and to the requirement that criminal provisions be formulated with sufficient clarity.

However, the introduction of a quantitative or statutory threshold cannot, by itself, resolve all the legal and practical difficulties associated with the application of illicit-enrichment provisions. The existence of a predefined threshold provides an important starting point for determining whether the financial discrepancy is sufficiently significant, but it does not eliminate the need for a comprehensive assessment of the circumstances of each individual case. Courts must still determine how the relevant assets were acquired, whether they were actually controlled or possessed by the person concerned, what lawful sources of income were available, and whether the available evidence sufficiently demonstrates that the assets could not have been obtained through legitimate means.

Consequently, the effectiveness of the reformed provision depends to a considerable extent on the development of consistent and coherent judicial interpretation. Courts play a central role in transforming general statutory concepts into predictable legal standards by clarifying the meaning and application of terms such as possession, substantial excess, lawful income and unexplained assets. Consistency in judicial reasoning is particularly important in order to avoid situations in which substantially similar factual circumstances produce significantly different legal outcomes. A stable body of case law can therefore strengthen both the effectiveness of the provision and the confidence of individuals and society in the fairness of its application.

Equally important are the evidentiary standards employed by investigative and judicial authorities. A substantial discrepancy between declared or lawful income and the value of assets should not automatically be treated as conclusive proof of criminal conduct. The financial discrepancy must be supported by reliable, admissible and, where possible, independently corroborated evidence. Financial records, tax information, property registers, banking data, asset declarations, expenditure analysis and other legally obtained evidence may collectively contribute to establishing the factual circumstances underlying the alleged illicit enrichment.

The evidentiary approach should also preserve an appropriate distinction between the prosecution's obligation to establish the objective elements of the offence and the accused's opportunity to provide an explanation concerning the origin of the assets. The existence of a statutory threshold should therefore not be interpreted as creating an automatic presumption of guilt or as transferring the entire burden of proof to the accused. Rather, the prosecution should establish a sufficiently strong factual basis demonstrating the relevant financial discrepancy and the other constituent elements required by law, after which the accused should have a genuine opportunity to challenge the evidence and provide a lawful explanation for the origin of the assets.

Accordingly, legislative reform should be understood as only one component of a broader process of strengthening the criminal-law response to illicit enrichment. Its practical effectiveness ultimately depends upon the interaction between precise legislation, consistent judicial interpretation, reliable evidentiary standards, specialised investigative capacity and respect for fundamental procedural guarantees. Only through the combined application of these elements can the reformed legal framework achieve its intended objective of combating unexplained and unlawfully accumulated wealth while maintaining the requirements of legality, foreseeability and fairness inherent in the rule of law.

1.4.PRESUMPTION OF INNOCENCE AND BURDEN OF PROOF

The relationship between illicit enrichment and the presumption of innocence represents one of the most controversial aspects of this offence.

The concern arises because the accused may be expected to explain the origin of assets that appear disproportionate to lawful income. At first sight, this could be interpreted as a transfer of the prosecution's evidentiary burden to the accused.

However, a distinction must be made between the prosecution's obligation to establish the objective circumstances of the offence and the accused's opportunity to provide an explanation for those circumstances.

The prosecution should first establish, through independent evidence, the existence of the assets, their value, the lawful income of the accused and the resulting discrepancy. Only after this factual foundation has been established should the explanation offered by the accused become relevant.

UNODC has noted that the mental element in illicit-enrichment offences can, depending on the legal system, be inferred from objective factual circumstances, such as unexplained transfers, large cash transactions or the deliberate use of assets that cannot reasonably be connected with legitimate income (UNODC, 2012).

The Moldovan doctrine has similarly emphasised the importance of maintaining a balance between effective anti-corruption enforcement and fundamental procedural guarantees (Virlan, 2023).

Accordingly, legislation criminalising illicit enrichment should not be interpreted as imposing an unconditional or absolute obligation on the accused to demonstrate his or her innocence or to prove, independently of the prosecution's case, that all assets have been acquired through lawful means. Such an approach would risk undermining the fundamental principle of the presumption of innocence and could result in an excessive transfer of the State's evidentiary responsibilities to the person subjected to criminal proceedings. The mere existence of a significant discrepancy between a public official's declared or legitimately acquired income and the value of the assets under his or her possession should therefore not, in itself, be regarded as sufficient evidence of criminal guilt.

Instead, illicit-enrichment proceedings should function within a carefully structured evidentiary framework that preserves a reasonable equilibrium between the interests of effective corruption control and the procedural rights of the accused. The initial and essential responsibility should rest with the prosecution, which must establish, on the basis of admissible, reliable and sufficiently corroborated evidence, the objective financial circumstances relevant to the alleged offence. This may include demonstrating the existence and value of the assets, identifying the person's legitimate financial resources, establishing the relevant period of acquisition and demonstrating the substantial discrepancy required by the applicable criminal-law provision.

Once the prosecution has established a sufficiently substantiated factual basis, the accused should be provided with a genuine and meaningful opportunity to challenge the conclusions reached by the investigative authorities and to explain the circumstances surrounding the acquisition or possession of the assets. Such an opportunity may involve presenting documentary evidence, identifying lawful sources of income, explaining financial transactions or providing information concerning loans, inheritances, gifts, legitimate commercial activities or other lawful sources of wealth. The accused's participation in clarifying these circumstances should be regarded as an exercise of procedural rights rather than as an automatic reversal of the burden of proof.

This evidentiary model is particularly important in cases involving complex financial structures, where the apparent discrepancy between income and wealth may have several possible explanations. A financial imbalance may result from legitimately accumulated savings, family resources, inheritance, loans, gifts, investments or assets acquired before the relevant period. Consequently, the existence of unexplained wealth should constitute an evidentiary

circumstance requiring investigation and judicial assessment, rather than an automatic conclusion that the assets are criminally derived.

The courts should therefore examine both the evidence submitted by the prosecution and any explanations or counter-evidence provided by the accused. The final determination of criminal liability must result from an overall assessment of the evidence rather than from the accused's failure to provide a satisfactory explanation alone. In this respect, the distinction between the prosecution's burden to establish the constituent elements of the offence and the accused's opportunity to rebut the factual inferences drawn from the evidence is fundamental.

Such an approach contributes to achieving the necessary balance between the effectiveness of illicit-enrichment legislation and the protection of fundamental procedural guarantees. It enables the State to investigate substantial and objectively established discrepancies in the wealth of public officials while preventing the criminal justice system from treating unexplained assets as automatic proof of guilt. Ultimately, the legitimacy of illicit-enrichment legislation depends upon ensuring that the mechanism is sufficiently effective to expose and prosecute genuinely unlawful enrichment while remaining consistent with the presumption of innocence, the right to a fair trial and the broader requirements of the rule of law.

1.5.COMPARATIVE EXPERIENCE: HONG KONG AND ARGENTINA

Hong Kong provides one of the most developed comparative examples of combating corruption through a combination of criminal law, institutional reform and preventive mechanisms.

The Hong Kong model is particularly significant because the Independent Commission Against Corruption (ICAC) adopted an integrated approach based on investigation, prevention and public education.

The Prevention of Bribery Ordinance also contains mechanisms addressing unexplained wealth and disproportionate standards of living. Section 10 addresses circumstances in which a current or former public official maintains a standard of living or controls financial resources disproportionate to legitimate income and fails to provide a satisfactory explanation (Prevention of Bribery Ordinance, Cap. 201, s. 10).

The Hong Kong experience demonstrates that an unexplained-wealth mechanism can coexist with judicial safeguards if the prosecution must first establish the objective financial discrepancy and the accused retains the possibility of providing an explanation.

The comparative importance of this model lies precisely in the evidentiary sequence: the state establishes the factual discrepancy first, while the accused is then given an opportunity to rebut the inference arising from that discrepancy.

Argentina represents another historically significant jurisdiction. The criminalisation of illicit enrichment dates back to 1964, although legislative initiatives had appeared earlier (Pico & K.B.U., 2006).

The Argentine experience is important because the constitutionality of the offence has repeatedly been discussed in connection with the presumption of innocence and the privilege against self-incrimination.

The judicial practice developed an approach according to which the prosecution must establish, through objective and independent sources, the existence of a considerable increase in the suspect's wealth. Relevant evidence may include asset declarations, tax information, property registers, vehicle registers, banking records and other official sources.

This approach demonstrates that the effective investigation and prosecution of illicit enrichment require substantially more than identifying individual assets whose origin appears to be unexplained. The central task of the competent authorities is to reconstruct, as accurately and comprehensively as possible, the financial history of the person concerned and to establish the relationship between his or her lawful income, expenditures, assets, financial transactions and

overall economic situation. Such a comprehensive financial reconstruction enables investigators and courts to assess whether the apparent discrepancy between legitimate financial resources and accumulated wealth can reasonably be explained by lawful circumstances or whether the available evidence indicates the existence of unlawfully acquired assets.

Accordingly, an illicit-enrichment investigation should examine the evolution of the person's wealth over a relevant period rather than focus exclusively on a particular property, bank account, vehicle or other asset. This requires the systematic collection and comparison of information concerning salaries and other lawful income, tax records, asset and interest declarations, bank transactions, property acquisitions, business activities, loans, inheritances, gifts, expenditures and transfers of assets to or from third parties. Where appropriate and legally permissible, the investigation should also examine financial relationships involving close associates or legal entities that may have been used to hold or manage assets on behalf of the person under investigation.

A comprehensive financial reconstruction is particularly important because the formal ownership of an asset does not necessarily provide a complete picture of its actual economic control or benefit. Assets may be registered in the name of another individual or a legal entity while the public official may effectively control, use or benefit from them. However, such circumstances must be established through objective and admissible evidence rather than inferred solely from personal, family or professional relationships. The purpose of the financial investigation is therefore to identify the factual economic reality underlying the apparent ownership structure.

This methodology also reduces the risk of drawing premature conclusions from isolated financial discrepancies. An asset whose acquisition initially appears inconsistent with the person's declared income may have a legitimate explanation when the broader financial history is examined. For example, the acquisition may have been financed through previously accumulated savings, a lawful loan, inheritance, a legitimate gift or another verifiable source of funds. Conversely, a pattern of unexplained acquisitions, substantial expenditures, transfers to third parties and financial resources inconsistent with lawful income may, when considered cumulatively and supported by independent evidence, provide a significantly stronger basis for concluding that the statutory requirements of illicit enrichment have been satisfied.

Financial reconstruction therefore serves both an investigative and a procedural function. From an investigative perspective, it allows the competent authorities to identify relevant assets, financial flows and potential sources of unlawful enrichment. From a procedural perspective, it provides a more objective evidentiary basis for determining criminal liability and reduces reliance on assumptions or isolated circumstances. The overall financial picture can consequently assist courts in distinguishing between legitimate wealth and wealth for which no credible lawful explanation exists.

For this reason, effective prosecution of illicit enrichment should be based on a structured and multidisciplinary financial-investigation methodology. Prosecutors and investigators should be capable of analysing complex financial information and of cooperating, within the limits established by law, with tax authorities, financial-intelligence bodies, integrity institutions, property-registration authorities, banking institutions and forensic experts. The quality of such cooperation may be decisive in establishing the chronology and origin of assets and in determining whether the financial discrepancy identified by the authorities has genuine criminal-law significance.

Ultimately, the investigation of illicit enrichment should focus not merely on the question of which individual assets cannot immediately be explained, but on the broader question of how the accused's wealth developed over time and whether that development is compatible with his

or her lawful financial resources. A systematic reconstruction of the financial history provides a stronger foundation for criminal proceedings, enhances the reliability of judicial assessment and contributes to an appropriate balance between effective corruption control and the protection of the accused's fundamental procedural rights.

1.6.DISCUSSION AND LEGISLATIVE PERSPECTIVES FOR THE REPUBLIC OF MOLDOVA

The comparative analysis of the criminalisation and investigation of illicit enrichment demonstrates that the principal challenge facing the Republic of Moldova is not merely the existence of a criminal-law provision addressing unexplained wealth, but the need to ensure that such a provision operates simultaneously as an effective anti-corruption instrument, a sufficiently precise legal norm and a mechanism fully compatible with fundamental rights and procedural guarantees. The effectiveness of Article 330² of the Criminal Code of Republic of Moldova (2002) must therefore be assessed from a multidimensional perspective, taking into consideration legislative clarity, the requirements of criminal-law legality, evidentiary standards, institutional capacity, judicial practice and the protection of the presumption of innocence.

First, the legislative clarification of the notion of "*substantial excess"* constitutes an important development in the Moldovan regulatory framework. One of the persistent difficulties associated with the application of Article 330² of Criminal Law of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) has concerned the determination of when the difference between a public official's legitimate financial resources and his or her assets may be considered sufficiently significant to justify criminal liability. The absence of sufficiently clear quantitative or qualitative criteria may generate divergent interpretations and may affect the predictability of criminal law. In this context, the introduction of Article 126² into the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) following the adoption of Law No. 136/2024 (Parliament of Republic of Moldova, 2024) represents a significant legislative development. By establishing a more concrete framework for identifying substantial excess, the legislator sought to reduce interpretative uncertainty and to create a clearer connection between the economic circumstances of the person concerned and the criminal-law threshold required for liability (Virlan, 2025).

Nevertheless, legislative clarification should not be regarded as eliminating all interpretative difficulties. The concept of substantial excess must continue to be applied in conjunction with the other constituent elements of the offence. A purely mathematical discrepancy between income and assets should not automatically result in criminal liability. The authorities must establish the circumstances in which the assets were acquired, the lawful sources of income, the chronology of acquisition, possible third-party ownership arrangements, family-related financial transactions and other relevant circumstances. Consequently, the quantitative criterion should function as an evidentiary threshold rather than as an automatic presumption of criminal conduct.

Second, the relationship between illicit enrichment and other criminal offences requires a particularly clear legal and doctrinal delimitation. Illicit enrichment may coexist factually with offences such as corruption, abuse of office, embezzlement, bribery, fraud, money laundering or other offences generating unlawful financial benefits. However, the existence of unexplained wealth should not lead to the automatic duplication of criminal liability for the same factual conduct. The principles of legality and non bis in idem require the criminal justice system to distinguish carefully between the underlying or predicate criminal conduct, the acquisition or transformation of criminal proceeds, their concealment or laundering, and the subsequent possession of assets whose lawful origin cannot reasonably be established.

This distinction is particularly important because illicit enrichment is conceptually different from traditional corruption offences. In cases involving bribery or embezzlement, the prosecution normally seeks to demonstrate a specific prohibited act and its constituent elements. By contrast, illicit enrichment focuses primarily on the significant discrepancy between the person's lawful financial resources and the assets actually possessed. Consequently, the mere existence of substantial unexplained wealth should not be transformed into an assumption that a particular predicate offence has necessarily been committed. At the same time, where the investigation establishes evidence of a separate corruption offence, the authorities must ensure that the respective offences are correctly qualified and that the same factual circumstances are not unlawfully counted twice for the purpose of imposing criminal liability.

Third, the effectiveness of Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) depends substantially on the quality and specialization of investigative practice. Illicit-enrichment investigations are inherently complex because they rarely depend upon a single document or a single item of evidence. Establishing the actual financial position of a public official requires the reconstruction of financial transactions, property acquisitions, expenditures, transfers, corporate relationships and, where legally relevant, assets formally registered in the names of third parties. For this reason, prosecutors and investigators must possess sufficient knowledge not only of criminal law and criminal procedure but also of financial analysis, accounting, taxation, property registration and mechanisms of asset concealment.

An effective institutional framework should therefore facilitate cooperation among prosecutors, criminal investigators, integrity authorities, tax authorities, financial-intelligence institutions, cadastral and property-registration bodies, banking institutions and other competent public authorities. Such cooperation is particularly important where assets are dispersed across different legal or economic structures. The investigation of illicit enrichment should consequently be understood as a multidisciplinary process in which criminal-law expertise is complemented by financial, accounting and forensic expertise.

Fourth, the evidentiary model should rely on multiple independent and mutually corroborating sources of information. A discrepancy between declared income and the value of assets should not ordinarily be established on the basis of a single declaration or isolated financial document. A reliable assessment requires the systematic comparison of different categories of information, including official declarations of assets and interests, tax records, banking information obtained in accordance with the law, property and cadastral registers, vehicle-registration databases, corporate records, inheritance documents, loan agreements, information concerning expenditures and other legally obtained evidence.

The importance of a multidimensional evidentiary approach derives from the fact that wealth can be structured in ways that obscure its actual ownership or economic benefit. Assets may, for example, be registered in the names of relatives, associates or legal entities while being effectively controlled or used by the public official under investigation. Accordingly, investigators should distinguish between formal ownership and the factual economic relationship of the person with the relevant assets. At the same time, any inference concerning beneficial ownership must be supported by admissible evidence rather than by assumptions based solely on family or professional relationships.

Such an approach also contributes to the protection of the accused's procedural rights. The stronger the evidentiary foundation established by the prosecution, the less likely it is that criminal liability will depend upon speculative assumptions or an excessive transfer of the evidentiary burden to the accused. The objective should therefore be to reconstruct the financial

reality of the person concerned through independent sources of evidence rather than to require the accused to prove his or her innocence.

Fifth, legislative and judicial policy should avoid an absolute reversal of the burden of proof. The effectiveness of illicit-enrichment legislation cannot justify abandoning the fundamental principle according to which the prosecution must establish the constituent elements of a criminal offence. The fact that illicit enrichment is based on a substantial discrepancy between assets and lawful income does not, by itself, permit the State to impose an unrestricted obligation upon the accused to prove the legality of all property.

A balanced evidentiary model should therefore preserve the prosecution's responsibility to establish the objective elements of the offence, including the existence of the relevant assets, their substantial excess in relation to lawful means and the circumstances demonstrating that such assets could not reasonably have been acquired lawfully. Once a sufficiently strong factual basis has been established, however, the accused should have the procedural opportunity to provide explanations and evidence concerning the lawful origin of the assets. Such explanations may concern loans, gifts, inheritances, legitimate business activities, family resources, previously accumulated savings or other lawful sources.

This model is preferable to an absolute reversal of the burden of proof because it maintains a distinction between the State's obligation to prove criminal liability and the accused's right to challenge the evidentiary case presented against him or her. The accused's ability to explain the origin of assets should therefore be understood as a procedural opportunity to rebut the prosecution's factual case rather than as an independent obligation to prove innocence.

Sixth, judicial interpretation will play a decisive role in ensuring consistency in the application of Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002). Even when legislation establishes quantitative thresholds and more precise definitions, practical difficulties may continue to arise in determining what constitutes possession, how assets held through third parties should be treated, how family income and expenditures should be assessed, and what degree of evidentiary certainty is required before a court may conclude that assets could not have been acquired lawfully.

Consistent judicial practice is therefore essential for transforming statutory provisions into predictable legal standards. Courts should develop criteria concerning the assessment of financial discrepancies, the evidentiary value of asset declarations, the treatment of third-party assets, the relevance of unexplained expenditures and the distinction between legitimate financial uncertainty and evidence of criminal enrichment. Such jurisprudential clarification would contribute not only to the effectiveness of anti-corruption policy but also to the principle of legal certainty.

Seventh, the effectiveness of illicit-enrichment legislation should be evaluated according to qualitative rather than exclusively quantitative indicators. The number of criminal investigations initiated or indictments submitted to courts cannot, by itself, demonstrate the effectiveness of Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002). An anti-corruption mechanism may generate a large number of investigations while producing limited results if investigations are poorly substantiated, proceedings are discontinued, courts adopt inconsistent interpretations or assets cannot ultimately be recovered.

A more comprehensive evaluation should therefore consider the quality and duration of investigations, the reliability of financial evidence, the consistency of judicial decisions, the proportion of cases resulting in final convictions where legally justified, the effectiveness of confiscation and asset-recovery mechanisms, the protection of procedural rights and the development of coherent judicial standards. The ultimate objective should not be to maximize

the number of prosecutions but to establish a system capable of identifying genuinely illicit enrichment while preventing arbitrary or disproportionate criminal intervention.

From this perspective, Republic of Moldova's future criminal policy should pursue a balance between effectiveness, legality and fundamental rights. The criminalisation of illicit enrichment can represent an important component of the national anti-corruption framework, particularly where traditional investigations encounter difficulties in establishing a direct connection between a specific act of corruption and the assets ultimately accumulated by a public official. However, the legitimacy of this mechanism depends upon the existence of clear statutory criteria, reliable financial investigations, competent institutions, admissible and corroborated evidence, consistent judicial interpretation and full respect for the presumption of innocence.

Consequently, the comparative experience demonstrates that the development of Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) should not be limited to further increasing criminal sanctions. A sustainable approach requires simultaneous improvement of the legislative framework, investigative methodology, interinstitutional cooperation, financial-forensic expertise, judicial practice and mechanisms for the recovery of illicitly acquired assets. Only such an integrated approach can ensure that the criminalisation of illicit enrichment functions as a genuine instrument for protecting public integrity rather than as a mechanism based primarily on presumptions or insufficiently substantiated financial discrepancies.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The criminalisation of illicit enrichment has emerged as an increasingly significant instrument within contemporary anti-corruption policy and criminal justice. Its particular relevance derives from its capacity to address forms of unexplained accumulation of wealth that may remain difficult to prosecute through conventional corruption offences. In practice, a public official may possess or control assets whose value is manifestly disproportionate to his or her lawful income, while the authorities may encounter considerable difficulties in establishing the precise corrupt transaction, person involved, method of transfer or specific predicate offence through which those assets were acquired. Illicit-enrichment provisions seek to respond to precisely this evidentiary and investigative challenge by focusing attention on the objectively identifiable discrepancy between lawful financial resources and accumulated wealth.

In the Republic of Moldova, the incorporation of illicit enrichment into the Criminal Code through Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) represents an important stage in the development of the national legal framework for preventing and combating corruption. The provision reflects the recognition that conventional criminal-law mechanisms may not always be sufficient to address complex forms of unexplained wealth accumulated by persons exercising public functions. At the same time, the application of Article 330² of Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) generated substantial doctrinal and practical debate concerning the requirements of legal certainty and foreseeability, the interpretation of substantial excess, the methods through which the lawful or unlawful origin of assets should be established, the allocation of the evidentiary burden and the compatibility of the offence with the presumption of innocence and other fair-trial guarantees.

An important legislative development in this area resulted from Law No. 136/2024 (Parliament of Republic of Moldova, 2024) and the introduction of Article 126² into the General Part of the Criminal Code of Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002). The legislative intervention may be regarded as a response to earlier concerns regarding the insufficient precision of the concept of “substantial excess” and the difficulties encountered in its practical application. By establishing a more structured legal framework for determining

substantial excess, the legislator has sought to increase the predictability of criminal liability and to provide judicial authorities with more concrete criteria for assessing the financial discrepancy relevant to illicit enrichment (Virlan, 2025). Nevertheless, legislative clarification should be accompanied by consistent judicial interpretation and appropriate investigative methodologies. A numerical or financial discrepancy, considered in isolation, should not automatically be equated with proof of criminal conduct. Its evidentiary significance must be assessed together with the circumstances of acquisition, the person's legitimate sources of income, the chronology of transactions, expenditure patterns, property ownership and other relevant circumstances.

The comparative analysis further demonstrates that the effectiveness of illicit-enrichment legislation cannot be determined solely by the existence of a criminal-law provision or by the severity of the applicable sanctions. International experience indicates that successful implementation depends upon the interaction between substantive criminal law, institutional capacity, investigative expertise and procedural safeguards. The experience of Hong Kong, for example, illustrates the importance of institutional independence, specialised anti-corruption structures and an integrated approach to investigating unexplained wealth. The effectiveness of the legal framework is therefore closely connected to the ability of specialised institutions to collect, analyse and corroborate complex financial information.

The experience of Argentina likewise demonstrates the importance of objective and independently verifiable financial evidence in proceedings concerning illicit enrichment. Asset declarations, banking information, tax documentation, property records, corporate information and expenditure analysis may provide a comprehensive basis for reconstructing the financial position of a public official. Such an evidentiary approach is particularly relevant for the Republic of Moldova, where investigations into illicit enrichment may require the cooperation of several institutions possessing different categories of financial, fiscal, property and integrity-related information.

At the same time, comparative practice demonstrates the importance of maintaining an appropriate distinction between the prosecution's evidentiary obligations and the accused's opportunity to explain the origin of his or her assets. The prosecution should first establish, through admissible and sufficiently reliable evidence, the existence of the relevant assets and the substantial discrepancy between those assets and the person's lawful financial resources. Only after such an objective factual basis has been established should the accused be given a meaningful procedural opportunity to provide explanations or evidence concerning the lawful origin of the property. This approach is preferable to an automatic or unrestricted reversal of the burden of proof because it preserves the fundamental principle that criminal liability must be established by the competent authorities and prevents the presumption of innocence from being transformed into an obligation upon the accused to prove his or her innocence.

The issue is particularly important because illicit enrichment operates at the intersection of two competing but equally legitimate legal interests. On the one hand, the State has a positive obligation to protect public institutions, public resources and society as a whole against corruption and the abuse of public office. Unexplained accumulation of wealth by public officials may undermine public confidence in state institutions, distort the integrity of public administration and create incentives for further corrupt practices. On the other hand, the individual subject to criminal proceedings remains entitled to the fundamental guarantees established by constitutional and international human-rights standards, including legality, foreseeability, the presumption of innocence, the right to a fair trial and protection against arbitrary criminal prosecution.

The legitimacy of illicit-enrichment legislation therefore depends upon maintaining an appropriate balance between these two dimensions. Criminal law must be sufficiently effective to enable competent authorities to investigate and prosecute genuinely unexplained and unlawfully acquired wealth, but it must also be sufficiently precise to allow individuals to foresee the circumstances in which criminal liability may arise. Similarly, investigative authorities must have effective mechanisms for tracing assets and reconstructing financial flows, while courts must ensure that conclusions regarding the unlawful origin of property are based on reliable, admissible and sufficiently corroborated evidence.

For the Republic of Moldova, the further development of the legal framework should consequently proceed along several complementary directions. First, legislative provisions concerning substantial excess and the constituent elements of illicit enrichment should remain clear, coherent and predictable. Second, specialised investigative methodologies should be developed for the identification, tracing and analysis of unexplained assets. Third, institutional cooperation between prosecutors, investigators, integrity authorities, tax authorities, financial-intelligence structures, property-registration bodies and other competent institutions should be strengthened. Fourth, judicial practice should progressively establish consistent criteria for evaluating financial discrepancies, third-party ownership arrangements, lawful sources of wealth and evidentiary explanations provided by defendants.

Finally, the effectiveness of the criminalisation of illicit enrichment should be measured not simply by the number of investigations initiated, indictments issued or convictions obtained. A more comprehensive assessment should take into account the quality of investigations, the reliability of financial evidence, the consistency of judicial reasoning, the protection of procedural guarantees and the actual recovery of unlawfully acquired assets. Asset recovery is particularly important because the ultimate objective of anti-corruption policy is not merely to impose criminal punishment, but also to prevent individuals from retaining economic benefits derived from unlawful conduct.

In conclusion, Article 330² of the Criminal Code of the Republic of Moldova (Parliament of the Republic of Moldova, 2002) constitutes an important component of the national legal response to corruption and unexplained accumulation of wealth. However, its long-term effectiveness and legitimacy will depend upon the ability of the Moldovan legal system to reconcile effective detection and prosecution of illicit enrichment with the principles of legality, proportionality, foreseeability and presumption of innocence. The continuing development of this balance through legislative refinement, specialised investigative procedures, interinstitutional cooperation, consistent judicial interpretation and effective asset recovery represents a necessary condition for ensuring that illicit-enrichment legislation functions both as an effective anti-corruption mechanism and as a criminal-law instrument compatible with the fundamental guarantees of the rule of law.

REFERENCES

Africa Union. (2003). African Union Convention on Preventing and Combating Corruption [online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://au.int/sites/default/files/treaties/36382-treaty-0028_-_african_union_convention_on_preventing_and_combating_corruption_e.pdf

Brinza, S., Stati, V. (2015). *Tratat de drept penal. Partea Specială*, Vol. II, Chisinau.

Constitutional Court of the Republic of Moldova. (2022).Textul Briefing-ului susținut de Președintele Curții Constituționale, Domnica Manole, pe 25 noiembrie 2022 (îmbogățirea ilicită) [online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://constcourt.md/libview.php?id=2506&idc=7&l=ro&t=%2FMedia%2FNoutati%2FText

ul-Briefing-ului-sustinut-de-Preedintele-Curtii-Constitutionale-Domnica-Manole-pe-25-noiembrie-2022-imbogatirea-ilicita%2F&utm_source
Esanu, A. (2021). Îmbogățirea ilicită (art. 3302 CP RM): impedimente de tragere la răspundere penală. *Revista Institutului Național de Justiție*, Vol. 14, no. 2, 12-18.
Grama, M., Botnaru, S., Savga, A., Grosu, V. (2012). *Drept Penal. Partea Generală,* Vol. I, Chisinau: USM.
Muzila, L., Morales, M., Mathias, M., Berger, T. (2012). *On the Take Criminalizing Illicit Enrichment to Fight Corruption*, Washington DC: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
OAS.(1996).Inter-american Covention against corruption online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available:https://www.oas.org/en/sla/dil/inter_american_treaties_B-58_against_Corruption_signatories.asp
Parliament of the Republic of Moldova. (2002). Criminal Code of the Republic of Moldova[online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=153355&lang=ro
Parliament of the Republic of Moldova. (2024). Law No. 136/2024 [online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=144646&lang=ro
Parliament of the Republic of Moldova. (2013). Law No. 326/2013[online] [Accessed on the date 10.09.2026].Available: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=21894&lang=ro
Pico, J., M., K., B., U. (2006). Cámara Nacional de Casación Penal (National Chamber of Criminal Appeals). *Journal of Crime, Law and Social Change*, Netherlands: Springer, Vol. 45, no. 1.
Prevention of Bribery Ordinance. (2026). [online] [Accessed on the date 13.09.2026].Available: https://www.elegislation.gov.hk/hk/cap201
Renita, G. (2020). Latura obiectivă a infracțiunilor prevăzute la art.3302 Cod penal – îmbogățirea ilicită: dificultăți de interpretare. [online] [Accessed on the date 13.09.2026].Available: https://juridicemoldova.md/articol/latura-obiectiva-a-infractiunilor-prevazute-la-art-3302-cod-penal-imbogatirea-ilicita-dificultati-de-interpretare/
United Nations. (2004). United Nations Convention against Corruption [online] [Accessed on the date13.09.2026].Available:https://www.unodc.org/documents/brussels/UN_Convention_Against_Corruption.pdf
Virlan, P. (2023). The immaterial object of illicit enrichment according to art. 330 Criminal Code of Republic of Moldova. *Cross-border Research – Interdisciplinary Insights and Bordless Perspectives*, 337-357.
Virlan, P. (2025). Novațiile Codului Penal prin prisma Legii nr. 136 din 06.06.2024 a infracțiunii de „îmbogățire ilicită". Analiza comparativă. *Studia Universitatis Moldaviae. Revista Științifică a Universității de Stat*, 3 (183),174-178.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AGRICULTURAL DEVELOPMENT STRATEGIES IN NIGERIA: A SOCIO-SPARTIAL APPRAISAL

OLUDIPE B B
ODULATE L.O
OPEIFA D

ARSTRACT: Farming in the third World countries. notably those in the humid tropics where European occupation did not interfere with traditional systems of agriculture, is often perceived by the Western World as primitive or subsistence. Nigeria is one of those countries, for this reason iif nothing else, agricultural development has been embarked upon in order to effect a change from primitiveness to Modernity and from subsistence to commercialization. Forces perhaps stronger than primitiveness and subsistence have motivated the development of agriculture in the country and a number of strategies has been adopted in this regard. It is the aim of this work to examine some of these strategies and analyze their effectiveness and impact.
Keywords; Development, Strategies, Agriculture, Nigeria

INTRODUCTION

Agricultural development which is the oldest profession in the world, remain the basic of life and traditional occupation of Nigerians, Agriculture employs about 60 percent of the labour force in Nigeria while not less than 65 percent of the country population still lives in the rural area [Idochaba ,1994], The Nigeria economy is so bad today that every Nigeria needs to find alternative sources of meeting needs, various sub-sectors of agricultural production such as crop, livestock and fishery enterprises form a few of numerous areas that Nigerian can look into to meet the increasing needs of families. The sector can therefore be seen as the engine of economic growth and social development.

The purpose of agricultural development in Nigeria has changed with evolving economic and social conditions in the country. During colonial rule, for instance, agricultural development focused on the intensification of tree crop production. This policy simply aimed at acquiring raw materials for British factories and generating some purchasing power to enable the peasants to buy the industrial products of these same factories. Emphasis was therefore placed on increasing output rather than improving peasant Production techniques which amounted to growth without development. Although much stress has been laid on agricultural export since colonial times. agricultural development in independent Nigeria has other objectives: (i) the improvement of peasant production technology through the use of quick maturing, high yielding and disease resistant, crop strains, fertilizers and biocides, (i) the creation ofjob opportunities for the rural population especially school leavers who cannot be absorbed by existing industrial establishments; (ii) to increase food supply for the exploding population particularly in urban centers and (iv) to provide raw materials for domestic agro-industries Which in turn will serve as an important stimulus to agriculture.

To achieve the above objectives, the Nigerian governments have employed a number of strategies such as tree crop development, farm settlement, model farms, farm input supply and distribution, large-scale food crop farming and irrigation agriculture. These strategies are briefly reviewed in order to highlight their roles in the development process, their regional significance and cost.

CONCEPTUAL CLARIFICATION.

Tree Crop Development: With the shift or responsibility fo r development from colonial administration to indigenous statesmen in 1954, large plantations of oil palm, rubber and cocoa sprang up in Southern Nigeria. Public Corporations such as' the Eastern Nigeria Development Corporation (ENDC), private companies like Pamol Ltd., and even regional Governments in partnership with foreign companies set up huge tree crop estates (Table 1). In Southern Nigeria as a whole, there were more than fifty plantations. The large proportion of land (52,82%) under Oil palm may be attributed to three main factors. Firstly, Nigeria remained the world leading producer of palm oil and kernels up till 1936 when the results of scientific production of palm produce in the far East became manifest. This became a threat to the Nigerian oi l palm industry and Provided a strong case for the Regional Governments to embark on palm plantation establishment (Okoji, 2019). Secondly, the indigenous government had a strong need for foreign exchange toback their equally strong desire for fast development. Aware of the revenue that accrued to the colonial government from agricultural export, government agencies like the END determined to boost government revenue through tree crop production. The great stride by the ENDC in terms of area cropped (28,7194 ha or 60.7%) was a clear recognition of agriculture as the most important earner of foreign capital. Thirdly, plantations created employment opportunities for thousands ,of peasants, Calarol oil palm estate alone had a total field labour force of 1,580 in 1966(Qkoj 2019),Tree crop development was not restricted to large scale-farms, it was also extended to small holders too, to rehabilitate their oil palm groves. In Cross River State: for example, 2191 farmers rehabilitated a total of 11,637.09 ha. Before the out breakofCivil disturbances in 1967 (Etudor, 1984), In 1975, the Federal Government resumed extensive tree crop rehabilitation in Cross River, Bendel, Imo and Ondo States

Table 1: Tree Crop Development in Cross River State, 1962-1966

CROP	LOCATION OF ESTATE	AREA (ha.)	DEVELOPMENT AGENT
Cocoa	Abia-Bendeghe	1457.6	ENDC
	Boje	888.4	”
	Ikom	1726.0	”
	Ikom Forest Reserve	32.0	”
	Biase	4719.2	”
	Boki	2160.0	Eastern, Nigeria Govt.
	Calabar District	2400.0	Unilever
Palm Oil	Calaro	6870.0	ENDC
	Kwa Falls	1813.2	”
	Nsadop	1709.2	”
	Biakpan	27220.0	”
	Calabar District	6000.0	Dunlop
Rubber	Calabar District	1440.0	Pamol
	Nko	2652.8	ENDC
	Oban	3620.0	En. Nig. Govt. &Kaula Lumpur Rubber Estate.

Source: Compiled from F.A. Co., Agricultural Development in Nigeria, 1965 - 1980.] The importance attached to tree crop production by the Federal Government is borne out by its generous capital allocations for both plantations and small holders. For the former, a total

ofN50.8m with the North, East, Mid-West and West sharing N7.6m, NI8.Im, NI0.6m andN14.5m respectively (Agboola, 2020). For the latter, Cross River State alone attracted N12.5m during the 1975-80 plan period (Etudor, 2020).

Farm Settlement : The Farm Settlement Programme was perhaps the most ambitious venture in the Nigerian agricultural development effort. It was multi-purposed and envisaged, among other things to: (i) transform traditional farming systems and educate peasant farmers on how to produce food and export crops through the application of modern agricultural methods; (ii) accelerate agricultural development since the settlers were to function as growth centers in the areas they were located; (iii) decongest some of the densely settled districts as well as induce young educated people and other jobless youths to take to farming and thereby check the rate of rural-Urban migration. Most of the farm settlements were located in southern Nigeria, similar to plantations. Where rainfall was below 1500mm a year, food crops were dominant as was the case at UzoUwani in Anambra State and Ilaro in Oyo State. Generally, the programme emphasized on tree crops for which government had the expertise, and on which the Western Region invested N12.8m.

Model Farms: Different from the plantations and farm settlements in crop type and management were model farms. They came into existence in 1970, after the Civil war, When large population in the Eastern States which had fled their settlements retuned and painfully found agricultural activities paralyzed. It was in an attempt to salvage the situation that the Eastern States created Seed Centers in order to raise planting materials for farmers. Commercial food production was also undertaken, adopting the 'Model Farm' concept, hence, the name. Specific areas deemed suitable for the scheme were selected initially, but after, political pressure influenced farm location. In Cross River State, for example, model farms were set up in all the political divisions with a capital outlay of over N6.7m. But since the majority of workers regarded the scheme as a welfare programme in addition to corrupt practices in marketing, only 8.68% of the total outlay wasrealized as revenue from the model farms in five consecutive years (Office of the Chief Agric. Officer, Calabar, 1977). Farm Input Supply And Distribution Scheme: Unlike the strategies considered above, this scheme was nation-wide. The package comprised, among other items, Credit, fertilizer and improved seeds, all directed to arrest the absence or inadequacy of essential requirements of agriculture. The three major components of this package are discussed to show their significance, supply organization and the capital expenditure on them. Farm Credit: The importance of Credit, particularly for peasant farmers whose Levels of income are generally low but who possess tremendous production potential, cannot be overstressed. Farmers require credit to pay for inputs and services, especially now that family labour has been drastically reduced by the increasing trend of monogamy, the number of children at school and rural-urban migration. To those who still believe in abundant family labour in the developing countries, the above statement may sound incredible. But it is true. In a recent survey conducted by the author in parts of Cross River State, 302 farmers had a total of 1,607 children. Of these, 75.4% were in educational institutions and 5.1% in the working class. Over 54% of the farmers had one wife each, 26.1% had two each, and 19.3% more than two each. Peasant farmers therefore, depend largely on hired labour hence, their strong need for credit. In recognition of this need, the Federal Government has encouraged farmers to gain access to bank facilities through: (i) the 1972 Federal Government Monetary Policy which gave birth to the Central Bank of Nigeria (CBN) Credit Guidelines on Sectorial Allocation of Bank Loans. Under these guidelines, commercial banks were instructed by the CBN to allocate 40% of their total loans to all sectors of the economy to agriculture;) the establishment in 1973 of the Nigerian Agricultural and Co-operative Bank (NACB)

to make funds available to farmers; and (ii) the 1977 Agricultural Credit Guarantee Scheme by which the Federal Government guarantees banks loans so as to protect the bank's interest especially with regard to possible bad debts.

To make these policies functional, the Federal Government made considerable capital available to the NACB. Between 1977 and 1980, for instance, a total of N135.65m was allocated to this bank for agricultural loans; and to reach the farmers, many State Governments have set up agricultural credit units with area offices in the various Local Government Areas. Fertilizer: With available Credit, soil nutrient status can be improved by using fertilizer. Traditionally, however, soil fertility is maintained through long periods off allow. Recently, fallow periods have declined owing to population pressure. In some areas, such as Southern Ogun State, the longest period is four years on the average. In very densely peopled parts of Imo State, notably around Owerri, two-year fallows are common while annual cropping is widespread. Cropping frequencies of this type tell on soil fertility. A generous use offertilizer is therefore essential ifthe full advantage of improved planting materials and cultural practices must be realized and a rapid increase in crop production achieved. Consequently, the national consumption offertilizer rose from s0,000tonnes in 1976/77 representing about 1.6kgs./ha. to 573.391 tonnes in 1980/ 8l equivalent to 12kgs./ha. (Oyaide, 2018), However, the spatial distribution, in terms of States, shows regional in balance. About 80% ofthe total consumption of fertilizer is by nine States while the remaining ten States take only 20% (Singh, 2019)

Improved Seeds: No matter thequantity of fertilizer and the management techniques applied, poor quality seeds can never compete with improved varieties. For realistic agricultural progresstherefore, farmers must be adequately supplied with the right varieties of seeds. In full realization of this fact, the multiplication of improved seeds became an important component ofthe agricultural input scheme to which N6.45m was allocated during the l1975-80 plan period. Although seed multiplication is the function of the State Government, backed by the Federal Department of Agriculture, it is by no means a preserve of State-run farms. Seeds produced and sale are undertaken by State Ministry of Agriculture staff. Mechanized Large-Scale Farms and Irrigation: Mechanized farming started in Nigeria in response to a number of factors. They include greater achievement per unit labour time, the use of human energy which makes farming full of drudgery. increased food production and the belief by successive governments (Military and Civilian) that mechanization is a symbol of development. Mechanized agriculture requires large holdings; the small parcels of scattered peasant holdings are fundamentally a set back. On this account and for reasons already advanced, the Federal Government initiated Expensive programme for large scale mechanized food farms. Such programme included the National Grains Production Company, the National Root Crops Production Company and the River Basin and Rural Development Authorities. The Companies are now defunct but the Basin Authorities have ecological zones of the country (Fig. 1). The Hadeija-Jamaere River Basin and Rural Development Authority, for example, is currently engaged in a 15,200 ha. Irrigation project in Kano State for the production of Wheat, rice and vegetable (Agboola, 2020, p. 190). The above schemes provide some of the major efforts of Nigerian Government to develop agriculture. Each scheme has drawn not only on the scarce funds available for development but also on the scarce personnel to plan and implement it. Substantial farmland which was not used and which eventually reverted to the owners or other agencies because of bureaucratic inefficiency and corruption. While the projects chosen might have been of high priority in their own right, the mutual support of schemes was not apparent, so that together, they seemed to lack that integrated structure necessary for progressive agricultural development. The next section attempts to analyze the impact

of the scheme. Although agricultural development in Nigeria has a number of objectives, two major areas are considered in the following analysis, namely: export earnings and food production. Export Earnings: Despite the increasing emphasis on agriculture in successive development plans and the expectation that agriculture would yield considerable export earnings in response, available data reveal the contrary. In 1960, agricultural export accounted for over 90% of Nigeria's foreign earnings. A decade later, it contributed only 48% of the GDP. In 1981, agriculture earned just 23% of the country's GDP (Adejugbe, 2021). The fall was steep. Some important crops even went out of the export market before 1981. A few of them may be used to illustrate the drastic decline. During the 1950s, Nigeria was responsible for about 33% of the world's total exports of palm oil but between 1961 and 1970, its export of palm oil dropped at an annual rate of 27.2% sol that by 1972, Nigeria that was once the largest producer and exporter of palm oil became a net imported (Udo, 2019,). The depressing situation was equally true of cocoa. Its export declined at an annual rate of0.7% during 1961-70, bring in Nigeria's share of world export of cocoa from 14% in 1953 to about 9% in 1970 (Ebong, 2020). Similar trends occurred in the export of cotton and groundnuts; the groundnut pyramids which were tourists' attraction in Kano during the 1960s disappeared from the ancient city before 1980. It will be recalled that, the production of export crops has been a major concern of Nigeria since colonial times; why then has the response been as uninspiring as the above figures shows? Since the bulk of export crops are produced by peasants, usually mixed with food crops, the reasons for food crops. On this account, it seems more expedient to analyze them together. However, such factors as the unconducive pricing policies of the Marketing Boards, aging and senility of tree crops, sub-optimal replacement or replanting system for perennial crops and competition from other crops, are peculiar to tree crops. Food Production: As a result of policies aimed at increasing agricultural production and persuading farmers to grow more food crops, more land was brought under Cultivation between 1960 and 1971. The average output per ha. also raised up response, particularly on land under cereal crops (Table 2). But from 1971, both the total area under the major crops and actual production declined. Cassava, for example, occupies 399m ha. in 1971-72 and 181m ha. in 1978-79, and yielded 4.5 16m. tonnes and 1.62Im. tonnes in the respective years This is equivalent to a decline of 54.6% in area planted and 64.19% in total output.

Table 2: Annual Average Areas and Yields of Major Food Crops in Nigeria. 1960-1971.

CROP	**Area (m.ha)**		**Yield (kg/ha.)**	
	1960-62	**1969-71**	**1960-62**	**1969-71**
Yam	1.326	|1.188	9703.62	10098.49
Cassava	0.800	0.959	9025.55	6525.06
Maize	1.271	1.425	830,06	1000.00
Rice	0.167	|0.255	1089,82	1164.71
Millet	4.385	4.897	587.46	603.84
Sorghum	4.667	|5.658	852.58	714.21

Source: Olayide, S. 0., Economic Survey of Nigeria, 1960-75.

Maize covered 1.197m ha. And 63m ha. in 1971-72 and 1978-80 respectively, producing 1.274m. tonnes and .659m. tonnes during each respective period. This represented a decline of 47.3% in area cultivated and 48.3% in total production (Are, 2020). In terms of growth of food production per capita, the rate which stood at 0.2% in the 1960s began to fall in the 1970s and eventually dropped at a yearly rate of 1.6% between 1980-84. Consequently, Nigeria's food imports rose from N28.39m in 1968 to N227.86 in 1975 and reached a staggering N1.5 billion

in 1980 (Are, 1986). One question now becomes pertinent. What brought about the general deficiency in crop production despite the policies adoptaed?

Risks and uncertainties Reduction ; Stabilization of producer prices farmers uncertainty about expected prices and thus encourages the farmers to produce more and adopt new technology for increased profit. According to Ojo [1991], improved agricultural prices have enhanced agricultural exports and likewise encourage farmers to produce more.. Traditional agriculture is valuable to pests, diseases and climate change s. This has made farmers to suffer losses, crop failure and bankruptcy, hence discouraged to invest more in agriculture..if government could insure past yields. This shift the major risk in agricultural production from the farmers to the government. Crop insurance will ensure;

a] Adequate and reliable food supplies
b] Fair and reasonable producer income
c] Export of agricultural goods and
d] Adoption of appropriate technology
e] Development of the agricultural sector.

Good and Stable Agricultural Policy; Government of Nigeria should provide the right incentives through government policy reforms. This will help to overcome the weakness in the agricultural sector of the economy. Proper formulated agricultural policy, encourages foreign exchange earning, provision of adequate food, provision of raw materials for the country agro-allied industries, impact substitution, employment opportunities in the agricultural sector, and consequently rapid development of the agricultural sector within economy.

CAUSES OF FAILURE OF THE SCHEMES

A number of factors contributed to the failure of the schemes. Among the key factors are industrialization, shortage of skilled labour, the oil boom and the way the schemes were executed. Like most developing countries where colonial policies served to inhibit industrialization, Nigeria placed initial emphasis on industrialization rather than on agriculture. This originated from the different arguments in favor of the former. Industrialization was seen as an indicator of less dependence on foreign manufactures which was conceived as a symbol of political independence, a cure for poverty and a way of generating higher living standards. It was further argued that, dependence on a limited range of primary exports created uncertainties regarding export earnings, an arguments strengthened by rising prices for manufactured imports, which has not been parallel by rises in primary export prices (Dickenson, 2020). Although Nigeria is richly endowed with resources, their exploitation for industrial purposes has been limited by infrastructural deficiencies, shortage of skilled manpower, physical and financial capital, and above all by limited market based on the general low level of income. Nonetheless, within a general equilibrium context, the level of discrimination against agriculture seems to be increasing. Thousands of school leavers and University graduates turned out yearly without job prospects still believe that, industrialization alone can solve the increasing unemployment in Nigeria. While the rate of unemployment is rising in the country, there is acute scarcity of agricultural labour for reasons given earlier. Besides, the oil boom brought a noticeable growth in the construction industry (after the civil war) which offered higher wages than agriculture and effectively withdrew a great deal of energetic labour from the farm. Consequently, agriculture has been abandoned for the largely illiterate elderly people who are less receptive to new ideas. The attitude of young people towards agriculture probably derived from an equally unimaginative view of the Federal

Government on agriculture during the oil boom. During this period, foreign reserves rose from USS5203 million in 1976, while oil exports alone earned N7969.2 million in 1977 (Onimode, 1983). These huge foreign reserves and colossal foreign earnings led the country to tum its back on agriculture and spend more on imported food items which sold relatively cheaper than similar locally produced items. Thus, the oil boom depressed agricultural prices, made it difficult for farmers to increase production and hard for the country to export but, easy to import. All these exacerbated Agriculture's decline. In addition to these socio-political underpinnings, was the implementation of the schemes themselves for example, although the Federal Government had designed policies to ease farmers access to bank loans, the execution of the policies created problems. Commercial banks were reluctant to grant facilities to small-holders except they met the stringent requirements prescribed. These include certificate of occupancy for the proposed farmland, acceptable collateral security and feasibility study of the enterprise. Most peasant farmers could not meet these requirements and so failed to qualify for bank loans. Unlike the Credit schemes, several farmers benefited from improved seed and fertilizer supply. But these beneficiaries represented a negligible proportion of the farming population. The great majority of farmers were not reached because the Supply centers were few and far apart. With reference to large-scale mechanized farms. e author's experience with the ‘National Root Crops Production Company reveals that, national Food Production Establishments are unable to operate on economic basis. Their overheads are usually so high that, they cannot compete with peasant producers. Besides, expertise and experience in large-scale commercial production in governments is limited and the system of government financing and provision of supplies do not fit into commercial enterprises. On the other hand, it is consoling that irrigation projects in Northern Nigeria are making a positive impact. Butitmust be noted that, the functionality Of irrigation schemes in West Africa hinges primarily on adequate annual rainfall. The Niger and Benue rivers which support many irrigation schemes derive their waters from the tropical rains of Futa Djallon and Cameroon respectively. The maintenance of their discharge to Nigeria depends to a great extent, on the size and number of irrigation schemes which the countries they flow through may embark upon in future.

CONCLUSION

From the above analysis, there is no doubt as to the negligible impact of Nigeria agricultural development policies. Nigeria had the resources with which to develop a viable agricultural economy but it misplaced its priorities. The financial benefits from its primary exports in the 1960s went more to industrialization than agricultural development, while those of petroleum oil in the 1970s were lavished on non-economic, prestigious ventures to the detriment of agriculture. To worsen it all, successive governments have proliferated agricultural programme. spending enormous amounts for insignificant achievements. Nigeria should learn from the United States (US), which Department of Agriculture has existed for decades with clearly defined agricultural policies guidelines and goals. The implementation of US policies goes uneven when governments change. In this direction, the US has been able to emerge as the greatest farming nation in the world. The results of Nigeria's agricultural development programme leaves credence to the view that government intervention in agriculture has been a waste of resources-Belo-Osagia, 2020). In other words, the initiation of any agricultural policy in the country, should not only bear the small-holders in mind but, incorporate their wealth of experience. Small-holders must be recognized as the major force behind the country's agricultural development and invariably, it is through them that agricultural policies can make the greatest possible impact. Recommendation 1 ,Setting up Agricultural Policy- Every government has agricultural policy that regulate the practice of agriculture in the nation. For instance, the regime of former president O lusegun Obasanjo in 2004 set up agricultural policies

banning importation and exportation of certain food products like the ban on the importation of wheat and frozen chickens,

2Provision of Agricultural Education – For instance, the government encourage the teaching of agricultural science in primary, secondary, tertiary and higher institution of learning, It equally award scholarships to students to study agriculture at the undergraduate and postgraduate levels . The Nigeria government has established research agencies like the National Cereal Research Institute, The Cocoa Research Institute of Nigeria. 3 Provision of Loan and Credit Facilities to Farmers – Such loan and credits facilities are sometimes given to the farmers without interest or with little interest, Government agencies responsible for the provision of such loans and credits facilities include Agricultural Bank, 4 Provision of Quarantine services Quaranntine service therefore ensure proper monitoring of agricultural product that are either imported into the country or exported out of the country. 5 Establishment of Government Farms –such farms are Agricultural Development Project of the each state which is an of the Ministry of Agriculture.s

REFERENCES

Adejube, B. (2021), Banking and Agricultural Development in Nigeria. Development Outlook, Vol. 1 No. 1.

Agboola, S. A. (2020), An Agricultural Atlas of Nigeria, O.U.P.

Are, L. (1986), Agricultural Policies and Development- 1960-85. Development Outlook, Vol. 1, No. 1.

Belo Osagie, T. (2020), Recent Development in Nigerian Industrialization, In Frausman, M. (ed). Industry and Accumulation in Africa, Heinemann, London.

Dickenson, J. P. (1978), Industrialization in the Third World, In Mountjoy A. B. (ed). The Third Macmillan Press, London.

Ebong, I. (1986), Agricultural Financing. Development Outlook, Vol. I, No. 1.

Etudor, E. J. (2020), Small-holder Oil Palm Development in Cross River State of Nigeria: Origin, Achievements and Problems. Paper Presented at WorkshopP on Agricultural Statistics, Federal Departmcnt of Agriculture.

Idachaba, F. S. (1981), Some Considerations on Agricultural Input Policies in the Fourth National Development Plan, In Idachaba, F. S. et al, (ed). The Crop Sub-Sector in the Fourth National Development Plan 1981-85, Federal Department of Agriculture.

Ojo, M. O. [1991] Agricultural and Structural Adjustment in the ECOWAS. Review of the Nigerian Experience. West Africa Journal Agriculture Vol . 6

Okoji, M. A. (2019), Plantation Agriculture in Eastem Region of Nigeria, Unpublished M. A. thesis submitted to the Victorial University of Manchester, England.

Olayide, S. 0. (1976), Economic Survey of Nigeria, 1960-75, Ibadan.

Onimods, B. (1983), Imperialism and Undevelopment in Nigeria, Macmillan.

Oyaide, O. E. J. (2018), Agricultural Input supply and Distribution Policy in the Fourth National Development Plan, In Idachaba, F. S. et al., op cit.

Singh, B. R. 20191), Some Observations on Input Supply and Distribution in the Fourth National Development Plan, In Idachaba F.S. et al., op cit.

Udo(2019), The Human Geography of Tropical Africa. Heinemann, Ibadan.

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

ON A NEW CLASS OF NEUTROSOPHIC NANO CLOSED SETS IN EUTROPHICATION NANO TOPOLOGICAL SPACES

K. MARUTHAMUTHU
Research Scholar, Department of Mathematics, Sri Meenakshi Government Arts College for Women, Madurai 625 005, India.
C. INBAM
Research Scholar, Department of Mathematics, Sri Meenakshi Government Arts College for Women, Madurai 625 005, India.
CHANDRASEKAR
Assistant Professor, Department of Mathematics, Sri Meenakshi Government Arts College for Women, Madurai 625 005, India.

Abstract
In this paper, we introduce and formalize the novel concept of the Neutrosophic Nano Closed Set within the framework of Neutrosophic Nano Topological Spaces (NNTS). Originating as a synthesis of Smarandaches neutrosophic logic and Lellis Thivagars nano topological space, NNTS provides a robust mathematical foundation for modeling multi-criteria uncertainty. We systematically investigate their algebraic and topological characteristics, demonstrating their behavior under core operations including the neutrosophic nano interior and closure operators.
Keywords: Neutrosophic Logic; Nano Topological Space; Rough Approximation; Neutrosophic Nano Closed Set (NNCS); Boundary Leakage; Multi-Criteria Decision-Making (MCDM); Parameter Stability Analysis; Digital Image Processing.

UNCONDITIONAL CASH TRANSFERS TO WOMEN BY STATES: IMPACT ON THE FISCAL HEALTH OF THE COUNTRY

BHUVI ARYA
BALLB (HONS.), SSOL, SHARDA UNIVERSITY , UP ,INDIA
MR. MOHIUDDIN SIDDIQUI
ASSISTANT PROFESSOR, SSOL, SHARDA UNIVERSITY, UP, INDIA

ABSTRACT

Unconditional cash transfers to women have become an important part of welfare policies in many Indian states. Under these schemes, eligible women receive a fixed amount of money directly in their bank accounts, providing them with financial support and a greater degree of independence. Several schemes, such as Ladli Bahen Yojana, Gruha Lakshmi and Majhi Ladki Bahen Yojana, have received significant public attention. While these initiatives can help women manage household expenses, improve financial decision-making and provide support during difficult economic situations, an important question arises: can state governments continue such large-scale schemes without putting excessive pressure on public finances?

This study examines both the social and fiscal aspects of these cash transfer programmes. The research follows a qualitative and descriptive methodology and is based primarily on secondary sources, including government reports, RBI publications, Finance Commission reports, Economic Surveys, books, research studies and other relevant published material. A comparative approach has also been used to examine selected state-level schemes and international experiences with cash transfers. The study finds that direct cash transfers can contribute to women's financial independence, poverty reduction and increased economic activity at the local level. At the same time, aggregate spending on unconditional cash transfer programmes, particularly for women, was estimated at approximately ₹1.7 lakh crore in FY 2025–26, showing the growing fiscal importance of such schemes. However, large-scale programmes may also increase government expenditure, fiscal deficits and public debt if introduced without proper financial planning. The paper argues that such transfers should not simply be labelled as either “freebies” or welfare measures. Their impact depends largely on their design, targeting and financing. The study concludes that welfare and fiscal discipline can work together through better targeting, improved revenue collection and regular assessment of the long-term financial impact of these schemes.

Keywords: Unconditional Cash Transfers (UCTs), Women Empowerment, Fiscal Health, Fiscal Deficit, State Welfare Schemes, Direct Benefit Transfer (DBT), Public Debt, Fiscal Sustainability, Social Welfare, India.

1. Introduction

Indian welfare policy has traditionally worked through subsidised goods and services: food through the Public Distribution System, fertiliser and power subsidies, and in-kind support such as school meals and cycles. Over the past decade, the spread of bank accounts under the Pradhan Mantri Jan Dhan Yojana, the Aadhaar identity system and mobile connectivity (the "JAM

trinity")[43] has made a different instrument feasible: direct money transfers, delivered through Direct Benefit Transfer (DBT) platforms at low administrative cost.

Since about 2021, state governments have increasingly used this instrument to reach women. West Bengal's Lakshmir Bhandar (2021), Tamil Nadu's Kalaignar Magalir Urimai Thogai (2023), Madhya Pradesh's Ladli Behna Yojana (2023), Karnataka's Gruha Lakshmi (2023), Maharashtra's Majhi Ladki Bahin Yojana (2024), Jharkhand's Maiyan Samman Yojana (2024), and comparable schemes in Odisha, Chhattisgarh, Delhi and elsewhere pay a fixed monthly amount, usually between ₹1,000 and ₹2,500, to eligible women with few or no behavioural conditions. Electoral competition has clearly accelerated this trend, and it has sparked a national debate on "freebies" that reached the Supreme Court of India (*S. Subramaniam Balaji v. State of Tamil Nadu*, 2013, and later public interest proceedings).[44]

The issue is two-sided. On the social side, women in India have low labour force participation, limited control over household assets and unpaid care burdens; a predictable cash entitlement in a woman's own account may enhance bargaining power and household welfare. On the fiscal side, states have limited revenue autonomy, considerable committed expenditure (salaries, pensions, interest) and statutory deficit limits. A new recurring liability of 0.3 to 0.6 per cent of Gross State Domestic Product (GSDP) is therefore not trivial.[45]

This paper asks how far these schemes achieve their social objectives, what they cost and how they are financed, and how they can be designed so that they remain affordable.

2. Objectives and Research Questions

The study has four objectives:

1. To describe the design and scale of major state-level UCT schemes for women.
2. To assess the social and economic case for such transfers, drawing on domestic and international evidence.
3. To analyse their implications for state fiscal deficits, debt and expenditure composition.
4. To suggest design and financing principles that reconcile welfare and fiscal sustainability.

The research questions are: (i) What do existing studies suggest about the empowerment and poverty effects of unconditional cash to women? (ii) How large is the fiscal burden, and under what conditions does it become risky? (iii) Is the "freebie versus welfare" dichotomy analytically useful?

3. Methodology

The study is qualitative and descriptive. It relies on secondary sources: Reserve Bank of India (RBI) reports on state finances, reports of the Fifteenth Finance Commission, Union and state Economic Surveys, state budget documents, the Comptroller and Auditor General (CAG),

---

[43]The Pradhan Mantri Jan Dhan Yojana was launched in August 2014. The acronym "JAM" (Jan Dhan, Aadhaar, Mobile) was popularised by the Economic Survey 2014–15.

[44]In *S. Subramaniam Balaji v. State of Tamil Nadu* (2013), the Supreme Court held that election promises are not a "corrupt practice" under the Representation of the People Act, 1951, but asked the Election Commission to frame guidelines with political parties. A later petition (*Ashwini Kumar Upadhyay v. Union of India*, 2022) led to the question being referred to a larger bench; readers should check its status.

[45]The 0.3–0.6 per cent range is an indicative estimate for large schemes; the actual share varies by state depending on benefit level, coverage and the size of the state economy.

analyses by PRS Legislative Research, books, peer-reviewed research and published policy papers.

A comparative approach is used in two ways. First, selected state schemes are compared across eligibility, benefit level, coverage and estimated cost. Second, Indian schemes are set against international experience with cash transfer programmes (Brazil, Mexico, Kenya, Malawi, Iran and Alaska, among others).

The cost figures presented here are approximate.[46] Where an illustrative calculation is made, it is labelled as such and uses rounded beneficiary numbers. Because the schemes are recent and are still being modified, causal evidence specific to them is limited; the paper draws on wider evidence and flags this limitation explicitly.

4. Conceptual Framework and Literature Review

4.1 What is an unconditional cash transfer?

A UCT provides money to recipients without requiring specific behaviour, such as school attendance or clinic visits, as a condition of payment.[47] It contrasts with conditional cash transfers (CCTs) such as Mexico's Progresa/Oportunidades and Brazil's Bolsa Família, and with in-kind transfers. UCTs may be universal, categorical (all women above a certain age) or means-tested. Most Indian state schemes are categorical with an income or exclusion filter: for example, a ceiling on family income, and exclusion of income-tax payers, government employees and, in some cases, households with four-wheelers.

4.2 Theoretical arguments for cash to women

Three strands of thought support women-targeted transfers. First, **household bargaining models** hold that resources controlled by women shift intra-household allocations toward children's health, nutrition and education. Second, **capability and empowerment approaches**, following Amartya Sen, treat independent income as expanding women's agency, not merely their consumption. Third, **the case for cash over in-kind support** rests on recipient autonomy and lower leakage. Muralidharan, Niehaus and Sukhtankar (2016) showed that biometric smartcard payments in Andhra Pradesh reduced leakage and delays in India's rural employment programme, evidence that direct payment infrastructure can work in India.[48]

4.3 Empirical evidence

Evidence from developing countries is broadly favourable. Haushofer and Shapiro (2016) found in Kenya that unconditional transfers raised assets, consumption and psychological well-being, with little evidence of the feared increase in spending on alcohol and tobacco. Banerjee, Hanna, Kreindler and Olken (2017), reviewing seven randomised programmes, found no systematic evidence that transfers discouraged work. Baird, McIntosh and Özlem (2011) showed in Malawi that unconditional transfers to adolescent girls improved schooling and

---

[46] Scheme details (eligibility, benefit level, enrolment) have been revised in several states since launch. Figures in this paper should be read as approximations and updated against current budget documents and government notifications.

[47] In a conditional cash transfer (CCT), payment depends on compliance with stated conditions, such as school attendance or immunisation. In practice the distinction is a spectrum: some "unconditional" schemes carry soft conditions or labelling that nudges spending.

[48] The study by Muralidharan, Niehaus and Sukhtankar (2016) concerned payments under the Mahatma Gandhi National Rural Employment Guarantee Scheme and social pensions in Andhra Pradesh. It found faster payments and lower leakage, but it evaluated a payment technology, not an unconditional transfer.

reduced early marriage, though conditionality produced larger schooling gains in some outcomes. Evidence from India includes the pilot by SEWA and UNICEF in Madhya Pradesh (2011–13), reported by Standing, Jhabvala and Kaul (2015), which found improvements in nutrition, schooling, sanitation and economic activity, especially for women and disabled persons, among recipients of unconditional monthly payments in participating villages.[49]

Caveats matter. Most evidence comes from small, time-limited pilots, not permanent statewide entitlements. Adequacy is also important: ₹1,000 to ₹2,000 per month is a meaningful supplement for a poor household, but it is far smaller than a wage, so effects on labour participation are likely modest, in either direction. Hanna and Olken (2018) argued that in low-capacity settings a badly targeted universal transfer can be inferior to targeted assistance, since resources spent on the non-poor have opportunity costs.

4.4 Fiscal federalism context

Indian states are responsible for roughly two-thirds of general government expenditure on social services but raise only a portion of revenue themselves. Since the introduction of GST, their autonomy over indirect taxes has narrowed. Borrowing is constrained by the Fiscal Responsibility and Budget Management (FRBM) framework: the Fifteenth Finance Commission recommended a fiscal deficit ceiling of 4 per cent of GSDP in 2021–22, 3.5 per cent in 2022–23 and 3 per cent for 2023–24 to 2025–26, with additional borrowing space linked to power-sector reforms.[50] The FRBM Review Committee (2017) recommended a medium-term debt anchor for the general government. RBI's periodic studies of state finances have warned about high debt, rising committed expenditure and the growth of subsidies and transfers, and have identified a set of states as fiscally stressed (Punjab, Rajasthan, Kerala, West Bengal and Bihar among them in earlier editions).

5. Overview of Selected State Schemes

Table 1 summarises three prominent schemes. Beneficiary numbers and costs are rounded approximations from public reporting and should be checked against current budget documents.

[49]The pilot ran in Madhya Pradesh in 2011–13 with matched treatment and comparison villages and monthly payments made to individuals (adults and children), initially at modest amounts that were later raised. Its findings are indicative rather than conclusive because of the small scale and short duration.

[50]The additional 0.5 per cent of GSDP was conditional on state-level power-sector reforms. The Finance Commission ceilings apply to state governments' fiscal deficits as a share of GSDP; the current position and any subsequent Finance Commission recommendations should be checked.

Table 1: Selected UCT schemes for women (approximate)[51]

Feature	Ladli Behna Yojana (Madhya Pradesh)	Gruha Lakshmi (Karnataka)	Majhi Ladki Bahin Yojana (Maharashtra)
Launched	2023	2023	2024
Monthly benefit	₹1,250 (raised from ₹1,000)	₹2,000	₹1,500
Target group	Women roughly 21–60 years, family income below ₹2.5 lakh	Woman head of a family in a Below Poverty Line/Above Poverty Line ration-card household, excluding taxpayers	Women roughly 21–65 years, family income below ₹2.5 lakh
Approx. beneficiaries	~1.25 crore	~1.2 crore	~2.4 crore
Illustrative annual cost	~₹18,750 crore	~₹28,800 crore	~₹43,200 crore

Note: Illustrative annual cost = beneficiaries × monthly benefit × 12. Actual outlays differ because of enrolment changes, verification, and removals.

Three observations follow. First, benefit levels and coverage vary widely, so the burden differs sharply across states. Second, Karnataka's benefit is the highest of the three but is part of a package of "guarantees" (free bus travel for women, subsidised electricity, food grains and an unemployment allowance for graduates), so the cumulative fiscal effect is larger than any one scheme suggests. Third, Maharashtra's experience with verification, in which applications were scrutinised after launch, and a portion of beneficiaries were removed or found ineligible, shows how significant administrative targeting is for actual costs.

Other schemes, including Lakshmir Bhandar in West Bengal, Kalaignar Magalir Urimai Thogai in Tamil Nadu, Maiyan Samman in Jharkhand, Mahtari Vandan in Chhattisgarh and Subhadra in Odisha, follow similar designs with differing amounts and filters. Estimates by PRS Legislative Research put the number of states running such programmes at about a dozen in 2025–26, with total spending of approximately ₹1.7 lakh crore, or about 0.5 per cent of GDP.[52] On average, this is a meaningful share (roughly a twentieth or more) of the states' own revenue receipts, and a considerably larger share in some states.

[51]Eligibility rules differ across sources and time. For example, the lower age limit and income ceilings in Madhya Pradesh and Maharashtra have been adjusted, and Karnataka's scheme is directed to the woman head of the family as defined by the ration card.

[52]PRS Legislative Research estimated that about twelve states were providing UCTs to women in 2025–26 at a combined cost of roughly ₹1.7 lakh crore. The number of states and the estimate change with each budget cycle.

The rounded illustrative figures in Table 1 add to about ₹90,000 crore, roughly half the national estimate. This suggests that three schemes alone account for a large proportion of aggregate spending, and that cost is concentrated in a few large states.

6. Social and Economic Effects

6.1 Financial independence and household welfare

A monthly transfer credited to a woman's own account provides a predictable cash flow that she can allocate to food, health, children's education, debt repayment, or small enterprise. Qualitative reporting from several states suggests that recipients most often use the money on household consumption, children's needs and medical expenses. Owning and operating a bank account also strengthens financial inclusion; women's account ownership in India has risen substantially since 2014, though active use, especially of digital channels, remains uneven.

The independence effect should not be overstated. Whether a woman controls the money depends on household norms, on who accompanies her to the bank and on who holds the phone linked to the account. The "empowerment" claim is therefore plausible but conditional, and it needs to be tested with surveys of intra-household decision-making.

6.2 Poverty reduction and consumption smoothing

For households near the poverty line, a transfer of ₹12,000 to ₹24,000 per year is a significant addition to income. It can reduce vulnerability to shocks such as illness, crop failure or job loss, and allows households to avoid high-interest informal borrowing. The effect on the headline poverty rate is modest for any single scheme, but the effect on depth of poverty and on resilience can be more substantial.

6.3 Local multiplier effects

Because beneficiaries spend most of the money, and spend it locally, transfers can raise demand for local goods and services, benefiting small retailers, transport and service providers. International evidence from Kenya suggests local multipliers above one in some settings where there is slack in the local economy.[53] The result cannot be transferred to India mechanically, and any multiplier must be set against the cost of financing: if the transfer is financed by cutting capital expenditure or by borrowing that crowds out other spending, the net gain is smaller.

6.4 Women's labour force participation

India's female labour force participation rate has risen in recent years (the Periodic Labour Force Survey reports about 41 per cent for women aged 15 and above on a usual status basis for 2023–24)[54], but much of the increase is in self-employment and unpaid family work. Cash transfers may help women finance small enterprises or job search or may modestly reduce distress-driven work. They do not address the structural constraints of care responsibilities, safety, mobility and lack of suitable jobs. A UCT alone is thus not a substitute for policies on childcare, transport, skilling and job creation.

---

[53] Egger et al. (2022) estimated a local income multiplier of roughly 2.5 for large transfers in rural Kenya, with little inflation. The result depends on unused local capacity and on the scale of transfers relative to the local economy, so it may not carry over to India's more heterogeneous settings.

[54] The PLFS reports the female labour force participation rate on several bases (usual status, current weekly status) and for different age groups. The figure used here is for the usual status (principal plus subsidiary) measure for women aged 15 and above.

6.5 Risks and unintended consequences

- **Exclusion errors:** eligible but undocumented women (those without Aadhaar linkage, bank accounts or income certificates) may be left out.
- **Inclusion errors:** ineligible households may enter through weak verification, as Maharashtra's post-launch scrutiny suggested.
- **Political cycle risk:** the benefit may be raised before elections and become hard to reverse, creating a ratchet in spending.
- **Crowding out:** if funds are diverted from health, education, infrastructure or from existing welfare schemes, long-run welfare may fall.
- **Inflation of promises:** competitive bidding among parties to increase amounts (for example, to ₹2,100 or ₹2,500 per month) makes the liability open-ended.

7. Fiscal Analysis

7.1 Scale and composition

According to the Economic Survey 2025–26, aggregate expenditure on UCT programmes, particularly those benefiting women, was estimated at approximately ₹1.7 lakh crore in FY2025–26. This represents a significant recurring commitment, although its fiscal significance differs across states according to revenue capacity, existing debt, committed expenditure and the scale of individual schemes.

7.2 Fiscal Classification and Expenditure Quality

Transfers made directly to households constitute recurring revenue expenditure rather than expenditure on the creation of physical assets. The fiscal implications therefore depend significantly on how such transfers are financed and what other expenditure they accompany. The existence of a recurring transfer does not, by itself, establish that a state's finances are unsustainable. A state with adequate fiscal space may be able to accommodate such a programme without materially affecting other priorities, whereas a state already facing a revenue deficit or substantial debt obligations may have less flexibility to absorb an additional permanent commitment.

7.3 Possible Channels of Fiscal Pressure

5. First, an increase in the annual transfer commitment raises revenue expenditure. If additional revenue is not available, the state may need to reduce expenditure elsewhere or increase borrowing.
6. Second, persistent borrowing to finance recurring expenditure can increase the stock of public debt and future interest obligations. This may reduce the government's fiscal flexibility and affect its capacity to respond to future economic or social needs.
7. Third, where expenditure ceilings or fiscal rules constrain borrowing, adjustment may occur through reductions or slower growth in other categories of expenditure. The consequences depend on which expenditure items are affected; reductions in productive capital expenditure, for example, may have different long-term implications from reductions in less productive subsidies.
8. Fourth, increases in the benefit amount can substantially alter the cost of an existing programme even when beneficiary numbers remain unchanged. Fiscal assessment should therefore consider not only the initial annual cost but also possible changes in transfer levels and beneficiary coverage.
9. Fifth, recurring fiscal commitments can interact with other liabilities, including guarantees and the finances of state-owned entities. The overall assessment should consequently consider the wider fiscal position rather than the transfer programme in isolation.

7.4 Illustrative sensitivity

Suppose a state has 1 crore eligible women and pays ₹1,500 per month. The annual cost is 1 crore × ₹1,500 × 12 = ₹18,000 crore. If the state's own tax revenue is ₹1.5 lakh crore, the scheme absorbs 12 per cent of that revenue. Raising the benefit to ₹2,500 raises the cost to ₹30,000 crore, or 20 per cent. Removing 15 per cent of beneficiaries through better verification at the ₹1,500 level saves ₹2,700 crore. The example shows that the size of the benefit, coverage, and verification quality are all significant levers, and that even modest changes in each produce large changes in fiscal cost.

7.5 Counterarguments

It would be wrong to present the fiscal risk as one-sided. Several considerations moderate it:

- The transfers are small relative to other large subsidies and tax expenditures, including electricity and fertiliser subsidies, which are often less well targeted.
- DBT can reduce leakages in other schemes, generating partial offsets if transfers replace less efficient subsidies.
- The stimulus to local demand may produce modest revenue feedback through GST and other taxes.
- Transfers for women, unlike many subsidies, may generate long-term returns in child nutrition and schooling, which are hard to capture in a budget line but are real.

These points support the view that the *question is not whether* to have such schemes but *how* to structure and finance them.

8. International Experience

Brazil (Bolsa Família) pays mothers, subject to school attendance and health check-ups. It reduced extreme poverty and inequality at a cost of about 0.5 per cent of GDP[55]Comparable to the Indian aggregate, it is often cited as showing that women-targeted transfers can be fiscally sustainable when covered by a stable legal and financing framework and a robust beneficiary registry (Cadastro Único).

Mexico (Progresa/Oportunidades) was one of the earliest large programmes to give money directly to women, and it was evaluated through a randomised rollout. It improved schooling and health outcomes. Its lesson is that evaluation built in from the start improves both credibility and design.

Kenya and Malawi show that unconditional transfers are effective for consumption and assets, and that conditionality is not always necessary but may add gains for specific outcomes such as schooling.

Iran (2011) replaced energy subsidies with universal cash transfers.[56] The transfer was not indexed and lost real value as inflation rose, and the programme became fiscally difficult to reform, illustrating both the ratchet problem and the risk of unfunded universal entitlements.

[55]Estimates of Bolsa Família spending vary by year and definition; they are commonly reported at about 0.4–0.6 per cent of GDP.

[56]The Iranian subsidy reform began in December 2010 and is variously dated to 2010 or 2011. Cash payments were initially set at a fixed nominal amount, and their real value subsequently eroded with inflation.

Alaska Permanent Fund Dividend shows a fully funded model: payments are drawn from returns on a sovereign wealth fund, so the fiscal question does not arise in the same way.[57] Indian states lack such an endowment, so the analogy applies only to the principle of earmarked, dedicated financing.

The common lesson is that the durable programmes are those with legal clarity, a reliable beneficiary database, a stable source of financing and regular independent evaluation.

9. The "Freebie" Debate

The debate surrounding cash transfers to women is frequently framed in terms of whether such programmes constitute welfare expenditure or “freebies”. This terminology, however, does not by itself provide a sufficient basis for assessing either their social value or their fiscal sustainability. A more useful approach is to examine the characteristics and consequences of the particular programme.

The first consideration is beneficiary identification. A programme with clearly defined and verifiable eligibility criteria may have a different fiscal and distributive effect from one with very broad coverage. The second consideration is financing. The sustainability of a recurring transfer depends on whether the state has identified reliable resources to meet its annual obligation. Financing a permanent commitment through temporary revenue gains or repeated borrowing can create a different fiscal risk from financing it through stable recurring revenues.

Third, transparency is important. Governments should disclose the number of beneficiaries, annual expenditure, eligibility conditions and projected future costs. Such information enables legislatures, auditors and citizens to assess the programme on the basis of measurable evidence.

Fourth, the programme should be considered within the state's overall expenditure structure. A transfer cannot be evaluated in isolation from expenditure on health, education, infrastructure, social security and other welfare interventions.

Accordingly, the distinction between “welfare” and “freebie” is less informative than an examination of targeting, financing, transparency, fiscal capacity and measurable outcomes. A policy may have a legitimate welfare objective while still requiring careful fiscal management. Conversely, the presence of a welfare objective does not automatically establish that a programme is financially sustainable.

10. Policy Recommendations

Design and targeting

- Use transparent, verifiable eligibility rules and data-based exclusion filters (income tax, government employment, asset indicators) and update them periodically through linked databases.
- Consider a **tapered or tiered benefit**: a higher amount for the poorest households, tapering with income or asset indicators, rather than a flat amount for all.
- Publish an eligibility and grievance process to reduce exclusion errors and use doorstep enrolment for women with limited documentation.

Financing and fiscal rules

- Present a **multi-year fiscal impact statement** with every new scheme, covering cost at higher benefit levels and coverage, and its effect on the revenue deficit and debt.
- Improve **own revenue collection**: better property tax and stamp duty administration, GST compliance, rationalisation of exemptions and non-tax revenue.

---

[57] The Alaska Permanent Fund Dividend is paid from a share of the earnings of the Permanent Fund, which was built from oil revenues. Annual amounts vary with fund performance and legislative decisions.

- Fund transfers by **rationalising fewer effective subsidies**, not by cutting capital expenditure or by off-budget borrowing.
- Index benefits to inflation through a pre-announced formula, not through ad hoc pre-election increases.
- Consider a **ceiling on committed transfers** as a share of own revenue, or a dedicated fiscal-risk buffer, within the state's FRBM framework.

Complementary policy

- Link the transfer with financial-literacy support, access to credit, skilling, childcare and safe transport, so that cash supports labour-market participation as well as consumption.
- Ensure the transfer does not displace investment in health, education and nutrition, on which the long-run gains for women and children depend.

Evidence and accountability

- Build in **independent impact evaluations**, with baseline and follow-up surveys covering intra-household decision-making, consumption, health, education and labour supply.
- Require CAG and legislative scrutiny of outlays and publish beneficiary data (with privacy safeguards) to enable social audit.
- Encourage the Finance Commission and the RBI to issue guidelines on the fiscal treatment and disclosure of large recurring transfers.

11. Limitations and Directions for Future Research

This study rests on secondary data and publicly reported estimates, which vary across sources and are revised as schemes evolve. It does not estimate causal effects. The evidence used for empowerment and poverty outcomes comes mainly from other schemes and contexts. Future research could use household panel data or quasi-experimental methods (for example, comparing districts or states before and after introduction) to measure effects on women's labour supply and bargaining power; could model state-level debt trajectories under alternative benefit and coverage scenarios; and could analyse the political economy of scheme announcement and escalation around elections.

12. Conclusion

Women-oriented unconditional cash transfers have become an important feature of state-level welfare policy in India. Their expansion reflects an attempt to provide households with predictable financial support while placing resources directly under the control of eligible women. Existing evidence indicates potential benefits in areas such as consumption security, financial inclusion and household resilience, although the extent of these effects varies across programmes and contexts. The fiscal dimension requires equal attention. The Economic Survey 2025–26 estimates aggregate expenditure on UCT programmes, particularly those targeted towards women, at approximately ₹1.7 lakh crore in FY2025–26. These developments demonstrate that the issue is relevant not only to individual welfare schemes but also to the broader management of state finances. The fiscal effect of a cash-transfer programme is not uniform across states; it depends upon beneficiary numbers, transfer amounts, revenue capacity, existing debt, committed expenditure and the source through which the programme is financed. The analysis suggests that greater emphasis should be placed on transparent eligibility criteria, accurate beneficiary databases, multi-year fiscal projections and periodic independent evaluation. States may also consider mechanisms for improving own-source revenue and reviewing less effective expenditure so that recurring welfare commitments do not unnecessarily compete with productive public investment. Women-oriented UCTs should therefore be assessed through both social and fiscal evidence. Their effectiveness cannot be established merely from the amount distributed, nor can their sustainability be determined

solely from their classification as welfare expenditure. A balanced assessment requires consideration of who receives the transfer, what outcomes it produces, how it is financed and what effect it has on the state's broader expenditure priorities. This approach allows the social objectives of cash transfers to be examined alongside the requirements of responsible fiscal management.

References

Note: Figures, dates and citation details should be verified against the latest government budget documents, official scheme notifications and the journal's required citation style before submission.

Government of India, Ministry of Finance. Economic Survey 2025–26. Chapter on State Finances and Unconditional Cash Transfers.

Baird, S., McIntosh, C., & Özler, B. (2011). Cash or condition? Evidence from a cash transfer experiment. *Quarterly Journal of Economics*, 126(4), 1709–1753.

Banerjee, A. V., Hanna, R., Kreindler, G. E., & Olken, B. A. (2017). Debunking the stereotype of the lazy welfare recipient: Evidence from cash transfer programs. *World Bank Research Observer*, 32(2), 155–184.

Comptroller and Auditor General of India. State finances audit reports (various years).

Egger, D., Haushofer, J., Miguel, E., Niehaus, P., & Walker, M. (2022). General equilibrium effects of cash transfers: Experimental evidence from Kenya. *Econometrica*, 90(6), 2603–2643.

Fifteenth Finance Commission. (2020–21). *Report for 2021–26*. Government of India.

FRBM Review Committee. (2017). *Report of the FRBM Review Committee*. Government of India.

Government of India, Ministry of Finance. *Economic Survey* (2016–17, Chapter on Universal Basic Income; 2024–25).

Government of Karnataka, Government of Madhya Pradesh, Government of Maharashtra. State budget documents and scheme guidelines (2023–2026).

Hanna, R., & Olken, B. A. (2018). Universal basic incomes versus targeted transfers: Anti-poverty programs in developing countries. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 201–226.

Haushofer, J., & Shapiro, J. (2016). The short-term impact of unconditional cash transfers to the poor: Experimental evidence from Kenya. *Quarterly Journal of Economics*, 131(4), 1973–2042.

Ministry of Statistics and Programme Implementation. *Periodic Labour Force Survey* annual reports (2023–24).

Muralidharan, K., Niehaus, P., & Sukhtankar, S. (2016). Building state capacity: Evidence from biometric smartcards in India. *American Economic Review*, 106(10), 2895–2929.

PRS Legislative Research. State budget analyses and commentary on unconditional cash transfers to women (2025–26).

Reserve Bank of India. *State Finances: A Study of Budgets* (annual, including 2024–25 and 2025–26 editions).

Reserve Bank of India. (2022). *State Finances: A Risk Analysis*. Report on Currency and Finance / Statistical Publications.

Sen, A. (1999). *Development as Freedom*. Oxford University Press.

Standing, G., Jhabvala, R., & Kaul, S. (2015). *Unconditional Cash Transfers in India*. Routledge / SEWA and UNICEF pilot reports.

S. Subramaniam Balaji v. State of Tamil Nadu & Others, (2013) 9 SCC 659 (Supreme Court of India).

Ashwini Kumar Upadhyay v. Union of India, Writ Petition (Civil) No. 43 of 2022 (Supreme Court of India; referred to a larger bench in 2022).

IMAGE-INFORMED IN SILICO MODELING OF GLIOBLASTOMA MULTIFORME: COUPLING BRATS2020 MRI SEGMENTATION WITH COMPUCELL3D CELLULAR POTTS-BASED VASCULAR TUMOR GROWTH DYNAMICS

By Richard Shinkut
Prof. Awojoyogbe O. Bamidele
Dr. Dada O. Michael
Prof. Olarinoye I. Oyeleke
Saba I. David
Department of physics, Federal university of technology,PMB 65 Minna, Nigeria

ABSTRACT

Glioblastoma Multiforme (GBM) is the most aggressive and malignant primary brain tumor in adults, characterized by rapid proliferation, extensive infiltration into surrounding brain tissues, high vascularization, and poor patient prognosis. Despite advances in medical imaging, surgical intervention, radiotherapy, and chemotherapy, the survival rate of patients diagnosed with GBM remains low due to the complex biological mechanisms that drive tumor growth and progression. Consequently, there is a growing need for computational approaches that can improve the understanding of tumor behavior and support the development of patient-specific treatment strategies. This study presents an image-informed computational oncology framework for modeling glioblastoma growth and angiogenesis using medical imaging data and the Cellular Potts Model (CPM) implemented in CompuCell3D. The study integrates magnetic resonance imaging (MRI) data obtained from the Brain Tumor Segmentation (BraTS2020) dataset with computational tumor growth simulations to create a realistic representation of glioblastoma progression. MRI scans were utilized as the primary source of anatomical and pathological information, while tumor segmentation techniques were employed to identify and extract relevant tumor regions. The segmented images provided the initial spatial configuration required for simulation, thereby establishing a direct connection between clinical imaging and computational modeling. This image-informed approach enhances the biological relevance of the simulation environment and contributes to the emerging concept of digital twins in oncology. A Cellular Potts Model-based framework was developed to simulate the interactions among proliferative tumor cells, necrotic cells, vascular cells, and neovascular cells within the tumor microenvironment. The model incorporated key biological processes associated with glioblastoma development, including cell proliferation, cell death, nutrient diffusion, oxygen transport, angiogenic signaling, and vascular network formation. Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF) was modeled as a major signaling molecule responsible for stimulating angiogenesis in response to hypoxic conditions within the tumor mass. The computational simulations were implemented using CompuCell3D, an open-source multicellular modeling platform capable of representing complex cellular behaviors and tissue dynamics. Simulation results demonstrated the progressive growth of glioblastoma over time, revealing the spatial evolution of proliferative and necrotic regions as well as the formation of new blood vessels in response to angiogenic stimuli. The model successfully reproduced key characteristics of glioblastoma observed in clinical and experimental studies, including heterogeneous tumor morphology, nutrient-dependent cellular behavior, hypoxia-induced necrosis, and VEGF-mediated angiogenesis. Furthermore, the integration of MRI-derived tumor information improved the realism of the simulations by providing anatomically relevant

tumor geometries and initial conditions. The results highlight the importance of vascularization in sustaining tumor expansion and illustrate how computational modeling can be used to investigate tumor growth dynamics under varying biological conditions. The findings of this study demonstrate the feasibility of combining medical image analysis, computational oncology, and Cellular Potts Model simulations within a unified framework for glioblastoma research. By integrating BraTS 2020 MRI data with CompuCell3D-based tumor growth modeling, the study contributes to the development of image-informed digital twin technologies capable of supporting personalized cancer research and treatment planning. The proposed framework provides a valuable platform for exploring tumor progression, evaluating biological hypotheses, and investigating potential therapeutic interventions in a virtual environment. Future work may extend the model through the incorporation of patient-specific clinical parameters, treatment response mechanisms, and advanced machine learning techniques to further improve predictive accuracy and clinical applicability.

PHENOTYPE-SPECIFIC ASSOCIATION BETWEEN CIRCULATING ANGPTL3 AND BODY MASS INDEX IN WOMEN WITH POLYCYSTIC OVARY SYNDROME

Rahman Mohammadi
University of Tehran, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Comparative Biosciences, Tehran, Iran.
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0005-7497-9607
Akram Vatannejad
University of Tehran, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Comparative Biosciences, Tehran, Iran.
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8202-7914
Asma Kheirollahi
University of Tehran, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Comparative Biosciences, Tehran, Iran.
ORCID ID: https://orcid.org/ 0000-0002-5976-3892

Abstract

Angiopoietin-like protein 3 (ANGPTL3), a hepatokine involved in lipid partitioning and triglyceride regulation, has recently gained attention as a potential mediator of metabolic dysfunction. Polycystic ovary syndrome (PCOS), a heterogeneous endocrine disorder with diverse metabolic manifestations, may represent a clinical context in which ANGPTL3 is associated with adiposity-related metabolic vulnerability. However, its phenotype-specific relevance in PCOS remains unclear. Therefore, this cross-sectional study investigated circulating ANGPTL3 concentrations across different PCOS phenotypes and explored their associations with metabolic characteristics.

A total of 109 women with PCOS, diagnosed according to the Rotterdam criteria, were included in the study and stratified into phenotype A (hyperandrogenism + oligo/anovulation + polycystic ovarian morphology), phenotype B (hyperandrogenism + oligo/anovulation), and phenotype C (hyperandrogenism + polycystic ovarian morphology). Circulating ANGPTL3 concentrations were measured by ELISA in participants with available serum samples (n = 73), while metabolic parameters, including fasting glucose and insulin, were assessed using automated biochemical methods.

No statistically significant differences in circulating ANGPTL3 levels were observed across PCOS phenotypes. A statistically significant moderate positive correlation between ANGPTL3 and body mass index (BMI) was observed only in phenotype A (Spearman's $\rho = 0.540$, $p < 0.001$). In phenotype C, the correlation between ANGPTL3 and BMI was positive but did not reach statistical significance ($\rho = 0.397$, $p = 0.060$). No significant associations were observed between ANGPTL3 and glucose–insulin indices or reproductive hormones in phenotypes A or C. Correlation analysis for phenotype B was not interpreted because ANGPTL3 measurements were available for only two participants.

These findings suggest a phenotype-specific association between circulating ANGPTL3 and adiposity, particularly in the classic PCOS phenotype A. Although ANGPTL3 concentrations did not differ significantly across phenotypes, its association with BMI may indicate a potential link between ANGPTL3 and adiposity-related metabolic vulnerability in this subgroup. Larger studies with more balanced phenotype-specific sample sizes are warranted to clarify the clinical relevance of ANGPTL3 in PCOS.

Keywords: Polycystic Ovary Syndrome, ANGPTL3, Adiposity, Lipid Regulation, Body Mass Index, PCOS Phenotypes

Introduction

Polycystic ovary syndrome (PCOS) is an escalating endocrinal disorder that occurs among women in their reproductive years. Hyperandrogenism, polycystic ovaries, chronic anovulation, and metabolic abnormalities are the typical characteristics of PCOS [1]. The Eunice Kennedy Shriver NICHD (part of NIH) and the UK's NHS agree that the exact cause of PCOS remains unknown. Current evidence suggests contributions from genetic and environmental factors, insulin resistance, HPO-axis disruption, and hormone imbalances [2, 3]. The World Health Organization (WHO) estimates that PCOS affects between 6% and 13% of women of reproductive age and up to 70% of cases are undiagnosed [4]. Common clinical manifestations of PCOS include hirsutism, acne, menstrual irregularities such as amenorrhea and oligomenorrhea, hyperinsulinemia, infertility, and mood disturbances [5]. Women with PCOS often experience long-term metabolic consequences, including glucose intolerance and diabetes mellitus (both type 2 and gestational), atherogenic dyslipidemia, systemic inflammation, non-alcoholic fatty liver disease, hypertension, and coagulation disorders [6].

Angiopoietin-like 3 (ANGPTL3) is a member of a subfamily of angiopoietin-like proteins—including ANGPTL4 and ANGPTL8—that are critically involved in the regulation of plasma lipid metabolism. ANGPTL3 is exclusively produced in the liver, making it a true hepatokine. The hepatic expression of ANGPTL3 is upregulated by liver X receptor (LXR) activation and can be suppressed by various metabolic and hormonal factors such as insulin and statins [7]. Its primary function is to inhibit lipoprotein lipase (LPL), the key enzyme responsible for the hydrolysis of circulating triglycerides in the capillaries of adipose and muscle tissues. By inhibiting LPL, ANGPTL3 reduces the clearance of triglyceride-rich lipoproteins, leading to elevated plasma triglyceride levels. It also inhibits endothelial lipase, which influences HDL metabolism. ANGPTL3 acts mainly in the fed state and works in coordination with ANGPTL8 to fine-tune lipid partitioning between tissues, thereby playing a central role in systemic lipid homeostasis [7].

The association between ANGPTL3 and PCOS is likely due to its involvement in lipid metabolism. Indeed, ANGPTL3 is a popular target for dyslipidemia [7]. Elevated ANGPTL3 levels are associated with insulin resistance and dyslipidemia in individuals with PCOS [8]. Furthermore, its potential connection to leptin resistance—an essential regulator of appetite and energy balance—suggests a broader role in PCOS pathophysiology. In fact, leptin contributes to progression of PCOS by modulating several mechanisms, such as hormonal imbalances, obesity-related leptin resistance, inflammation, and oxidative stress [9]. However, direct comparative studies on ANGPTL3 levels across different PCOS phenotypes remain scarce. Investigating these interactions could be instrumental in refining management strategies and advancing targeted therapies for this complex syndrome.

Material and methods

Study Design and Participants: This cross-sectional study included a total of 109 women diagnosed with PCOS according to the Rotterdam criteria. Diagnosis was established by meeting at least two of the following three criteria: menstrual irregularities, hyperandrogenism (evidenced by clinical signs such as hirsutism or elevated testosterone levels), and the presence of polycystic ovaries as observed through transvaginal ultrasound [10]. Based on the Rotterdam criteria, participants were classified into three sub-phenotypes, the details of which are presented in Table 1.

Table 1. Classification of PCOS Phenotypes Based on Rotterdam Criteria

Phenotype	Clinical Features
A	Hyperandrogenism/hirsutism + Oligo/anovulation + Polycystic ovarian morphology
B	Hyperandrogenism/hirsutism + Oligo/anovulation
C	Hyperandrogenism/hirsutism + Polycystic ovarian morphology

Sample Collection

Blood samples were collected from participants after a 12-hour overnight fast to minimize variations in hormonal and metabolic parameters.

Biochemical Analyses

Serum levels of ANGPTL3 were measured using commercial enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) kit, following the manufacturer's instructions (Aviscera Bioscience, Inc., USA; catalog number: SK00311-01). The assay was validated for sensitivity and specificity. Fasting blood glucose (FBG), fasting serum insulin, and free testosterone levels were analyzed using standard laboratory methods. Insulin resistance was calculated using the Homeostasis Model Assessment of Insulin Resistance (HOMA-IR) formula.

Statistical Analysis

Data were analyzed using SPSS 16.0 (SPSS, Chicago, IL, U.S.A.). Descriptive statistics summarized the demographic and biochemical characteristics of the participants. The normality of data distribution was assessed using the Shapiro–Wilk test prior to the analyses. Comparisons between different PCOS phenotypes were conducted using ANOVA. A p-value of <0.05 was considered statistically significant. Correlations between ANGPTL3 levels and metabolic parameters were assessed using Spearman correlation coefficients.

Results

Figure 1 shows the levels of ANGPTL3 across different phenotypes of PCOS. Because ANGPTL3 measurements were available for only two participants in phenotype B, correlation analyses for this phenotype were not interpreted. ANGPTL3 levels differed among the various PCOS with the highest levels observed in phenotype A (256.24± 71.40 ng/mL) and the lowest in phenotype B (173.11± 9.80 ng/mL). However, these differences were not statistically significant.

Phenotype A showed the highest mean BMI, while fasting blood glucose levels were highest in phenotype B and lowest in phenotype C; however, these differences did not reach statistical significance. Insulin levels and HOMA-IR varied slightly among groups but lacked statistical significance, while sex hormones—including free testosterone, LH, and FSH—remained consistent across phenotypes (Table 2).

Results demonstrated a significant positive correlation between ANGPTL3 levels and body mass index (BMI) in phenotype A (Spearman's $\rho = 0.540$, $p < 0.001$). A similar trend was observed in phenotype C, though it did not reach statistical significance ($\rho = 0.397$, $p = 0.060$) (Table 3).

Table 2. Clinical characteristics and biochemical parameters in the study population

Variable	**Phenotype A (n=72)**	**Phenotype B (n=5)**	**Phenotype C (n=32)**	**P value**
Age (years)	29.8 ± 3.9	27.4 ± 6.4	30.0 ± 3.2	0.362
BMI (kg/m²)	26.1 ± 3.4	24.5 ± 2.8	25.5 ± 3.2	0.504
FBG (mg/dL)	90.7 ± 9.7	91.6 ± 7.5	86.1 ± 7.1	0.051

Insulin (µIU/mL)	5.0 ± 3.3	4.1 ± 1.2	5.7 ± 3.6	0.496
HOMA-IR	1.14 ± 0.81	0.93 ± 0.23	1.13 ± 0.76	0.832
FSH (IU/L)	7.4 ± 4.2	7.2 ± 7.8	7.3 ± 4.4	0.989
LH (IU/L)	8.1 ± 4.5	7.0 ± 1.6	6.7 ± 3.8	0.309
Free Testosterone (pg/mL)	3.2 ± 1.1	3.0 ± 1.2	3.2 ± 1.3	0.940

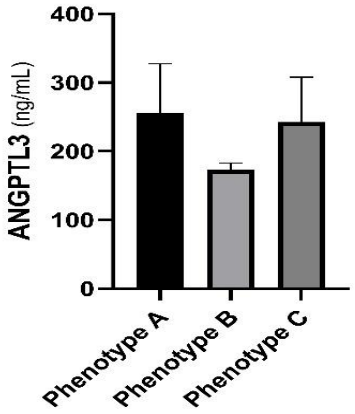


Figure 1. *Serum ANGPTL3 levels in different PCOS phenotypes.*

Table 3. Spearman correlations between circulating ANGPTL3 levels and clinical, metabolic, and hormonal parameters in PCOS phenotypes A and C**.**

Parameter	**ANGPTL3**	
	Phenotype A (ρ)	**Phenotype C (ρ)**
Age (years)	0.176	-0.343
BMI (kg/m²)	0.540**	0.397
Fasting Blood Glucose (mg/dL)	0.179	0.148
Insulin (µIU/mL)	0.129	0.050
HOMA-IR	0.137	0.165
FSH (IU/L)	0.101	-0.159
LH (IU/L)	-0.021	-0.183
Free Testosterone (pg/mL)	-0.005	-0.334

Values are presented as Spearman's correlation coefficients (ρ). * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ (two-tailed).

Discussion

In this study, differences in ANGPTL3 levels were observed across various PCOS phenotypes, but the cross-sectional nature of the study limits the ability to draw causal inferences. While this study was observational and based on serum levels, insights from mechanistic studies offer a useful framework to interpret our findings. A significant positive correlation was observed between circulating ANGPTL3 levels and BMI specifically in women with PCOS phenotype A. This phenotype, characterized by the simultaneous presence of hyperandrogenism, oligo/anovulation, and polycystic ovarian morphology, is frequently associated with more pronounced metabolic abnormalities. To our knowledge, this is one of the first studies to report such an association within this specific PCOS subgroup. Mechanistically, ANGPTL3 has been

suggested to inhibit LPL, potentially leading to reduced triglyceride clearance and promoting lipid accumulation, according to previous mechanistic studies. This mechanism has also been proposed by Zhang, who described in the ANGPTL3–4–8 model that ANGPTL3, activated by ANGPTL8, suppresses LPL activity in oxidative tissues such as the heart and skeletal muscles, resulting in reduced triglyceride clearance and enhanced lipid storage during the fed state [11]. In line with this, Robciuc et al. demonstrated that individuals carrying homozygous loss-of-function mutations in the ANGPTL3 gene exhibited significantly increased LPL activity, reduced plasma free fatty acids, and improved insulin sensitivity. These findings provide compelling human evidence that complete ANGPTL3 deficiency enhances lipid clearance and may beneficially affect glucose metabolism by modulating adipose tissue lipolysis and hepatic VLDL synthesis [12].

FBG levels showed some variation across PCOS phenotypes, with the highest mean value observed in phenotype B and the lowest in phenotype C; however, the overall difference among phenotypes did not reach statistical significance ($p = 0.051$). Given the small sample size of phenotype B and the absence of a statistically significant overall difference, these findings should be interpreted cautiously and should not be considered evidence of phenotype-specific differences in glycemic status. Larger studies with more balanced phenotype groups are needed to determine whether meaningful differences in glucose metabolism exist across PCOS phenotypes.

Moreover, the higher BMI observed in this phenotype, along with a significant correlation between ANGPTL3 and BMI, suggests that the interaction between adiposity, lipid metabolism, and metabolic hormones might play a role in this process. Notably, ANGPTL3 inhibits LPL, thereby reducing triglyceride clearance and promoting fat accumulation and altered energy metabolism [7]. Thus, although adiposity and altered lipid metabolism may contribute to metabolic vulnerability in phenotype A, the present findings do not demonstrate a significant phenotype-specific difference in FBG. Nevertheless, since no statistically significant differences were found in insulin levels or HOMA-IR across phenotypes in this study, these interpretations should be approached with caution. Further research with larger cohorts is warranted to clarify the underlying mechanisms.

As highlighted by Anagnostis et al. (2017), the hyperandrogenic and anovulatory phenotype—classified as phenotype 1 according to the Rotterdam criteria—has been identified as the most insulin resistant, irrespective of BMI or central adiposity. This phenotype is also characterized by more severe hyperandrogenemia compared with the other three phenotypes. Given that insulin resistance is considered the primary pathophysiological mechanism underlying the metabolic features of PCOS, these characteristics may contribute to a higher likelihood of glucose dysregulation and an increased risk for type 2 diabetes in this subgroup [6].

No statistically significant differences were observed in insulin levels, HOMA-IR, or gonadotropin hormones (LH, FSH, and free testosterone) among the different PCOS phenotypes. These findings may suggest that the involvement of ANGPTL3 in PCOS-related metabolic disturbances is primarily mediated through mechanisms independent of insulin signaling or the gonadotropic axis. Consistent with this, Chen et al. (2024) reported that ANGPTL3 likely influences metabolic parameters—particularly lipid metabolism—through insulin-independent pathways [13]. To date, no prior study has directly examined the correlation between ANGPTL3 and gonadotropin hormones, the existing literature focuses predominantly on metabolic endpoints, leaving this specific relationship unexplored.

Moreover, the lack of a significant correlation between ANGPTL3 and LH or FSH levels in phenotypes A and C in the present study raises the possibility that this protein may exert only indirect effects on the hypothalamic–pituitary–ovarian (HPO) axis. Notably, in phenotype C, a

relatively strong (albeit non-significant) negative correlation was observed between ANGPTL3 and free testosterone levels. Although this correlation did not reach statistical significance, it may represent a preliminary indication of an inverse relationship between ANGPTL3 and androgen levels, warranting further investigation in studies with larger sample sizes. To our knowledge, no prior studies have reported correlations—significant or otherwise—between ANGPTL3 and gonadotropins or free testosterone across distinct PCOS phenotypes, underscoring the novelty and exploratory nature of our findings.

Conclusion

This study offers preliminary evidence that circulating ANGPTL3 levels may be selectively associated with adiposity-related metabolic risk in specific PCOS phenotypes, particularly phenotype A. While no significant differences in ANGPTL3 levels were observed across phenotypes, the identified positive correlation with BMI in phenotype A underscores its potential role in modulating lipid metabolism in this high-risk subgroup. These findings point to ANGPTL3 as a possible metabolic mediator rather than a hormonal regulator in PCOS pathophysiology. Further large-scale, phenotype-stratified studies are warranted to clarify the clinical relevance of ANGPTL3 and assess its value as a biomarker or therapeutic target in the metabolic management of PCOS.

References:

1. Yang, J. and C. Chen, *Hormonal changes in PCOS.* Journal of Endocrinology, 2024. **261**(1): p. e230342, https://doi.org/10.1530/JOE-23-0342.
2. (NICHD), N.I.o.H. *Polycystic Ovary Syndrome (PCOS)*. 16 June 2025]; Available from: https://www.nichd.nih.gov/health/topics/pcos.
3. (NHS), N.H.S. *Polycystic Ovary Syndrome (PCOS)*. 16 June 2025]; Available from: https://www.nhs.uk/conditions/polycystic-ovary-syndrome-pcos/.
4. Organization, W.H. *Polycystic ovary syndrome*. 16 June 2025]; Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/polycystic-ovary-syndrome.
5. Pililis, S., et al., *The cardiometabolic risk in women with polycystic ovarian syndrome (PCOS): From pathophysiology to diagnosis and treatment.* Medicina, 2024. **60**(10): p. 1656, https://doi.org/10.3390/medicina60101656.
6. Anagnostis, P., B.C. Tarlatzis, and R.P. Kauffman, *Polycystic ovarian syndrome (PCOS): Long-term metabolic consequences.* Metabolism, 2018. **86**: p. 33-43, https://doi.org/10.1016/j.metabol.2017.09.016.
7. Kersten, S., *Angiopoietin-like 3 in lipoprotein metabolism.* Nature Reviews Endocrinology, 2017. **13**(12): p. 731-739, https://doi.org/10.1038/nrendo.2017.119.
8. Ayvaz, Ö., et al., *Evaluation of the relationship between Angiopoietin like protein-3 levels and clinical, biochemical and hormonal parameters in polycystic ovary syndrome.* Reproductive BioMedicine Online, 2023. **47**, https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2023.103554.
9. Sushitha ES, P.P.S., Sasikala Kathiresan, Sauvit S Patil, Deepa M, Emil Phinehas, Bhavit Bansal, Delna NS, *Serum Leptin Levels in Predicting Polycystic Ovary Syndrome (PCOS).* American Journal of Biomedical Science & Research, 2024. **23**(3), https://doi.org/10.34297/AJBSR.2024.23.003076.
10. Christ, J.P. and M.I. Cedars, *Current guidelines for diagnosing PCOS.* Diagnostics, 2023. **13**(6): p. 1113, https://doi.org/10.3390/diagnostics13061113.
11. Zhang, R., *The ANGPTL3-4-8 model, a molecular mechanism for triglyceride trafficking. Open Biol 2016; 6: 150272*. PUBMED, https://doi.org/10.1098/rsob.150272.
12. Robciuc, M.R., et al., *Angptl3 deficiency is associated with increased insulin sensitivity, lipoprotein lipase activity, and decreased serum free fatty acids.* Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology, 2013. **33**(7): p. 1706-1713, https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.113.30139.
13. Chen, J., et al., *ANGPTL3 as a target for treating lipid disorders in type 2 diabetes patients.* Lipids in Health and Disease, 2024. **23**(1): p. 356, https://doi.org/10.1186/s12944-024-02352-1.

ASSESSMENT OF L-SERINE AND S-ADENOSYLMETHIONINE CO-SUPPLEMENTATION ON HEPATIC OXIDATIVE STATUS IN A STREPTOZOTOCIN-INDUCED DIABETIC RAT MODEL

Rahman Mohammadi
University of Tehran, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Comparative Biosciences, Tehran, Iran.
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0005-7497-9607
Akram Vatannejad
University of Tehran, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Comparative Biosciences, Tehran, Iran.
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8202-7914
Asma Kheirollahi
University of Tehran, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Comparative Biosciences, Tehran, Iran.
ORCID ID: https://orcid.org/ 0000-0002-5976-3892

Abstract

Background: The progression of diabetes is closely linked to oxidative and inflammatory disturbances that compromise hepatic metabolic integrity. As a major hub of glucose production, lipid processing, and redox regulation, the liver is particularly sensitive to hyperglycemia-induced oxidative stress. Enhancing intrinsic antioxidant capacity represents a potential supportive strategy for limiting hepatic injury. L-serine contributes to glutathione-dependent defense systems, while S-adenosylmethionine (SAMe) facilitates methylation reactions and antioxidant regulation, raising the possibility that their combined administration may influence hepatic redox balance.

Aims: Accordingly, this study evaluated whether combined L-serine and SAMe supplementation modulate glycemic status and hepatic oxidative stress markers in a streptozotocin-induced diabetic rat model.

Methods: Eighteen male Wistar rats were randomly allocated into three groups (n = 6 each): control, streptozotocin (STZ)-induced diabetic, and STZ-induced diabetic rats receiving combined L-serine and SAMe supplementation. Diabetes was induced by intraperitoneal administration of STZ (55 mg/kg). The treatment group received L-serine (168 mg/kg/day) and SAMe (10 mg/kg/day) for four weeks. Fasting blood glucose was measured, and hepatic oxidative stress was evaluated by assessing malondialdehyde (MDA) levels and superoxide dismutase (SOD) activity.

Results: Combined L-serine and SAMe supplementation resulted in a modest reduction in fasting blood glucose compared with untreated diabetic rats; however, the difference was not statistically significant. Hepatic MDA levels were elevated in diabetic animals relative to controls, and supplementation tended to reduce MDA concentrations toward baseline values without reaching statistical significance. SOD activity showed no significant differences among groups, with a slight increase observed in diabetic rats and a subsequent decrease following supplementation.

Conclusion: Combined L-serine and SAMe supplementation did not produce statistically significant improvements in glycemic control or hepatic oxidative stress markers under the present experimental conditions. Although trends toward reduced lipid peroxidation were observed, these findings remain preliminary. Further investigations with larger sample sizes,

optimized dosing regimens, and extended intervention periods are warranted to better define the potential role of these compounds in diabetes-associated oxidative stress.

Keywords: Streptozotocin-induced diabetes, Hepatic oxidative stress, L-serine, S-adenosylmethionine, Malondialdehyde, Superoxide dismutase

Introduction

Diabetes mellitus is a chronic and highly prevalent metabolic disorder characterized by impaired regulation of blood glucose levels, primarily due to defects in insulin secretion or insulin action. Projections from the International Diabetes Federation indicate that by 2025, an estimated 590 million adults globally will be living with diabetes, which accounts for approximately 11.1% of the world's adult population [1]. Diabetes-related complications are among the primary causes of illness and death worldwide.

Oxidative stress and inflammation are well-established contributors to the complications of diabetes. Fundamentally, oxidative stress results from an imbalance where the production of reactive oxygen species (ROS) overwhelms the body's natural antioxidant defenses. This damaging process is driven by several key mechanisms, including the activation of NADPH oxidase, the formation of Advanced Glycation End-products (AGEs), and mitochondrial dysfunction. These pathways, combined with chronic inflammation, are known to significantly promote the development of diabetic complications, particularly hepatopathies like non-alcoholic fatty liver disease (NAFLD) and non-alcoholic steatohepatitis (NASH) [2].

In diabetes, excessive production of ROS disrupts insulin signaling by impairing the phosphorylation of insulin receptor substrate (IRS) proteins, thereby blocking the PI3K/Akt pathway. This defect limits the capacity of hepatocytes to properly absorb and utilize glucose, contributing to hepatic insulin resistance as well as systemic disturbances in glucose regulation [3, 4]. Oxidative stress also provokes endoplasmic reticulum (ER) stress, leading to the activation of kinases such as JNK and IKK-β, which further undermine insulin signaling and exacerbate resistance. In parallel, the persistent oxidative burden depletes the activity of key antioxidant defense enzymes, including superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) [3, 4]. One major downstream consequence of this imbalance is lipid peroxidation, during which ROS attack polyunsaturated fatty acids within cell membranes. This process compromises membrane stability and cellular signaling, ultimately driving the apoptotic death of hepatocytes. Beyond direct cellular damage, oxidative stress also promotes chronic inflammation by upregulating pro-inflammatory cytokines such as TNF-α, IL-6, and IL-1β, which collectively accelerate the progression of diabetic liver complications [3, 4].

Due to its strategic anatomical position, receiving nutrient-rich blood via the portal vein, the liver plays a central role in regulating the distribution of absorbed nutrients to peripheral tissues. It is one of the few organs capable of producing substantial amounts of glucose through gluconeogenesis and glycogenolysis, while also efficiently uptaking and storing glucose in the form of glycogen. These metabolic processes are tightly regulated by substrate availability, allosteric effects of metabolic intermediates, and hormonal signals, particularly insulin and glucagon. This central metabolic role underscores the liver's vulnerability to oxidative stress and metabolic dysregulation in diabetes [5].

To protect against oxidative damage, therapeutic strategies often rely on supplementation with antioxidants or compounds that enhance endogenous antioxidant defenses. These agents not only mitigate ROS but also preserve cellular components against DNA damage and apoptosis [6]. L-Serine, a non-essential amino acid, plays a critical role in cellular metabolism as a precursor for several biomolecules, including glycine, cysteine, and phospholipids. Through its

involvement in glutathione biosynthesis, serine indirectly contributes to antioxidant defense by maintaining redox balance and reducing lipid peroxidation [7].

S-adenosylmethionine (SAMe), a principal biological methyl donor, also exerts protective effects against oxidative stress. SAMe participates in transmethylation and transsulfuration pathways, thereby supporting glutathione synthesis and regulating mitochondrial function [8]. Despite their known metabolic importance, the combined supplementation of L-serine and SAMe has not been previously investigated for protecting the liver against diabetes-induced oxidative damage. Therefore, the present study aimed to evaluate the effects of diabetes on hepatic oxidative stress in experimental rats and to assess whether supplementation with L-serine and SAMe can enhance endogenous antioxidant defenses and mitigate these detrimental outcomes.

Materials and methods

Animals

A total of 18 male Wistar rats (8 weeks old, 200 ± 20 g) were obtained from the Royan Institute (Tehran-Karaj, Iran). The animals were housed in standard polypropylene cages under controlled environmental conditions, including a 12-hour light/dark cycle, a temperature of 24 ± 1°C, and 55 ± 5% humidity. Before the experiment began, they were acclimated for five days. Throughout the study, all rats had ad libitum access to a standard pellet diet and water. All procedures involving animal care and use were approved by the Animal Ethics Committee of the University of Tehran (Approval No.: IR.UT. VETMED. REC.1403.045).

Induction of diabetes

To induce diabetes mellitus (DM), overnight-fasted rats were given a single intraperitoneal injection of freshly prepared streptozotocin (STZ) at a dose of 55 mg/kg, which was dissolved in cold 0.1 M citrate buffer (pH 4.5). To prevent acute hypoglycemia after the injection, the rats had ad libitum access to a 5% sucrose solution for 24 hours. The induction of DM was confirmed 72 hours later by measuring fasting blood glucose levels after a 6-hour fast from tail-vein blood samples using a portable glucometer (Mini Glucocard 01, Japan). Rats with fasting blood glucose concentrations exceeding 150 mg/dL were included in the study [9, 10]. Following the confirmation of DM, the diabetic rats began receiving the L-serine and SAMe supplements on day 7 after the STZ injection.

Experimental design

The animals were randomly divided into three groups of six rats each:

- **Group I (control):** Non-diabetic rats that received no treatment.
- **Group II (STZ):** Diabetic rats that remained untreated throughout the experimental period.

Group III (L-serine + SAMe): Diabetic rats were treated with a daily dose of L-serine (168 mg/kg/day) and SAMe (10 mg/kg/day), with the selected dosages determined based on previous studies. The compounds were administered via intraperitoneal injection in saline for a duration of four weeks [11, 12]. To ensure transparency regarding cohort use, the present study was conducted as part of a broader experimental project using the same animal cohort as in our previously published investigations evaluating one-carbon metabolism–related interventions in diabetes [8, 13]. Portions of baseline control and diabetic group data have been reported in our previous studies investigating other treatment arms within the same experimental cohort. This design was implemented to reduce animal use in accordance with the 3Rs principle. However, the current analysis focuses specifically on hepatic oxidative stress parameters following L-serine and SAMe Co-Supplementation, and presents findings that have not been previously reported.

Determination of biochemical parameters

After four weeks, the animals were humanely euthanized, and blood samples were collected via cardiac puncture. The obtained serum was separated and stored at −70 °C until biochemical analysis. Serum fasting blood glucose (FBG) concentrations were then determined according to procedures described in our previous work [8, 13].

Measurement of Malondialdehyde (MDA) Levels in Liver Tissue

To measure MDA levels, liver tissue was excised, rinsed with cold phosphate-buffered saline (PBS), and homogenized to a 10% (w/v) suspension. Prior to quantification, tissue protein concentration was determined using the Bradford assay. The homogenates were then centrifuged at 1,600 × g for 10 minutes at 4 °C, and the resulting supernatant was collected. MDA concentrations were quantified using a commercial assay kit (Kushan Zist Laboratory, Iran; Cat. No. KZMA-OB), according to the manufacturer's instructions. This assay is based on the reaction of MDA with thiobarbituric acid (TBA) in an acidic environment to form a pink-colored MDA-TBA adduct, which was measured photometrically at 530–540 nm.

Determination of Superoxide dismutase (SOD) activity in Liver Tissue

A 10% (w/v) homogenate of liver tissue was prepared in cold phosphate-buffered saline (pH 7.4). The homogenate was centrifuged at 14,000 × g for 5 minutes at 4 °C, and the supernatant was used for analysis. Before measurement, protein concentration was determined using the Bradford assay. SOD activity was evaluated with a commercial kit (Kushan Zist Laboratory, Iran; Cat. No. KZSO-OB), according to the manufacturer's instructions. The assay measures the ability of SOD to inhibit the reduction of WST-1 tetrazolium salt by superoxide radicals generated through the hypoxanthine/xanthine oxidase system, with absorbance measured at 440–460 nm.

Statistical analysis

Data were analyzed using GraphPad Prism version 10.5.0 (GraphPad Software, CA, USA). The normality of data distribution was assessed with the Shapiro–Wilk test. For normally distributed data, one-way analysis of variance (ANOVA) followed by Dunnett's post hoc test was applied. Results are expressed as mean ± standard deviation (SD), and statistical significance was set at $p < 0.05$.

Results

After four weeks of treatment, the rats' FBS was measured. The STZ group showed a significant increase in FBS compared to the control group ($p < 0.01$). Although combined L-serine and SAMe treatment produced a slight reduction in FBS, the change was not statistically significant compared with the STZ group (Fig. 1).

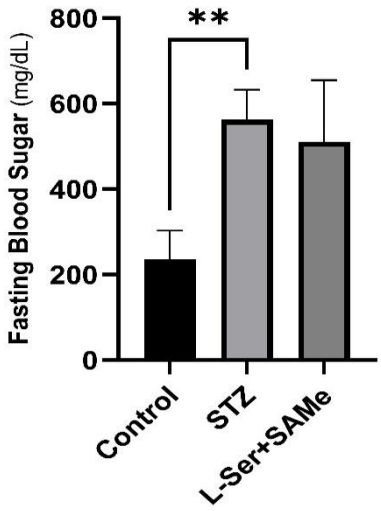


Fig. 1: FBS variations among different groups after 4 weeks of treatment
Control: Non-diabetic group, STZ: diabetic group, L-Ser+SAMe: diabetic group treated with L-Serine and SAMe
** p-value < 0.01

As shown in Figure 2A, hepatic MDA levels tended to increase in diabetic rats of the STZ group (28.01 ± 4.23 µM/mg protein) compared with the control group (19.96 ± 4.34 µM/mg protein), although this difference was not statistically significant. After four weeks of treatment, L-serine and SAMe supplementation decreased MDA concentrations to 21.30 ± 9.75 µM/mg protein, approaching the control values; however, this reduction was also not statistically significant compared with the STZ group.

As shown in Figure 2B, hepatic SOD activity did not show significant differences among the studied groups. The mean value in the control group was 147.9 ± 64.62 U/mg protein, while diabetic rats in the STZ group exhibited a non-significant increase to 171.0 ± 89.91 U/mg protein. Following the four-week intervention, treatment with L-serine and SAMe resulted in a reduction to 124.6 ± 34.94 U/mg protein; however, this change was not statistically significant compared with the STZ group.

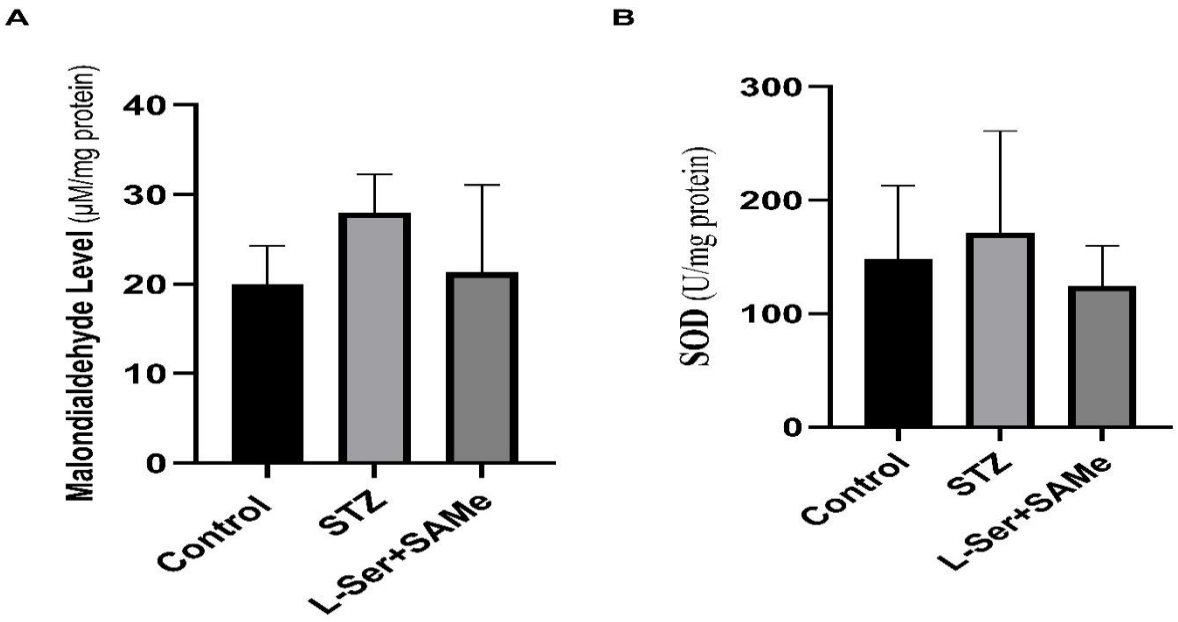


Fig. 2: Tissue level of MDA (A), SOD (B) in different groups.
Control: Non-diabetic group, STZ: diabetic group, L-Ser+SAMe: diabetic group treated with L-Serine and SAMe

Discussion

In the present study, STZ-induced diabetic rats exhibited a significant elevation in fasting blood glucose compared to the control group, confirming the diabetogenic action of streptozotocin through its selective cytotoxicity toward pancreatic β-cells, which leads to impaired insulin secretion or action [14]. Combined supplementation with L-serine and SAMe produced a slight reduction in FBS levels; however, this effect did not reach statistical significance compared with untreated diabetic rats. One of the primary limitations in supplementation studies, including interventions focused on one-carbon metabolism (such as serine and SAMe), relates to the selection of dose and duration. As also noted by Balbi et al. (2018), variations in dose and intervention length may underestimate actual effects on glycemic indices and lead to conclusions suggesting the insufficiency of the combined intervention under the specific trial conditions [15]. Previous studies, such as the one by Holm et al. (2018) in NOD mouse models, demonstrated that L-serine supplementation effectively improved blood glucose homeostasis, as evidenced by enhanced glucose tolerance and a subsequent reduction in average blood glucose levels [16]. The administration of SAMe has been linked to the amelioration of insulin resistance and improved insulin sensitivity in diabetic models. Consistent with this, the combined administration of SAMe (with GPC) was found to significantly reduce serum glucose levels and demonstrate a tendency toward improved insulin resistance in KK-Ay mice [17]. The absence of a statistically significant effect in our study may be related to the limited number of animals and the possibility that L-serine and SAMe mainly act by modulating oxidative stress rather than directly enhancing insulin secretion or glucose uptake. Such indirect mechanisms might require longer interventions to result in measurable improvements in glycemic indices.

Hepatic MDA concentrations, as an index of lipid peroxidation, were elevated in diabetic rats relative to controls, consistent with prior evidence showing enhanced lipid peroxidation in diabetes [18]. Treatment with L-serine and SAMe produced a downward trend in MDA levels, approaching control values, although this reduction did not reach statistical significance. The partial attenuation of lipid peroxidation may reflect improved endogenous antioxidant defenses,

likely mediated by serine's role in glutathione synthesis (via providing substrate for cysteine and integration into sulfur metabolism) and SAMe's contribution to methylation and transsulfuration pathways [19]. The lack of statistical significance in our results may be attributed to the well-documented inherent variability and non-specificity of TBARS-based MDA measurements. Furthermore, the outcome may reflect a relatively short treatment duration or suggest that higher dosages of the compound are necessary to achieve more pronounced antioxidant effects [20].

Hepatic SOD activity did not differ significantly among the groups. Diabetic rats exhibited a mild, non-significant elevation compared with controls, which may reflect a compensatory response to increased superoxide production. Similar paradoxical increases in SOD activity have been reported in the early or moderate stages of diabetes, likely representing an adaptive mechanism to oxidative stress, as also observed by Aouacheri et al. (2015) in type 2 diabetic patients [21]. However, other studies have also demonstrated reduced SOD activity in advanced or prolonged diabetes, suggesting that the enzyme response may vary depending on disease stage and tissue condition, as indicated by Lewandowski et al. (2021) [22].

Interestingly, supplementation with L-serine and SAMe resulted in a non-significant reduction in SOD activity relative to untreated diabetic rats. This trend is in line with previous reports indicating that antioxidant interventions do not always enhance enzymatic activity, which may be explained by feedback regulation, maintenance of redox homeostasis, or activation of non-enzymatic antioxidant mechanisms, as highlighted by Yesupatham and Saraswathy (2025) [23]. Given that both L-serine and SAMe serve as essential substrates for one-carbon metabolism and glutathione biosynthesis, their combined effect likely promotes glutathione-dependent antioxidant defenses rather than increasing SOD activity. This synergy enhances cellular protection against oxidative stress primarily via upregulation of glutathione pathways [24].

Conclusion

The supplementation with L-serine and SAMe did not produce significant effects on glucose regulation or hepatic oxidative stress markers in diabetic rats. Although trends toward improvement were observed, these results highlight the need for further research to determine the optimal dosages and treatment durations required to achieve measurable therapeutic outcomes. Future studies should explore the underlying mechanisms and evaluate the long-term effects of these compounds to better understand their potential benefits in diabetes management.

References

1. Federation, I.D. *Diabetes facts & figures*. 2025 7 Jun 2025]; Available from: https://idf.org/about-diabetes/diabetes-facts-figures/.
2. Gabbia, D., L. Cannella, and S. De Martin, *The role of oxidative stress in NAFLD–NASH–HCC transition—focus on NADPH oxidases.* Biomedicines, 2021. **9**(6): p. 687, https://doi.org/10.3390/biomedicines9060687.
3. Chen, X., et al., *Oxidative stress in diabetes mellitus and its complications: From pathophysiology to therapeutic strategies.* Chinese Medical Journal, 2025. **138**(1): p. 15-27, https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000003230.
4. De Deus, I.J., et al., *Role of NLRP3 inflammasome and oxidative stress in hepatic insulin resistance and the ameliorative effect of phytochemical intervention.* Frontiers in pharmacology, 2023. **14**: p. 1188829, https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1188829.
5. Petersen, M.C., D.F. Vatner, and G.I. Shulman, *Regulation of hepatic glucose metabolism in health and disease.* Nature reviews endocrinology, 2017. **13**(10): p. 572-587, https://doi.org/10.1038/nrendo.2017.80.

6. Tumilaar, S.G., et al., *A comprehensive review of free radicals, oxidative stress, and antioxidants: Overview, clinical applications, global perspectives, future directions, and mechanisms of antioxidant activity of flavonoid compounds.* Journal of Chemistry, 2024. **2024**(1): p. 5594386, https://doi.org/10.1155/2024/5594386.
7. Langroudi, F.E., et al., *Effect of L-serine on oxidative stress markers in the kidney of streptozotocin-induced diabetic mice.* Amino Acids, 2023. **55**(6): p. 799-806, https://doi.org/10.1007/s00726-023-03270-9.
8. RahimBakhsh, A., et al., *Protective effects of S-adenosyl methionine on oxidative stress and tissue damage in STZ-induced diabetic rats.* Amino Acids, 2025. **57**(1): p. 38, https://doi.org/10.1007/s00726-025-03471-4.
9. Furman, B.L., *Streptozotocin-induced diabetic models in mice and rats.* Current protocols, 2021. **1**(4): p. e78, https://doi.org/10.1002/cpz1.78.
10. Ghasemi, A. and S. Jeddi, *Streptozotocin as a tool for induction of rat models of diabetes: A practical guide.* EXCLI journal, 2023. **22**: p. 274, https://doi.org/10.17179/excli2022-5720.
11. Ren, T.-J., et al., *Improvement in regional CBF by L-serine contributes to its neuroprotective effect in rats after focal cerebral ischemia.* PLoS One, 2013. **8**(6): p. e67044, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067044.
12. Cao, D., et al., *S-adenosylmethionine reduces the inhibitory effect of Aβ on BDNF expression through decreasing methylation level of BDNF exon IV in rats.* Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018. **495**(4): p. 2609-2615, https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.12.166.
13. Mohammadi, R., et al., *Effects of Folate supplementation on the kidney in Streptozotocin-Induced Diabetic Rats.* Journal of Basic Research in Medical Sciences, 2026. **13**(3): p. 19-29, http://jbrms.medilam.ac.ir/article-1-1062-en.html.
14. Rehman, H.u., et al., *Comparative impact of streptozotocin on altering normal glucose homeostasis in diabetic rats compared to normoglycemic rats.* Scientific reports, 2023. **13**(1): p. 7921, https://doi.org/10.1038/s41598-023-29445-8.
15. Balbi, M.E., et al., *Antioxidant effects of vitamins in type 2 diabetes: a meta-analysis of randomized controlled trials.* Diabetology & metabolic syndrome, 2018. **10**(1): p. 18, https://doi.org/10.1186/s13098-018-0318-5.
16. Holm, L.J., et al., *L-serine supplementation lowers diabetes incidence and improves blood glucose homeostasis in NOD mice.* PLoS One, 2018. **13**(3): p. e0194414, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194414.
17. Izu, H., et al., *Anti-diabetic effect of S-adenosylmethionine and α-glycerophosphocholine in KK-A y mice.* Bioscience, biotechnology, and biochemistry, 2019. **83**(4): p. 747-750, https://doi.org/10.1080/09168451.2018.1559721.
18. Hafez, M.H., et al., *Thymoquinone attenuates diabetes-induced hepatic damage in rat via regulation of oxidative/nitrosative stress, apoptosis, and inflammatory cascade with molecular docking approach.* Scientific Reports, 2024. **14**(1): p. 13016, https://doi.org/10.1038/s41598-024-62780-y.
19. Holeček, M., *Serine metabolism in health and disease and as a conditionally essential amino acid.* Nutrients, 2022. **14**(9): p. 1987, https://doi.org/10.3390/nu14091987.
20. Ito, F., Y. Sono, and T. Ito, *Measurement and clinical significance of lipid peroxidation as a biomarker of oxidative stress: oxidative stress in diabetes, atherosclerosis, and chronic inflammation.* Antioxidants, 2019. **8**(3): p. 72, https://doi.org/10.3390/antiox8030072.

21. Aouacheri, O., et al., *The investigation of the oxidative stress-related parameters in type 2 diabetes mellitus.* Canadian journal of diabetes, 2015. **39**(1): p. 44-49, https://doi.org/10.1016/j.jcjd.2014.03.002.

22. Lewandowski, Ł., et al., *Concentration/activity of superoxide dismutase isozymes and the pro-/antioxidative status, in context of type 2 diabetes and selected single nucleotide polymorphisms (genes: INS, SOD1, SOD2, SOD3)–Preliminary findings.* Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021. **137**: p. 111396, https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111396.

23. Yesupatham, A. and R. Saraswathy, *Role of oxidative stress in prediabetes development.* Biochemistry and Biophysics Reports, 2025. **43**: p. 102069, https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2025.102069.

24. Tajan, M., et al., *Serine synthesis pathway inhibition cooperates with dietary serine and glycine limitation for cancer therapy.* Nature communications, 2021. **12**(1): p. 366, https://doi.org/10.1038/s41467-020-20223-y.

THE ROLE OF GENERAL THOAI NGOC HAU (1761-1829) IN PROTECTING THE SOUTHWESTERN BORDERLANDS

Dr. Duong The HIEN
An Giang University - Vietnam National University Ho Chi Minh City, Vietnam
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8791-673X

ABSTRACT

This paper analyzes the outstanding historical contributions of General Thoai Ngoc Hau (Nguyen Van Thoai, 1761-1829) to the administration, development, and defense of the Southwestern borderlands during the early nineteenth century. Serving as a distinguished military commander and administrator under the Nguyen Dynasty, he directly directed strategic hydraulic infrastructure projects, most notably the excavation of the Thoai Ha and Vinh Te canals. These waterways served not only to enhance fluvial transportation and agricultural expansion across the Chau Doc-Ha Tiên area but also to construct a formidable military defense line along the frontier. Additionally, General Thoai Ngoc Hau successfully executed policies aimed at stabilizing local populations, fostering inter-ethnic harmony, maintaining peaceful diplomatic relations with neighboring polities, and securing local order. By evaluating Han-Nom archival sources and surviving epigraphic materials, this study underscores his sharp strategic vision in synthesizing economic development, military defense, and border diplomacy. His monumental achievements left an enduring legacy on the preservation of national territorial sovereignty and the long-term integration of Southern Vietnam.

Keywords: Thoai Ngoc Hau, Southwestern borderlands, Vinh Te Canal, Nguyen Dynasty, Sovereignty protection.

MILITARY POSTS AND GARRISON SETTLEMENTS IN THE HAU RIVER BORDERLAND UNDER THE NGUYEN DYNASTY (1802-1867)

Dr. Duong The HIEN
An Giang University - Vietnam National University Ho Chi Minh City, Vietnam
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8791-673X

ABSTRACT

This paper examines the organization, role, and impact of the system of military posts and garrison settlements (*quan don dien*) in the Hau River borderland under the Nguyen Dynasty (1802-1867). Positioned as a vital geopolitical frontier in Southern Vietnam, the Hau River border region faced continuous challenges regarding territorial security and social stability. Utilizing classical historical records, including Imperial Archives (*Chau ban*), Cadastral Registers (*Dia ba*), and the Veritable Records of Dai Nam (*Dai Nam thuc luc*), this study illuminates the Nguyen Court's strategic integration of national defense with economic development. The establishment of military outposts not only facilitated surveillance, border patrols, and the prevention of external incursions but also provided a secure environment for civilian land reclamation. Furthermore, the garrison settlement model effectively transformed soldiers into agricultural producers, enabling local logistics self-sufficiency while accelerating frontier cultivation. The findings confirm that the network of military posts and garrison settlements represented a flexible and innovative defense policy. This strategy played a pivotal role in safeguarding territorial sovereignty, consolidating border security, and laying the groundwork for sustainable socio-economic growth in the Southwestern region during the first half of the nineteenth century.

Keywords: Military posts, Garrison settlements, Hau River borderland, Nguyen Dynasty, National security.

THE IMPACT OF BANQUE DE L'INDOCHINE ON THE DEVELOPMENT OF PORT CITIES IN VIETNAM (1875-1945)

Dr. Duong The HIEN
An Giang University - Vietnam National University Ho Chi Minh City, Vietnam
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8791-673X

ABSTRACT

This paper analyzes the profound impact of the Banque de l'Indochine (BIC) on the formation and urban transformation of port cities in Vietnam between 1875 and 1945. Utilizing extensive archival evidence from the National Library of France (BNF/Gallica), colonial statistical reports, and historical urban planning records, this study demonstrates that BIC functioned not merely as a commercial credit provider, but as a central catalyst in shaping colonial urban space. By financing maritime infrastructure, warehousing complexes, port-hinterland transport networks, and commercial real estate in key port cities such as Saigon, Haiphong, and Tourane (Da Nang), BIC facilitated their evolution into major East Asian trading hubs and financial nodes. The research reveals that BIC's branch network in these coastal gateways created a structural nexus for colonial capital accumulation, integrating the domestic economy into global trade circuits. Ultimately, this study underscores that the Banque de l'Indochine decisively shaped the modern spatial logic of Vietnamese port cities while consolidating the economic architecture of French colonialism in Indochina.

Keywords: *Banque de l'Indochine, Port Cities, Colonial Infrastructure, Saigon-Haiphong (1875-1945), Capital Accumulation.*

1. INTRODUCTION

In the history of Western colonialism in Southeast Asia, colonial urbanization was inextricably bound to maritime commercial networks and the evolution of port cities. In Vietnam, the spatial transformation and economic restructuring of strategic port cities most notably Saigon, Haiphong, and Tourane (Da Nang) from the late nineteenth to the mid-twentieth century were deeply driven by the financial coordination of the *Banque de l'Indochine* (BIC). Established in 1875 with exclusive note-issuing privileges and colonial credit mandates, BIC rapidly transcended the functions of a standard commercial bank to become the primary financial institution shaping the infrastructural and spatial architecture of colonial port cities (Gonjo, 1993; Meuleau, 1990). Investigating BIC's impact on port city development not only illuminates the mechanisms of colonial capital accumulation but also provides an interdisciplinary perspective bridging financial history and colonial urban studies.

Between 1875 and 1945, Vietnamese port cities functioned as vital gateway nodes connecting the extractive primary-commodity economy of the hinterland to global capitalist markets. To optimize the circulation speed of commodities and natural resources, BIC actively underwrote major maritime infrastructure projects, including deep-water wharves, warehousing complexes, dockyards, and port-hinterland transport rail networks (Brocheux & Hémery, 2009; Norlund, 1991). By extending preferential credit to French shipping lines and major export-import trading houses, BIC consolidated metropolitan trade monopolies while directly dictating the spatial logic of modern port urban planning. The architectural presence of BIC headquarters and branch offices at prime urban centers emerged as symbols of financial hegemony, stimulating capital inflows into commercial real estate, maritime logistics services, and urban credit markets.

While existing historiography addresses broad economic aspects of French Indochina, the specific synergy between colonial banking capital and the spatial-economic development of port cities requires deeper empirical investigation through primary archival records. Historical collections housed at the National Library of France (BNF/Gallica), alongside BIC annual corporate reports, offer critical empirical evidence regarding investment volume, infrastructure financing agreements, and urban real estate portfolios (Gouvernement Général de l'Indochine, 1931). Leveraging these primary sources allows for a rigorous reconstruction of how BIC converted financial capital into urban infrastructure, transforming Vietnamese coastal gateways into dynamic regional trading hubs designed for colonial resource extraction.

This study systematically analyzes the impact of the *Banque de l'Indochine* on the formation and development of port cities in Vietnam from 1875 to 1945. Specifically, it addresses three central research questions:

- *First*, how did BIC deploy its credit policies and financial capital to underwrite maritime and port-related transport infrastructure?

- *Second*, in what ways did BIC's institutional presence reshape the spatial structure, real estate dynamics, and economic functions of key port cities like Saigon and Haiphong?

- *Third*, what was BIC's broader role in integrating Vietnamese port cities into global trade and financial networks?

By addressing these inquiries, this paper contributes fresh insights into the mechanics of French financial imperialism and its enduring urban legacy in Vietnam.

2. RESEARCH AND FINDINGS

2.1. Financing Maritime Infrastructure and Port-Hinterland Transport Networks

The evolution of port cities in Vietnam between 1875 and 1945 was intrinsically tied to the *Banque de l'Indochine* (BIC), which served as the primary financial underwriter and long-term credit provider for colonial infrastructure. Through municipal bond underwriting and state-guaranteed loans, BIC directly financed the construction of deep-water piers, warehousing complexes, dry docks, and port logistics facilities across strategic maritime gateways, including Saigon, Haiphong, and Tourane (Da Nang) (Gonjo, 1993). In Haiphong, BIC's credit injection transformed a coastal marshland into Tonkin's premier modern maritime port; in Saigon, bank capital underwrote the expansion of the Ba Son shipyards and the Khanh Hoi logistics complex, laying the groundwork for the city's emergence as a global hub for rice exports (Meuleau, 1990).

Parallel to maritime port modernization, BIC funneled substantial capital into port-hinterland transport corridors. The bank was the central financial backer for major railway enterprises, most notably the Yunnan Railway (linking Haiphong port to southwestern China) and key segments of the Trans-Indochinese Railway, alongside Cochinchina's commercial canal networks (Brocheux & Hémery, 2009). However, archival analysis reveals that these infrastructural commitments were not designed for integrated regional economic development or the welfare of the indigenous population. Instead, they were engineered specifically as resource-extractive corridors aimed at maximizing the speed of collecting and transporting primary commodities (rubber, coal, and rice) from interior hinterlands to coastal gateways bound for France (Norlund, 1991).

The operational efficacy of this extraction network was reinforced by a tight nexus between BIC's banking capital and French shipping conglomerates. Archival records housed at the National Library of France (BNF/Gallica) demonstrate extensive financial synergies and interlocking directorates between BIC and maritime transport lines such as *Messageries Maritimes* and *Chargeurs Réunis* (Gouvernement Général de l'Indochine, 1931). BIC provided liquid working capital, shipbuilding credit guarantees, and exclusive trade financing for these

shipping houses. This financial-maritime alliance instituted a closed monopoly that controlled the entire logistics value chain from inland procurement to international maritime transport effectively foreclosing market entry for indigenous transport operators.

2.2. Restructuring Urban Space and Commercial Real Estate

BIC's capital allocation directly restructured the spatial organization of Vietnamese port cities, catalyzing the formation of modern Central Business Districts (CBDs). In Saigon and Haiphong, BIC headquarters and regional branches were positioned at prime waterfront locations adjacent to port facilities (such as the Quai de Belgique / Ham Nghi Boulevard in Saigon). Built in a monumental neo-classical architectural style, BIC's edifices functioned not merely as banking chambers but as physical symbols of colonial financial hegemony (Wright, 1991). The architectural presence of BIC acted as a spatial anchor dictating surrounding urban expansion, attracting insurance firms, export-import trading houses, and colonial maritime administrative offices into its immediate orbit.

Beyond core banking, BIC collaborated with financial subsidiaries such as the *Société Foncière de l'Indochine* to drive urban land financialization. BIC capital poured into acquiring prime waterfront real estate, funding luxury commercial complexes, iconic hotels (e.g., Hotel Continental and Hotel Majestic in Saigon), warehousing facilities, and rental commercial properties (Robequain, 1944). By controlling the urban real estate mortgage credit market, BIC and its French partners inflated land values, converting port urban land into speculative financial assets that generated immense capital gains alongside conventional interest income (Giran, 1910).

The direct structural consequence of this financialization was the exacerbation of colonial urban spatial dualism. On one hand, BIC constructed modern, well-serviced European enclaves equipped with advanced utility infrastructure to serve French corporate capital and the colonial elite. On the other hand, the vast majority of the indigenous population and dockworkers were pushed into underserviced, impoverished working-class peripheries devoid of basic municipal sanitation and public services (Duong, 2021). The model of urban development driven by BIC thus not only deepened socio-economic inequality but also physically codified racial and class segregation within the spatial landscape of colonial port cities (Gonjo, 1993).

2.3. Integrating Port Cities into Global Trade and Financial Networks

BIC's most profound impact on Vietnamese port cities was their systematic integration into global trade and financial networks controlled by French capital. Utilizing documentary credit facilities and foreign exchange guarantees, BIC established structural privileges tailored exclusively for major French export-import firms operating out of port gateways, such as Denis Frères and Descours et Cabaud (Thoral, 2012). Stringent credit terms and rigid collateral requirements denominated in Francs prevented Vietnamese and Chinese merchants from accessing international trade capital, effectively converting port cities into captive commercial enclaves for metropolitan trading conglomerates (Murray, 1980).

Furthermore, BIC branch offices in Saigon and Haiphong operated as primary regional foreign exchange hubs and financial arbitrage centers. BIC linked the Indochinese Piastre directly to major financial markets in Paris, Hong Kong, and Singapore (Lamarre, 1931). By managing international money flows and manipulating currency exchange parities between the Piastre, the Franc, and global silver standards at coastal gateways, BIC optimized trade settlement costs for French enterprises while engaging in currency speculation that yielded substantial financial returns (Gunn, 2014).

Through this port city network, BIC operated a systematic mechanism for siphoning colonial surplus value back to the metropole. Historical statistical data indicate that the vast

majority of maritime credit revenues, port trade dividends, and commercial profits generated in Saigon and Haiphong were repatriated directly to Paris financial institutions rather than being reinvested in local social infrastructure or public education (Scott, 1976). Under BIC's financial stewardship, Vietnamese port cities functioned primarily as imperial funnels designed for raw material extraction and metropolitan capital accumulation.

3. CONCLUSION

This study on the impact of the *Banque de l'Indochine* (BIC) on the development of port cities in Vietnam from 1875 to 1945 demonstrates that BIC functioned far beyond a conventional commercial credit institution; it was the primary financial engine shaping the spatial architecture and economic function of colonial coastal urban centers. By underwriting loans and channeling long-term preferential credit into deep-water port infrastructure, logistics warehousing, and port-hinterland transport networks, BIC transformed Saigon, Haiphong, and Tourane (Da Nang) into modern commercial and financial hubs in Southeast Asia (Meuleau, 1990). This infrastructural apparatus was engineered to maximize the extraction speed of primary agricultural and mineral commodities from the interior to coastal gateways bound for France, while facilitating the reciprocal inflow of metropolitan manufactures.

Beyond maritime infrastructure, BIC and its financial subsidiaries directly restructured urban space and driven land financialization. The monumental neo-classical headquarters of BIC situated at prime waterfront addresses anchored the formation of Central Business Districts (CBDs), stimulating capital accumulation in commercial real estate, luxury hospitality, and urban logistics (Brocheux & Hémery, 2009). However, BIC's urban development model severely exacerbated colonial spatial dualism: modern, well-serviced maritime and financial enclaves catering to European corporate capital stood in stark contrast to underserviced, impoverished peripheries inhabited by the indigenous working class and dockworkers.

Ultimately, BIC successfully integrated Vietnamese port cities into global trade and financial networks dominated by French capital. Utilizing documentary credit facilities, foreign exchange controls, and regional arbitrage hubs connecting Paris, Hong Kong, and Singapore, BIC consolidated commercial monopolies for metropolitan trading firms, precluded indigenous merchant capital, and operated a systematic mechanism for siphoning colonial surplus value back to the metropole (Murray, 1980). In sum, the *Banque de l'Indochine* was the quintessential institutional core of French financial imperialism, converting Vietnamese port cities into extractive funnels and leaving an enduring structural urban legacy throughout the twentieth century.

REFERENCES

Brocheux, P., & Hémery, D. (2009). *Indochina: An ambiguous colonization, 1858–1954*. University of California Press.

Duong, T. Q. T. (2021). *The Banque de l'Indochine in the process of French colonization in Vietnam (1875-1954)*. Doctoral dissertation in Vietnamese history. Ho Chi Minh City University of Education.

Giran, P. (1910). *De l'extension de la souveraineté française en Indochine: Du rôle de la Banque de l'Indochine* [On the extension of French sovereignty in Indochina: The role of the Banque de l'Indochine]. Imprimerie Nationale.

Gonjo, Y. (1993). *Banque de l'Indochine et imperialisme francais en Extreme-Orient (1875-1939)* [Banque de l'Indochine and French imperialism in the Far East (1875-1939)]. Éditions de la Maison des sciences de l'homme.

Gouvernement Général de l'Indochine. (1931). *Annuaire statistique de l'Indochine: 1913–1930* [Statistical yearbook of Indochina: 1913–1930]. Imprimerie d'Extrême-Orient.

Gunn, G. C. (2014). *Rice wars in colonial Vietnam: The Great Famine and the Viet Minh road to power*. Rowman & Littlefield.

Lamarre, M. (1931). *L'organisation monétaire et bancaire de l'Indochine* [Monetary and banking organization of Indochina]. Librairie Technique et Économique.

Meuleau, M. (1990). *Des pionniers en Extrême-Orient: La Banque de l'Indochine (1875-1975)* [Pioneers in the Far East: The Banque de l'Indochine (1875-1975)]. Éditions Fayard.

Murray, M. J. (1980). *The development of capitalism in colonial Indochina (1870–1940)*. University of California Press.

Norlund, I. (1991). The French empire in East Asia: Economic foundations of Indochina. In M. A. Prosper (Ed.), *Imperialism and colonial trade* (pp. 145–172). Routledge.

Robequain, C. (1944). *The economic development of French Indo-China*. Oxford University Press.

Scott, J. C. (1976). *The moral economy of the peasant: Rebellion and subsistence in Southeast Asia*. Yale University Press.

Thoral, M. (2012). Colonial credit and trade mechanisms in French Indochina. *Journal of Southeast Asian Economic History*, 40(2), 112–138.

Wright, G. (1991). *The politics of design in French colonial urbanism*. University of Chicago Press.

CAPITAL FLOW FROM BANQUE DE L'INDOCHINE TO FRENCH PLANTATION COMPANIES (1875-1945)

Dr. Duong To Quoc THAI
Lecturer in History, Faculty of Social Sciences Education, School of Education, Dong Thap University, Vietnam
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1929-3751

ABSTRACT

This paper analyzes the mechanisms and impacts of capital flows from the Banque de l'Indochine (BIC) into French plantation companies in Vietnam between 1875 and 1945. Drawing upon extensive archival records from the National Library of France (BNF/Gallica), historical financial reports, and colonial statistical data, this study examines how BIC operated as a central hub for long-term credit allocation, equity underwriting, and liquidity provision for colonial agro-industrial conglomerates, most notably rubber plantation companies in Cochinchina and the Central Highlands. The findings reveal that BIC transcended the function of a standard financial intermediary by acquiring controlling equity shares, thereby establishing a tightly integrated nexus between French banking capital and the plantation economy. Through preferential credit lines and control over agricultural export chains, BIC accelerated large-scale land concession, transforming traditional agrarian structures into a commercial monoculture serving the metropolitan market. Ultimately, this research demonstrates that BIC's capital injection was the crucial financial engine shaping the colonial plantation system and facilitating France's systematic resource extraction in Vietnam.

Keywords: *Banque de l'Indochine, Capital Flow, French Plantation Companies, Colonial Rubber, Vietnam (1875-1945).*

1. INTRODUCTION

In the history of French colonial exploitation in Indochina, plantation agriculture particularly rubber production served as one of the most vital economic pillars. The transformation of tens of thousands of hectares in Cochinchina and the Central Highlands into vast monocultural estates could not have occurred without the continuous financial backing of the *Banque de l'Indochine* (BIC). Established in 1875, BIC rapidly expanded beyond conventional commercial banking to function as the primary hub for long-term capital allocation and equity underwriting for French agro-industrial conglomerates (Gonjo, 1993; Meuleau, 1990). Investigating the capital flows from BIC to plantation companies not only clarifies the operational mechanics of French banking capital but also decodes how colonial finance reshaped Vietnam's agrarian economy between 1875 and 1945.

BIC's capital injections into the plantation sector were deployed through diverse financial instruments, ranging from short-term seasonal credit lines and export trade financing to bond underwriting and direct equity acquisition in major conglomerates such as the *Société Financière des Caoutchoucs* (SIPH) and the Michelin Rubber Company (Murray, 1980). This financial intervention forged a tight structural nexus between metropolitan high finance and the colonial plantation economy. By monopolizing credit channels, BIC provided liquidity and mitigated investment risks for French capitalists while accelerating large-scale land concessions, converting colonial agricultural commodities into primary exports bound for metropolitan industries (Brocheux & Hémery, 2009).

While existing historiography addresses broad economic aspects of colonial Indochina, the specific mechanisms of capital transfers between BIC and major plantation enterprises

require deeper empirical scrutiny using primary archival sources. Historical records housed at the National Library of France (BNF/Gallica) and BIC annual corporate reports yield critical empirical data regarding investment volumes, equity shares, and corporate strategies (Robequain, 1944). Utilizing these archival materials enables a comprehensive reconstruction of BIC's role as the indispensable financial backbone sustaining the hegemony of the colonial plantation economy.

This paper systematically analyzes the capital flows from the *Banque de l'Indochine* to French plantation companies in Vietnam from 1875 to 1945. Specifically, it addresses three core research questions:

- *First*, what financial instruments did BIC employ to channel capital into plantation enterprises?

- *Second*, how did these capital flows drive land concentration and restructure traditional agrarian production?

- *Third*, what was the broader significance of the bank-plantation alliance in consolidating French financial imperialism?

2. RESEARCH AND FINDINGS

2.1. Financial Mechanisms and Capital Injection Channels of BIC into Plantation Enterprises

The expansion of the colonial plantation economy in Vietnam from the late nineteenth century to the first half of the twentieth century was not a spontaneous process of capital accumulation, but rather the result of a systematic capital injection strategy coordinated by the *Banque de l'Indochine* (BIC). Established in 1875 as a colonial bank of issue and credit, BIC rapidly evolved into a multifunctional financial conglomerate, functioning as the primary capital pump for French agro-industrial enterprises (Gonjo, 1993). The mechanism of capital transmission from BIC to plantation companies was executed through three core financial channels: short-term commercial credit, long-term security underwriting, and direct controlling equity investments.

At the operational level, BIC supplied short-term working credit and seasonal crop advances (*avances sur récoltes*) that were indispensable for rubber, coffee, and tea plantations. Plantation production required lengthy capital gestation periods particularly rubber trees, which required five to seven years to reach tapping maturity creating severe liquidity pressures for planters. BIC bridged this barrier by extending working capital lines to purchase supplies, disburse wages, and finance export processing costs (Meuleau, 1990). Through its branch network in Saigon, Haiphong, and Phnom Penh, the bank monopolized foreign exchange settlements and documentary export credit bound for metropolitan markets, ensuring continuous liquidity for plantation enterprises.

At the strategic long-term level, BIC served as the primary underwriter for corporate stocks and bonds issued by major plantation conglomerates on the *Bourse de Paris*. Leveraging its institutional creditworthiness and colonial monopoly status, BIC guaranteed public capital raises from French retail investors, channeling metropolitan savings into colonial agriculture (Giran, 1910). Furthermore, BIC acted not merely as a financial intermediary but also as a direct holding entity by acquiring controlling equity stakes in leading agricultural syndicates. The bank systematically reinvested retained earnings to secure significant equity positions in massive plantation alliances, including the *Société Financière des Caoutchoucs* (SIPH), the *Compagnie des Caoutchoucs du Padang*, and the Michelin Rubber Company (Murray, 1980).

The institutional fusion of banking capital and agricultural capital forged a powerful "Bank-Plantation Complex." Archival records housed at the National Library of France (BNF/Gallica) reveal extensive interlocking directorates between BIC's board of directors and

the executive management of plantation firms. Executive board members of BIC frequently served simultaneously as chairmen or managing directors of major rubber syndicates (Lamarre, 1931). This cross-directorate network empowered BIC to directly supervise investment decisions, dictate export commodity pricing, and prioritize credit allocation toward affiliated corporate entities, establishing BIC as the supreme financial coordinator of the Indochinese plantation economy.

2.2. Impact of Capital Flows on Land Accumulation, Agrarian Transformation, and Labor Exploitation

The massive influx of capital from the *Banque de l'Indochine* into the agricultural sector induced profound socio-economic restructuring in Vietnam, most visibly manifested in large-scale land concentration. Backed by BIC's financial guarantee, French plantation corporations expropriated vast land tracts through the colonial land concession system (*concessions domaniales*). Bank credit enabled these enterprises to finance land clearance, penetrate virgin rainforests, and convert hundreds of thousands of hectares of fertile basaltic red soil in Cochinchina and the Central Highlands into enclosed rubber monocultures (Brocheux & Hémery, 2009). Land was thereby transformed from a communal means of production embedded in traditional village structures into a financial asset pledged as collateral for BIC bank loans, accelerating the financialization of agricultural land.

The intervention of banking capital accelerated the structural shift from a self-sufficient rice-based agrarian economy toward a monocultural export-oriented agrarian economy. BIC's concentration of financial resources into commercial export crops like rubber and coffee severely distorted regional economic structures. Traditional paddy cultivation areas were encroached upon or converted, undermining the food security of indigenous peasants (Gunn, 2014). Vietnamese agriculture became entirely subordinated to global commodity price fluctuations and credit decisions emanating from BIC's headquarters in Paris.

Heightened land concentration was inextricably linked to the expropriation and impoverishment of the Vietnamese peasantry. Tens of thousands of peasant families were dispossessed of their ancestral lands due to colonial land confiscation policies designed to facilitate plantation expansion (Robequain, 1944). Stripped of their means of production, this dispossessed rural labor force had little choice but to enter the indentured labor system (*mộ phu*). BIC capital, by financing the operational costs of recruitment agencies (*agences de recrutement*), directly sustained this coercive labor pipeline, converting tens of thousands of northern and central peasants into plantation laborers in the south.

Within the plantation domain, BIC's financial capital demanded maximum returns on investment, enforcing a brutally oppressive labor regime. Plantation management instituted coercive labor controls, extended working hours, slashed food rations, and inflicted corporal punishment to maximize latex yields at minimal wage costs (Scott, 1976). BIC credit lines were not merely monetary transactions; they operated as instruments of coercive labor discipline, transforming rubber plantations into "earthly hells" where the blood and physical stamina of indigenous workers were systematically extracted to guarantee corporate dividend payouts to bank shareholders in Paris (Duong, 2021).

2.3. Capital Accumulation, Surplus Value Siphoning, and Socio-Economic Consequences

The capital transfer pipeline from the *Banque de l'Indochine* to plantation companies established a closed circuit of capital accumulation that systematically siphoned surplus value generated in the colony back to the metropole. By controlling both credit inputs and export outlets, BIC and its allied plantation syndicates captured extraordinary super-profits. During the rubber boom of the 1920s, profit rates for French plantation companies routinely ranged

between 30% and 50% annually (Robequain, 1944). Rather than being reinvested to improve local living standards or construct civic infrastructure, the overwhelming majority of these profits were permanently repatriated to France via dividends, loan interest, and foreign exchange arbitrage (capital repatriation).

The absolute hegemony of BIC's capital established a monopolistic market structure that crushed small-scale Vietnamese-owned agricultural enterprises. Denied access to bank credit on preferential terms enjoyed by French firms, indigenous landowners were rapidly driven into bankruptcy or forced to liquidate their holdings to French corporate syndicates (Thoral, 2012). This created a starkly polarized colonial social structure: a small French financial capitalist elite wielding absolute economic power versus a vast majority of dispossessed Vietnamese laborers forced into an exploited plantation proletariat (proletarianization of indigenous peasantry).

Institutionally and architecturally, plantation capital flowing through the BIC system left a permanent mark on the colonial landscape. Revenue derived from rubber and agricultural exports financed the construction of extractive infrastructure, including seaports, railways, and monumental administrative architecture in Saigon and Hanoi (Wright, 1991). However, this represented a distorted, extroverted pattern of development designed exclusively to serve metropolitan interests, entirely detached from the organic developmental needs of the Vietnamese economy.

In conclusion, the financial nexus between the *Banque de l'Indochine* and plantation enterprises from 1875 to 1945 exemplifies the core mechanics of Financial Imperialism. BIC operated not simply as a credit institution, but as the institutional nerve center of the colonial extractive apparatus. BIC's capital flows converted Vietnamese land and labor into instruments for metropolitan capital accumulation in Paris, bequeathing a legacy of severe economic depletion and deep social dislocation factors that ultimately fueled the revolutionary anti-colonial movements across Indochina (Norlund, 1991).

3. CONCLUSION

The examination of capital flows from the *Banque de l'Indochine* (BIC) to French plantation companies between 1875 and 1945 illustrates the paramount role of financial capital in shaping the colonial economy of Vietnam. Rather than operating merely as a conventional commercial credit institution, BIC functioned as the primary capital pump and the central institutional nexus connecting metropolitan financial markets in Paris with the network of rubber, coffee, and tea plantations in Indochina (Gonjo, 1993). Through short-term commercial credit, security underwriting, and direct controlling equity investments, BIC established a closed capital transmission system that maximized capital accumulation for French agro-industrial conglomerates.

However, the financial success of BIC and its affiliated plantation enterprises came at a devastating socio-economic cost borne by the indigenous population. BIC capital flows directly underwrote large-scale land expropriation, dispossessing Vietnamese peasants of their traditional means of production and reorienting subsistence agriculture into a monocultural export-driven economy (Brocheux & Hémery, 2009). Furthermore, this financial apparatus financed and sustained the brutal indentured labor system (*mộ phu*), transforming plantations into sites of intense labor exploitation designed to extract extraordinary super-profits for shareholders in France (Murray, 1980).

The enduring legacy of these capital transfers was the creation of a distorted colonial economic structure entirely dependent on external markets and defined by the systematic repatriation of surplus value to the metropole. The institutional synergy between BIC and plantation syndicates exemplifies the essence of Financial Imperialism, wherein financial

resources were deployed not for sustainable local development, but as instruments of colonial dominance and extraction (Robequain, 1944). Decoding the operational mechanics of these capital flows not only offers critical insights into Vietnam's colonial financial history, but also provides a rigorous historical foundation for understanding the socio-economic catalysts that fueled the national liberation movements of the mid-twentieth century.

REFERENCES

Brocheux, P., & Hémery, D. (2009). *Indochina: An ambiguous colonization, 1858–1954*. University of California Press.

Duong, T. Q. T. (2021). *The Banque de l'Indochine in the process of French colonization in Vietnam (1875-1954)*. Doctoral dissertation in Vietnamese history. Ho Chi Minh City University of Education.

Giran, P. (1910). *De l'extension de la souveraineté française en Indochine: Du rôle de la Banque de l'Indochine* [On the extension of French sovereignty in Indochina: The role of the Banque de l'Indochine]. Imprimerie Nationale.

Gonjo, Y. (1993). *Banque de l'Indochine et imperialisme francais en Extreme-Orient (1875-1939)* [Banque de l'Indochine and French imperialism in the Far East (1875-1939)]. Éditions de la Maison des sciences de l'homme.

Gunn, G. C. (2014). *Rice wars in colonial Vietnam: The Great Famine and the Viet Minh road to power*. Rowman & Littlefield.

Lamarre, M. (1931). *L'organisation monétaire et bancaire de l'Indochine* [Monetary and banking organization of Indochina]. Librairie Technique et Économique.

Meuleau, M. (1990). *Des pionniers en Extrême-Orient: La Banque de l'Indochine (1875-1975)* [Pioneers in the Far East: The Banque de l'Indochine (1875-1975)]. Éditions Fayard.

Murray, M. J. (1980). *The development of capitalism in colonial Indochina (1870–1940)*. University of California Press.

Norlund, I. (1991). The French empire in East Asia: Economic foundations of Indochina. In M. A. Prosper (Ed.), *Imperialism and colonial trade* (pp. 145–172). Routledge.

Robequain, C. (1944). *The economic development of French Indo-China*. Oxford University Press.

Scott, J. C. (1976). *The moral economy of the peasant: Rebellion and subsistence in Southeast Asia*. Yale University Press.

Thoral, M. (2012). Colonial credit and trade mechanisms in French Indochina. *Journal of Southeast Asian Economic History*, 40(2), 112–138.

Wright, G. (1991). *The politics of design in French colonial urbanism*. University of Chicago Press.

THE BANQUE DE L'INDOCHINE: THE "SOUL" OF FRENCH FINANCIAL IMPERIALISM (1875 - 1945)

Dr. Duong To Quoc THAI
Lecturer in History, Faculty of Social Sciences Education, School of Education, Dong Thap University, Vietnam
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1929-3751

ABSTRACT

This paper examines the pivotal role of the Banque de l'Indochine as the institutional "soul" driving French colonial exploitation and economic dominance in Vietnam from 1875 to 1945. Utilizing extensive archival records from the National Library of France (BNF/Gallica) and official colonial repositories, this study demonstrates that the Banque de l'Indochine transcended its conventional mandate as a commercial bank and central bank of issue. Instead, it evolved into a powerful monopolistic conglomerate that effectively controlled strategic sectors of the colonial economy, including rubber plantations, mining, railways, and urban infrastructure. By maintaining an absolute monopoly over the issuance of the Indochinese Piastre, the Banque de l'Indochine synergized financial capital with colonial state power, epitomizing the mechanics of French financial imperialism. Through this dual leverage, the bank provided essential institutional support for French military pacification and state-building while systematically siphoning resources and labor from Vietnam. Ultimately, this research underscores that the Banque de l'Indochine functioned not merely as a financial intermediary, but as the primary engine steering the entire trajectory of French colonialism in Indochina.

Keywords: *Banque de l'Indochine, Financial Imperialism, French Colonization, Vietnam (1875-1945), Indochinese Piastre.*

1. INTRODUCTION

In the history of Western colonialism during the nineteenth and twentieth centuries, military expansion was invariably accompanied by economic subjugation mediated through colonial financial institutions. In Indochina, this process was profoundly shaped by the *Banque de l'Indochine* (BIC), a private banking institution established in 1875 under a decree of the French government. Transcending the functions of a conventional commercial bank, BIC rapidly emerged as the central coordinator of currency, credit, and investment across the entire Indochinese Union. The evolution of BIC epitomized the essence of "financial imperialism" a structure in which banking capital closely intertwined with the colonial state apparatus to maximize economic control and resource extraction from the subjugated territory (Lenin, 1917/1963; Meuleau, 1990). Examining BIC is therefore not merely an analysis of a financial entity, but a decoding of the institutional "soul" that directed the trajectory of French colonization in Vietnam from 1875 to 1945.

Granted the exclusive privilege of issuing the Indochinese Piastre, BIC held an absolute monetary monopoly for nearly a century. This statutory authority enabled the bank not only to manipulate foreign exchange rates and currency circulation, but also to intervene directly in the macroeconomic policies of the Governor-General of Indochina. By controlling liquidity distribution, BIC systematically prioritized credit allocation to metropolitan industrial conglomerates, major export-import trading houses, and extensive rubber and mining concessions (Gonjo, 1993; Norlund, 1991). Conversely, the indigenous economy and small-scale agrarian producers were marginalized, starved of formal capital, and forced into reliance on usurious credit networks, leaving them vulnerable to asset foreclosures during economic

downturns. This symbiotic alliance between French high finance and the colonial state established a continuous mechanism for siphoning capital and natural resources from Indochina back to the metropole.

Although existing historiography has addressed aspects of Indochina's colonial economy, BIC's definitive role as the driving engine of French financial imperialism warrants deeper empirical investigation through primary archival repositories. Historical collections housed at the National Library of France (BNF/Gallica) and national archives offer rich documentary evidence regarding the bank's investment portfolios, annual board reports, and corporate acquisition strategies (Brocheux & Hémery, 2009). Leveraging these primary materials allows for a rigorous reconstruction of how BIC converted financial capital into political and economic hegemony, illuminating the complex architecture of colonial exploitation established in Vietnam.

This study aims to critically analyze the operational structure, monetary policies, and investment strategies of the *Banque de l'Indochine* between 1875 and 1945. Specifically, it addresses three key research questions:

- *First*, how did BIC utilize its note-issuing monopoly and credit policies to establish financial dominance?

- *Second*, in what ways did BIC's capital allocation dictate the development of strategic economic sectors (plantations, infrastructure, and trade) in Vietnam?

- *Third*, what was BIC's broader role in advancing French financial imperialism and reshaping the colonial socio-economic structure?

By resolving these inquiries, this paper offers fresh insights into Vietnam's colonial economic history, reaffirming BIC's central position as the quintessential archetype of French financial imperialism.

2. RESEARCH AND FINDINGS

2.1. Monetary Monopoly and Institutional Manipulation

The consolidation of the *Banque de l'Indochine*'s (BIC) financial hegemony originated from the French Presidential Decree of January 21, 1875, which officially granted the bank an exclusive monopoly over banknote issuance in Cochinchina, subsequently extended across the entire Indochinese Union. Although initially incorporated as a private commercial joint-stock bank, this statutory monopoly over the issuance of the trade dollar (*Piastre de commerce*) effectively transformed BIC into the *de facto* colonial central bank of Indochina (Gonjo, 1993). By controlling the paper currency supply and precious metal reserves, BIC possessed the unmediated capability to dictate colonial monetary policy, unencumbered by the democratic oversight or strict institutional constraints imposed on the *Banque de France* in the metropole.

This monetary monopoly enabled BIC to manipulate foreign exchange rates and currency pegs strategically to maximize the profit margins of metropolitan financial capital. Throughout the late nineteenth and early twentieth centuries, as global financial markets oscillated between the Silver and Gold Standards, BIC artfully managed the parity between the Indochinese Piastre and the French Franc. Crucially, following the decision to tie the Piastre directly to the Franc at a fixed rate in 1930, BIC systematically offloaded inflationary pressures and macroeconomic risks from the metropole onto the indigenous economy (Meuleau, 1990). During metropolitan economic contractions, the overvalued Piastre rendered Vietnamese agricultural exports uncompetitive on international markets, bankrupting local agrarian producers and indigenous merchants while preserving the real value of repatriated capital returns for French investors (Brocheux & Hémery, 2009).

The longevity of this operational framework was reinforced by a symbiotic alliance between BIC's Board of Directors and the colonial administrative state. Archival records housed

at the National Library of France (BNF/Gallica) reveal an intricate network of interlocking directorates: numerous former Governors-General of Indochina, Governors of Cochinchina, and senior financial bureaucrats routinely transitioned into executive board positions at BIC upon retiring from public service. Conversely, BIC representatives maintained permanent seats on the supreme economic and financial advisory councils of the Governor-General (Lamarre, 1931). This institutional nexus epitomized state-monopoly capitalism, wherein colonial pacification policies and state infrastructure spending were directly aligned with the commercial interests and financial solvency of the bank (Robequain, 1944).

2.2. Capital Allocation and Hegemony in Strategic Sectors

Beyond its note-issuing authority, BIC converted its financial dominance into structural economic hegemony by directing long-term preferential capital allocation toward strategic colonial sectors. Most prominent was its subjugation of the plantation economy through direct financial underwriting of major French agro-industrial conglomerates, such as the *Société Financière des Caoutchoucs* (SIPH) and the Michelin Rubber Company. By acquiring controlling equity shares and floating corporate bonds, BIC facilitated the transformation of vast basaltic red-soil tracts in Cochinchina and the Central Highlands into vast export-oriented rubber monocultures serving metropolitan manufacturing industries (Murray, 1980). This formal credit architecture was entirely inaccessible to indigenous landowners, effectively forcing them into small-scale subsistence farming or bankruptcy under unequal competitive pressures.

In infrastructure and extractive industries, BIC functioned as the primary financial underwriter for strategic colonial infrastructure projects. The bank syndicated and directly injected capital into the Yunnan Railway construction (Haiphong to Yunnan), the deep-water port expansions in Saigon and Haiphong, and guaranteed credit lines for the *Société des Charbonnages du Tonkin* operating the coal mines of Quang Ninh (Norlund, 1991). These infrastructure projects were not designed for integrated domestic socio-economic development; rather, they were engineered as specialized colonial logistics corridors intended to accelerate the extraction and transport of mineral and agricultural raw materials to port gateways bound for France, while opening the local market to imported French industrial manufactures (Gunn, 2014).

BIC's economic dominance was further cemented through its commercial credit monopoly. Utilizing international trade settlement mechanisms and documentary credit facilities, BIC established preferential credit lines tailored exclusively for major French export-import firms, such as Denis Frères and Descours et Cabaud (Thoral, 2012). Stringent collateral criteria and foreign currency guarantee requirements constructed formidable financial barriers to entry, barring indigenous Vietnamese and Chinese merchant capital from participating in lucrative international trade circuits. Consequently, the entire colonial trade value chain remained locked within French corporate hands under BIC's financial stewardship (Brocheux & Hémery, 2009).

2.3. Socio-Economic Impacts: Capital Accumulation and Colonial Dispossession

BIC's institutional operations facilitated unprecedented metropolitan capital accumulation, as evidenced by historical financial statistics. Throughout the decades from 1890 to 1930, BIC consistently declared annual dividend yields to its Paris shareholders ranging from 15% to over 30% a rate of return substantially higher than contemporary commercial banking yields in Europe (Meuleau, 1990). This massive colonial surplus value was extracted directly from exploited Vietnamese labor and natural resources, systematically siphoned back to France to be reinvested across global financial markets. Financial accumulation in the metropole thus

directly mirrored the financial exhaustion and impoverishment of the colonial periphery (Giran, 1910).

In rural Vietnam, BIC engineered the dispossession of the peasantry operating through its specialized financial subsidiaries, most notably the *Crédit Hypothécaire Indochinois* (CHI). By deploying high-interest land mortgages with rigid foreclosure clauses, BIC and its subsidiaries financialized arable farmland. During the Great Depression (1929-1933), when global rice prices collapsed dramatically, tens of thousands of peasant households and smallholders defaulted on their debt obligations. BIC and CHI executed widespread mortgage foreclosures, triggering an unprecedented concentration of landholdings in the hands of the bank and colonial land corporations (Brocheux, 1995). Millions of Vietnamese peasants were dispossessed, transformed from smallholders into landless tenants or agricultural proletarians forced to sell their labor in rubber plantations and coal mines.

Collectively, BIC's financial mechanisms operated as the primary structural engine driving severe wealth polarization and enforcing rigid colonial socio-economic stratification. On one end stood a small enclave of French colonial capitalists, high-ranking bureaucrats, and comprador landlords who extracted wealth through BIC's credit system; on the other lay the vast majority of the indigenous laboring population pushed to subsistence margins (Scott, 1976). The model of financial imperialism orchestrated by BIC not only restructured Vietnam's economy into a dependent colonial enclave but also exacerbated deep class and national antagonisms, laying the structural groundwork for revolutionary upheavals and national liberation movements in the twentieth century (Gonjo, 1993).

3. CONCLUSION

This study of the *Banque de l'Indochine* (BIC) between 1875 and 1945 conclusively demonstrates that the bank functioned far beyond the mandate of a conventional commercial or note-issuing institution; it served as the definitive institutional "soul" steering the architecture of French financial imperialism in Vietnam and Indochina. Through its statutory monopoly over the Indochinese Piastre, strict foreign exchange controls, and strategic currency pegging to the French Franc, BIC established an absolute institutional hegemony. This monopolistic power enabled the bank to dictate credit allocation, offload inflationary shocks and global economic crises onto the indigenous population, and guarantee an uninterrupted flow of colonial surplus value back to the metropole for French investors (Meuleau, 1990).

Furthermore, BIC's capital allocation strategies profoundly restructured key economic sectors in Vietnam to align with metropolitan imperatives. By channeling long-term preferential credit into agro-industrial rubber conglomerates, extractive mining enterprises, and strategic transport-logistics infrastructure, BIC converted Vietnam into an enclave for raw material extraction and a captive market for French manufactured goods (Murray, 1980). The symbiotic alliance between French high finance and the administrative state apparatus under the Governor-General of Indochina epitomized state-monopoly capitalism, wherein public policies were systematically tailored to safeguard the financial privileges of colonial capital while suffocating the capital accumulation potential of indigenous producers.

Ultimately, the socio-economic impact of the financial imperialism engineered by BIC was severe wealth polarization and widespread agrarian dispossession. Operating through financial subsidiaries such as the *Crédit Hypothécaire Indochinois*, the bank deployed high-interest mortgages and aggressive foreclosures during economic downturns, dispossessing tens of thousands of peasant households and reducing them to impoverished landless tenants or proletarian laborers. The record-high capital accumulation celebrated in Paris directly mirrored the economic exhaustion and societal disruption in the colonial periphery. In sum, the *Banque*

de l'Indochine stood as the primary financial engine of French colonialism, leaving a profound and long-lasting socio-economic legacy in twentieth-century Vietnam.

REFERENCES

Brocheux, P. (1995). *The Mekong Delta: Ecology, economy, and revolution, 1860-1975*. University of Wisconsin-Madison Press.

Brocheux, P., & Hémery, D. (2009). *Indochina: An ambiguous colonization, 1858-1954*. University of California Press.

Duong, T. Q. T. (2021). *The Banque de l'Indochine in the process of French colonization in Vietnam (1875-1954)*. Doctoral dissertation in Vietnamese history. Ho Chi Minh City University of Education.

Giran, P. (1910). *De l'extension de la souveraineté française en Indochine: Du rôle de la Banque de l'Indochine* [On the extension of French sovereignty in Indochina: The role of the Banque de l'Indochine]. Imprimerie Nationale.

Gonjo, Y. (1993). *Banque de l'Indochine et imperialisme francais en Extreme-Orient (1875-1939)* [Banque de l'Indochine and French imperialism in the Far East (1875-1939)]. Éditions de la Maison des sciences de l'homme.

Gunn, G. C. (2014). *Rice wars in colonial Vietnam: The Great Famine and the Viet Minh road to power*. Rowman & Littlefield.

Lamarre, M. (1931). *L'organisation monétaire et bancaire de l'Indochine* [Monetary and banking organization of Indochina]. Librairie Technique et Économique.

Lenin, V. I. (1963). *Imperialism, the highest stage of capitalism: A popular outline*. Foreign Languages Publishing House. (Original work published 1917)

Meuleau, M. (1990). *Des pionniers en Extrême-Orient: La Banque de l'Indochine (1875-1975)* [Pioneers in the Far East: The Banque de l'Indochine (1875-1975)]. Éditions Fayard.

Murray, M. J. (1980). *The development of capitalism in colonial Indochina (1870–1940)*. University of California Press.

Norlund, I. (1991). The French empire in East Asia: Economic foundations of Indochina. In M. A. Prosper (Ed.), *Imperialism and colonial trade* (pp. 145-172). Routledge.

Robequain, C. (1944). *The economic development of French Indo-China*. Oxford University Press.

Scott, J. C. (1976). *The moral economy of the peasant: Rebellion and subsistence in Southeast Asia*. Yale University Press.

Thoral, M. (2012). Colonial credit and trade mechanisms in French Indochina. *Journal of Southeast Asian Economic History*, 40(2), 112-138.

CLIMATE CHANGE AND THE AGEING MIND: A REVIEW OF ECO-ANXIETY AND ENVIRONMENTAL DISTRESS AMONG OLDER ADULTS

Dr. Priya Choudhary
Assistant professor
Dr Pallavi Sachdeva
Assistant Professor
Department of lifelong learning, University of Jammu

Abstract
As the global climate crisis intensifies, its psychological toll is increasingly recognised as a public health concern, yet older adults remain a markedly understudied population within eco-anxiety research, despite facing distinct vulnerabilities. This review synthesises existing literature on eco-anxiety and environmental distress among older adults, examining how age-related factors such as cognitive changes, reduced mobility, health comorbidities, generational environmental attitudes and proximity to end-of-life reflection shape the experience and expression of climate-related psychological distress. Unlike younger cohorts, whose eco-anxiety is often future-orientated and tied to anticipatory loss, older adults may experience environmental distress through the lens of retrospective environmental change, intergenerational concern for descendants, and disruption to place attachment and lifelong routines. The review further explores protective and risk factors specific to this population, including social support networks, lived environmental memory, spirituality, and pre-existing mental health vulnerabilities, while critically evaluating the near-total absence of age-validated eco-anxiety measurement tools. This study is a review article that includes studies from 2025-2026. Articles were taken from Google Scholar and PubMed, WOS and other databases. Drawing on frameworks from environmental psychology, gerontology, and socioemotional selectivity theory, this review identifies significant gaps in both empirical research and clinical practice regarding older adults' climate-related mental health needs. Implications are discussed for geropsychology, environmental policy, and the development of age-sensitive assessment tools and interventions. This review calls for greater research attention to an overlooked but growing demographic facing the compounding psychological effects of environmental change and ageing.

Keywords: *Eco-Anxiety, Environmental Distress, Older Adults, Ageing, Climate Change, Geropsychology, Socioemotional Selectivity Theory*

FISCAL FEDERALISM AND SCHOOL EDUCATION: A COMPARATIVE STUDY OF EDUCATIONAL INFRASTRUCTURE AND SPENDING CAPACITIES IN NORTHERN AND SOUTHERN INDIA

Abhay Goel
Anisha Tigga
Ashwajit Gaikwad
Dorshita Phukan
Kashvi Bareja
Md. Shahanur Hosen
Pushkar Sharma
Shreya Sikdar
Vanshika Jindal

ABSTRACT Education is a part of the Concurrent List of the Indian Constitution; therefore, it is financed by center as well as the state governments. However, this budget is not fairly distributed among the states and there are also variations in the amount that states spend. Thus, it is necessary to analyze the allocations by center to different states and their spending of budget on the school education while paying importance to the issue of north and south divide which prevails within India's fiscal federalism. The study attempts to assess and generate findings by interconnecting the themes of fiscal federalism in India, structural and institutional capacities of states, educational infrastructure and development, and the impact of Covid 19. The paper presents quantitative, comparative and descriptive-analytical research design using secondary data (2018-2024). Mean, median, minimum, maximum, and standard deviation are used to measure central tendency and variability which are presented through graphical illustrations. It examines allocation and utilization of central government school education budgets across Indian states, state-wise analysis of the ten largest budget states, region wise analysis, comparative analysis of north versus south and the effects of COVID-19 pandemic. The findings reveal that there is a rise of 56.5% in national allocation for school education over six years. Nationally only 92.26% of allocated funds get spent where spendings of south are 94.71% and north are 91.19%. The northern states like Uttar Pradesh, Bihar have large allocations but a low spending percentage comparatively southern states like Tamil Nadu, Karnataka also have large allocations, but their spending percentages are higher. This indicates that only increase in the school education budget is not sufficient. To improve the educational infrastructure and institutional capacity, efficient utilization of funds should be there while trying to remove the constraint of regional disparity.

Keywords: Fiscal federalism, school education, infrastructure and institutional development, Covid-19 pandemic.

CLIMATE STABILITY AS AN ESSENTIAL DIMENSION OF THE AUTONOMOUS HUMAN RIGHT TO A HEALTHY CLIMATE: AN ANALYSIS OF ADVISORY OPINION OC-32/25 OF THE INTER-AMERICAN COURT OF HUMAN RIGHTS

Deilton RIBEIRO BRASIL
University of Itaúna (UIT)

ABSTRACT:
This paper examines climate stability as an essential dimension of the autonomous human right to a healthy climate recognized in Advisory Opinion OC-32/25 of the Inter-American Court of Human Rights. The general objective is to determine how protection of the global climate system defines the content and enforceability of this right. The specific objective is to identify the connections among climate stability, ecological balance, dangerous anthropogenic interference, intergenerational equity, and the right's individual and collective dimensions. The research problem asks whether this recognition permits the judicial protection of climate stability as an independently enforceable legal interest or whether it remains dependent on violations of other human rights. The hypothesis maintains that OC-32/25 provides foundations for the autonomous protection of climate stability, particularly in its collective dimension, whereas individual reparation requires proof that the State's failure to comply with its climate obligations caused direct harm. The hypothetical-deductive method starts from the premise that recognition of an autonomous right must generate specific State obligations and tests it against the Inter-American Court's reasoning. The methodological procedures consist of bibliographic and documentary research and a systematic and critical analysis of OC-32/25, Inter-American instruments, and the scientific and judicial sources incorporated into the Opinion. The preliminary results indicate that the Inter-American Court of Human Rights characterizes the global climate system as an essential component of the environment, distinguishes climate damage from other forms of environmental harm, and defines a healthy climate as one free from anthropogenic interference dangerous to humans and Nature. They also demonstrate that climate stability is inseparable from ecological balance and that its protection requires enhanced due diligence, effective mitigation, intergenerational equity, and remedies capable of safeguarding present and future humanity and Nature as a whole.

KEYWORDS: Climate stability; Human right to a healthy climate; Global climate system; Intergenerational equity; Advisory Opinion OC-32/25.

TABLE OF CONTENTS: 1. Background issues. 2. Climate stability as a constitutive dimension of the autonomous human right to a healthy climate. 3. The judicial enforceability of climate stability: enhanced due diligence, state obligations, and remedies. 4. Concluding remarks. 5. References.

1. BACKGROUND ISSUES.

The climate emergency represents one of the most complex challenges confronting contemporary systems of human rights protection. Its effects extend beyond environmental degradation and directly threaten life, health, water, food, housing, cultural identity, territorial integrity, and the conditions necessary for a dignified existence. Because climate change produces cumulative, transboundary, and potentially irreversible consequences, its legal treatment requires protection capable of encompassing not only individual interests but also

collective, intergenerational, and ecological dimensions. In this framework, climate stability becomes a fundamental condition for safeguarding human dignity, maintaining ecological balance, and preserving the conditions that sustain present and future life.

The relationship between climate protection and human rights acquired particular relevance in the Inter-American Human Rights System with Advisory Opinion OC-32/25, adopted by the Inter-American Court of Human Rights on May 29, 2025, in response to the request submitted by the Republic of Chile and the Republic of Colombia in January 2023. In this Opinion, the Inter-American Human Rights Court examined the scope of State obligations arising from the climate emergency and recognized the autonomous human right to a healthy climate. This recognition represents a significant development in Inter-American jurisprudence because it establishes climate protection as an independent legal interest rather than just an instrumental requirement for the protection of other conventionally recognized rights.

The Advisory Opinion OC-32/25 characterizes the global climate system as an essential component of the environment and defines a healthy climate by reference to the absence of dangerous anthropogenic interference affecting humans and Nature. From this perspective, climate stability is inseparable from ecological balance and from the preservation of the environmental conditions necessary for the continuity of life. The Inter-American Human Rights Court also attributes individual and collective dimensions to the right to a healthy climate. Its collective dimension protects present and future humanity and Nature as a whole, whereas its individual dimension concerns persons who are directly affected by failures to comply with State climate obligations. This distinction has important consequences for the determination of State responsibility, judicial enforceability, and the forms of reparation available for climate-related harm.

In the Brazilian constitutional system, this development must be examined in conjunction with Article 225 of the Federal Constitution of 1988, which recognizes everyone’s right to an ecologically balanced environment, regarded as a common good and essential to a healthy quality of life. The constitutional provision imposes upon the Government and the community the duty to defend and preserve the environment for present and future generations (Brazil, 1988). Although the constitutional text does not expressly recognize an autonomous right to a healthy or stable climate, the protection of ecological balance and essential ecological processes provides a normative foundation for climate protection. A climate system protected against dangerous anthropogenic interference may therefore be understood as a necessary condition for the effectiveness of the constitutional right to an ecologically balanced environment.

The intergenerational clause contained in Article 225 also converges with the reasoning developed in Advisory Opinion OC-32/25. Both frameworks recognize that environmental protection cannot be limited to immediate or exclusively individual interests. Climate obligations must consider the long-term consequences of governmental decisions, the unequal distribution of climate risks, and the rights and interests of generations that do not yet participate in political and judicial decision-making. The dialogue between the Brazilian Federal Constitution of 1988 and Advisory Opinion OC-32/25 consequently strengthens the interpretation that climate stability constitutes an essential dimension of environmental protection and human dignity.

Under these circumstances, the research problem is formulated as follows: does the recognition established by Advisory Opinion OC-32/25 permit the judicial protection of climate stability as an autonomous and independently enforceable legal interest, or does such protection remain dependent on proof of a violation of other human rights? The problem is particularly relevant because the autonomous nature of the right does not eliminate the difficulties associated with

attribution, causation, standing, the determination of State obligations, and the distinction between collective protection and individual reparation.

The research hypothesis maintains that Advisory Opinion OC-32/25 provides sufficient normative foundations for the autonomous protection of climate stability, particularly in the collective dimension of the human right to a healthy climate. Under this dimension, the protection of the global climate system does not necessarily depend on demonstrating harm to a specific individual, since the protected legal interest belongs to present and future humanity and encompasses Nature as a whole. On the other hand, recognition of individual responsibility and reparation requires evidence that the State's failure to comply with its climate obligations contributed to direct and identifiable harm suffered by the affected person or group.

The general objective of this research is to determine how the protection of the global climate system defines the normative content and enforceability of the autonomous human right to a healthy climate recognized in Advisory Opinion OC-32/25. Its specific objective is to identify and critically examine the connections among climate stability, ecological balance, dangerous anthropogenic interference, intergenerational equity, enhanced due diligence, and the individual and collective dimensions of this human right. The study does not seek to establish climate stability as a separate right disconnected from the Inter-American Human Rights Court's reasoning. Rather, it examines stability as a constitutive and legally enforceable dimension of the autonomous human right to a healthy climate.

The hypothetical-deductive method is adopted because the investigation begins with the general premise that recognition of an autonomous human right must generate specific, enforceable, and judicially reviewable State obligations. From this premise, the research derives the hypothesis that the protection of climate stability may be independently required in its collective dimension, while individual reparation remains subject to proof of causation and direct harm. The method is appropriate because it enables the legal consequences derived from this hypothesis to be tested against the premises, distinctions, obligations, and conclusions established by the Inter-American Human Rights Court. It therefore allows the research to move beyond a purely descriptive account of Advisory Opinion OC-32/25 and critically assess whether the Court's reasoning supports the proposed understanding of climate stability.

The methodological procedures follow a qualitative approach and consist of bibliographic and documentary research. Documentary research is centered on a systematic, interpretative, and critical analysis of Advisory Opinion OC-32/25, the American Convention on Human Rights, the Protocol of San Salvador, the American Declaration of the Rights and Duties of Man, the Brazilian Federal Constitution of 1988 - particularly Article 225 - and the relevant judicial and scientific sources incorporated into the Opinion. Bibliographic research encompasses specialized scholarship on international human rights law, environmental protection, climate constitutionalism, climate litigation, intergenerational equity, enhanced due diligence, and State climate obligations. These procedures make it possible to confront the theoretical premise and research hypothesis with the normative content of the applicable legal instruments and the interpretative reasoning developed by the Inter-American Human Rights Court.

The preliminary analysis indicates that Advisory Opinion OC-32/25 establishes a normative connection between climate stability, ecological balance, and the autonomous human right to a healthy climate. It also demonstrates that effective protection of this right requires enhanced due diligence, scientifically informed mitigation measures, intergenerational equity, access to justice, and remedies capable of protecting both individually affected persons and the collective interests of present and future humanity and Nature. The research therefore seeks to contribute to the legal understanding of climate stability as a judicially relevant interest and as an essential

requirement for the effective protection of human rights in the context of the climate emergency.

This interpretative framework also has significant implications for the judicial review of State climate action. Recognition of climate stability as a constitutive dimension of the right to a healthy climate does not require courts to replace the competent political and administrative authorities in formulating climate policies. It does, however, require judicial bodies to determine whether mitigation and adaptation measures are grounded in the best available scientific evidence, consistent with enhanced due diligence, effectively implemented, and capable of preventing serious or irreversible harm. Within the Brazilian constitutional order, the standards established by Advisory Opinion OC-32/25 reinforce the preventive and intergenerational dimensions of Article 225 of the Brazilian Federal Constitution of 1988 and provide a normative basis for reviewing legislative or administrative omissions, inadequate mitigation targets, the unjustified discontinuation of environmental policies, and failures to protect populations disproportionately exposed to climate risks. Climate stability may therefore operate simultaneously as a substantive standard for State conduct and as a judicial parameter for assessing the legality, reasonableness, effectiveness, and accountability of public climate policies.

DISCLAIMER: This investigation made restricted use of artificial intelligence (AI) tools exclusively as auxiliary support for grammatical revision, textual organization, technical translation, and terminological standardization. All analytical content, the formulation of the research problem and hypothesis, the selection and application of the hypothetical-deductive method, and the final considerations were independently developed by the author. All stages of the research process were conducted under human supervision, thereby ensuring scientific reliability, authorial responsibility, and the intellectual autonomy of the manuscript.

2. CLIMATE STABILITY AS A CONSTITUTIVE DIMENSION OF THE AUTONOMOUS HUMAN RIGHT TO A HEALTHY CLIMATE.

The recognition of climate stability as a legally protected interest is the result of a gradual convergence among international human rights law, international environmental law, and domestic constitutional law. Knox (2020, p. 81) observes that neither the Universal Declaration of Human Rights nor other United Nations human rights instruments originally recognized an express right to a healthy environment. Nevertheless, environmental human rights law developed through three converging paths: the adoption of autonomous environmental rights in regional treaties and national constitutions; the environmental interpretation, or “greening,” of established human rights; and the consolidation of procedural guarantees concerning information, participation, and access to justice. Within this evolution, the Protocol of San Salvador occupied a particularly important position because it was the first international treaty to formulate the right to live in a healthy environment as an individual human right (Knox, 2020, p. 82).

Formal recognition did not, however, automatically ensure direct international enforceability. Knox (2020, p. 84) points out that the Protocol of San Salvador did not make the right to a healthy environment directly reviewable by the Inter-American Commission or the Inter-American Court of Human Rights. This limitation initially encouraged the protection of environmental interests through the interpretation of other rights, particularly the rights to life, health, personal integrity, private life, information, participation, and judicial protection. The subsequent development of Article 26 of the American Convention gradually changed this framework. The Inter-American Court of Human Rights [IACtHR] (2025, p. 90, para. 239)

states that Article 26 has operated as the conventional basis for protecting several economic, social, cultural, and environmental rights, including the right to enjoy a healthy environment. The Court subsequently reiterates that this right is protected by Article 26 and is also normatively expressed in Article 11 of the Protocol of San Salvador (IACtHR, 2025, p. 99, para. 270).

This construction is essential to understanding the relevance of Advisory Opinion OC-32/25. Borràs-Pentinat (2025, p. 2) explains that the Opinion originated in the joint request submitted by Chile and Colombia on January 9, 2023, was adopted on May 29, 2025, and was publicly presented on July 3, 2025. The request sought clarification regarding the scope of State obligations in responding to the climate emergency within the framework of international human rights law. Although advisory opinions are not formally binding in the same manner as contentious judgments, the author emphasizes their authoritative interpretative character and their significant influence on domestic legislation, judicial reasoning, and the control of conventionality. Within this framework, Borràs-Pentinat (2025, p. 4) characterizes OC-32/25 as a decisive turning point because it connects human rights, the protection of Nature, and climate justice within a specifically climate-oriented normative framework.

The principal innovation of OC-32/25 lies in the legal differentiation of the global climate system. The Inter-American Human Rights Court defines that system as the set of components that interact to determine the planet's climate and considers it an essential part of the environment because multiple processes indispensable to the preservation of life depend upon its proper functioning. Accordingly, interference with the climate system constitutes a particular form of environmental damage. Climate damage is also inherently transboundary because its effects cannot remain confined to the territory of the State that contributed to its production (IACtHR, 2025, p. 109, para. 295). This characterization transforms climate stability from an exclusively scientific or political objective into a legally protected interest connected to the effective enjoyment of human rights.

The Opinion OC-32/25 nevertheless preserves the connection between the climate system and the broader environment. The Inter-American Human Rights Court states that the right to a healthy climate derives from the right to a healthy environment because it protects the environmental component directly affected by the climate emergency: the global climate system (IACtHR, 2025, p. 109, para. 297). At the same time, the Inter-American Human Rights Court explains that the climate system performs distinctive global functions and possesses specific dynamics that justify treating its protection as an autonomous objective within environmental law. Climate damage must therefore be distinguished from other forms of environmental harm, including pollution and biodiversity loss, even though these phenomena remain closely interconnected (IACtHR, 2025, p. 110, para. 299).

On this basis, OC-32/25 recognizes the human right to a healthy climate as an independent right derived from the right to a healthy environment. Its derivative origin does not eliminate its autonomy. Instead, autonomy performs a functional role by providing the Inter-American legal order with a specific basis for identifying State obligations arising from the climate crisis and demanding compliance with them independently from other environmental duties. The Court defines a healthy climate as one resulting from a climate system free from anthropogenic interference that is dangerous to human beings and Nature as a whole (IACtHR, 2025, p. 110, para. 300). The relevant legal standard is therefore not an expectation of complete climatic immutability, since the climate is naturally variable, but protection against dangerous anthropogenic disruption of the conditions necessary for ecological balance and the continuity of life.

This formulation gives climate stability legally relevant content. Stability should not be interpreted as the absolute absence of climatic variation, but as the maintenance of the functional conditions of the climate system within limits compatible with human rights, ecosystem integrity, and the preservation of Nature. In this regard, Borràs-Pentinat (2025, p. 6) understands the recognition of the right to a healthy climate as one of the OC-32/25's most significant contributions because it permits a more precise delimitation of climate-specific obligations. Her interpretation converges with the Inter-American Human Rights Court's reasoning: the right remains connected to the right to a healthy environment, but possesses sufficient normative specificity to support autonomous protection against dangerous interference with the global climate system.

The autonomy of this right also clarifies its individual and collective dimensions. In its collective dimension, the right protects the shared interest of present and future generations of human beings and other species in maintaining a climate system capable of ensuring their well-being and mutual balance. Failure to comply with international obligations concerning the global climate system necessarily affects this collective interest and may generate State responsibility. Measures intended to cease the violation, prevent its recurrence, and remedy its consequences must therefore benefit present and future humanity and Nature as a whole (IACtHR, 2025, p. 111, para. 302). This collective dimension supports the judicial relevance of climate stability even when climate damage cannot be attributed exclusively to an individualized victim.

The individual dimension operates according to a more specific causal structure. It protects every person's ability to live and develop within a climate system free from dangerous anthropogenic interference. A violation occurs when a State's failure to comply with its climate obligations not only affects the global climate system but also causes direct harm to the rights of one or more identifiable persons. In such cases, international responsibility entails the duty to provide full reparation for the damage suffered (IACtHR, 2025, p. 111, para. 303). OC-32/25 thus distinguishes the collective impairment of the climate system from individualized injury without reducing climate protection to violations of other substantive rights. Climate stability is protected collectively as a shared legal interest, while individual reparation depends upon proof of direct harm resulting from State noncompliance.

The autonomous character of the right was not adopted without disagreement. Borràs-Pentinat (2025, p. 7) reports that the dissenting opinion of Judge Patricia Pérez Goldberg questioned the existence of a sufficient legal basis for creating an autonomous right to a healthy climate. According to that position, climate protection should remain within the substantive dimension of the right to a healthy environment, since the proliferation of rights could fragment existing standards and weaken legal protection. The majority's reasoning responds to this concern by treating the right to a healthy climate as both derivative and independent: it derives from the right to a healthy environment but acquires autonomous significance because the urgency, global reach, scientific complexity, and distinctive consequences of climate disruption require a specific legal framework. Autonomy does not sever the relationship between climate and environment; rather, it organizes and strengthens the legal consequences arising from that relationship.

The OC-32/25 further connects climate stability with ecological balance and the protection of Nature. The Inter-American Human Rights Court recognizes that anthropogenic interference with the climate system affects natural cycles, ecosystems, and the multiple forms of life that constitute Nature. Protecting the right to a healthy climate therefore requires a systemic understanding of the interrelationships sustaining life on Earth. The integrity of the global climate system depends upon the protection of ecosystems and their living and non-living

components, while ecological functionality depends upon climatic conditions compatible with life. This reciprocal interdependence between climate stability and ecological balance requires an integrated legal approach capable of harmonizing human rights and the rights of Nature through the *pro persona* and *pro natura* principles (IACtHR, 2025, p. 115, paras. 314-315).

This Inter-American development also enters into dialogue with Brazilian climate constitutionalism. Brasil *et al.* (2024, p. 12) explain that Article 225 of the Brazilian Federal Constitution of 1988 establishes the fundamental right to an ecologically balanced environment for present and future generations and imposes a binding duty of protection upon public authorities. Their analysis of Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept No. 708/DF demonstrates that environmental protection is not subject to unrestricted governmental discretion and that constitutional principles must be interpreted together with Brazil's international climate commitments. This interpretative openness supports the recognition of a fundamental right to a balanced climate and strengthens judicial supervision of governmental omissions.

Brasil *et al.* (2024, p. 15) conclude that the Brazilian Supreme Federal Court's decision in Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept No. 708/DF advanced climate constitutionalism by understanding that the protection of a healthy environment includes the guarantee of a balanced climate. The decision also affirmed an active State duty to adopt effective mitigation measures and rejected the possibility of regression in environmental and climate policies. Significantly, OC-32/25 itself refers to Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept No. 708/DF when discussing domestic judicial recognition that climate protection derives from the duty to protect the environment and that the consequences of global warming threaten human survival (IACtHR, 2025, p. 111, para. 301). The Brazilian experience and the Inter-American OC-32/25 therefore reveal a reciprocal interpretative movement: domestic constitutional jurisprudence contributes to regional human rights reasoning, while regional standards reinforce the constitutional foundations of national climate protection.

The analysis consequently indicates that OC-32/25 provides a normative basis for treating climate stability as a distinct and judicially relevant legal interest. Its protection is not dependent upon establishing a simultaneous violation of another human right in the collective sphere, although individual reparation requires proof that State noncompliance caused direct injury. The right to a healthy climate therefore combines derivative origin, normative autonomy, collective protection, individual enforceability, intergenerational equity, and ecological integrity. Having established the content and protected interests of this right, the next stage of the research must examine the specific obligations arising from it, particularly enhanced due diligence, scientifically informed mitigation, ecosystem protection, progressive sustainable development, access to justice, and effective remedies. As the Inter-American Human Rights Court indicates, the general obligations of the American Convention and the Protocol of San Salvador are translated, in the climate emergency, into concrete duties directed toward the protection of the global climate system and the effective guarantee of the right to a healthy climate (IACtHR, 2025, p. 116, paras. 317-320).

Thus, the next subsection shifts the analysis from the normative recognition of the right to a healthy climate to the concrete obligations required for its effective implementation. The autonomy affirmed in OC-32/25 acquires practical significance only insofar as it can be translated into identifiable standards for assessing State action and omission. Borràs-Pentinat (2025, pp. 5-6) organizes these obligations into substantive, procedural, and intersectional dimensions, encompassing climate mitigation, adaptation, prevention, ecological restoration, access to information, public participation, access to justice, and reinforced protection for individuals and groups exposed to disproportionate climate risks. This framework makes it

possible to examine how enhanced due diligence, reliance on the best available scientific evidence, intergenerational equity, international cooperation, and effective remedies transform climate protection from a predominantly programmatic commitment into a legally reviewable State obligation. The following subsection will therefore assess whether these duties provide adequate mechanisms for protecting the global climate system, preventing climate-related human rights violations, addressing governmental omissions, and ensuring appropriate remedies in both the collective and individual dimensions of the right to a healthy climate.

3. THE JUDICIAL ENFORCEABILITY OF CLIMATE STABILITY: ENHANCED DUE DILIGENCE, STATE OBLIGATIONS, AND REMEDIES.

The recognition of a healthy climate as an autonomous human right has important consequences for the identification of State obligations and their judicial enforceability. The Inter-American Court of Human Rights (IACtHR, 2025, paras. 300-303, pp. 110-111) considers that the distinct characteristics of the global climate system justify its recognition as a specific object of legal protection and define a healthy climate as one free from anthropogenic interference dangerous to humans and Nature. This right encompasses both collective and individual dimensions. Collectively, it protects the interest of present and future generations, other species, and Nature in maintaining a climate system capable of sustaining life and ecological balance. Individually, it protects each person against climate-related harm that compromises the exercise of other human rights. This distinction is relevant because it permits the autonomous judicial protection of the global climate system while preserving the requirement of direct harm when individual reparation is sought.

The substantive content of this right is informed by the general obligation to guarantee human rights and by the standard of enhanced due diligence. According to the IACtHR (2025, paras. 225-237, pp. 85-89), States must organize their institutions and coordinate the activities of all branches of government to reduce the risks arising from both the degradation of the global climate system and the exposure and vulnerability of individuals and communities. Although due diligence is generally an obligation of conduct, its application in the climate emergency must be proportionate to the seriousness, urgency, and potentially irreversible character of climate damage. Enhanced due diligence therefore requires comprehensive risk assessments, proactive and ambitious preventive measures, reliance on the best available science, the incorporation of a human rights perspective, continuous monitoring, respect for procedural rights, adequate corporate regulation, and international cooperation.

When examining the incorporation of these standards into the Brazilian legal order, Cabral and Fontenele (2026, p. 13) observe that the State's duty to guarantee a healthy climate entails the adoption of all measures necessary to reduce climate risks and vulnerabilities. The authors identify mitigation and adaptation as binding duties and argue that these obligations have also acquired an express constitutional dimension in Brazil. Their analysis complements OC-32/25 by demonstrating that the Inter-American standard is not confined to the international sphere: it can guide the interpretation of constitutional, statutory, administrative, and public-policy obligations within domestic law. Consequently, climate protection cannot be treated solely as a matter of political convenience, since public authorities remain legally responsible for adopting measures capable of protecting the global climate system and the persons exposed to its degradation.

Mitigation represents the first major category of substantive obligations. The Inter-American Human Rights Court establishes that States must reduce greenhouse gas emissions, protect carbon sinks, define mitigation targets, maintain an updated human-rights-based strategy, regulate corporate conduct, monitor compliance, and require adequate environmental impact

assessments. Mitigation targets must reflect the highest possible level of ambition, be established in binding rules, contain specific deadlines, and be progressively strengthened. The global effort to limit warming to 1.5°C constitutes a minimum starting point for determining State action rather than a guarantee that all climate-related risks will be eliminated. Targets must also be based on the best available science, historical and current contributions to climate change, State capabilities, and intra- and intergenerational equity (IACtHR, 2025, paras. 321-335, pp. 116-120). Thus, States retain a margin to determine the means through which mitigation will be achieved, but this discretion is limited by scientific evidence, human rights, progressivity, and the prohibition of insufficient or unjustified regressive measures.

Adaptation constitutes a complementary obligation because some consequences of climate change are already unavoidable. OC-32/25 requires States to define and continually update national adaptation plans. Although the implementation of adaptation measures may be progressive, the obligation to adopt and update the plan is immediately enforceable. Such plans must seek to reduce vulnerability, strengthen the resilience of people, communities, and ecosystems, and address both immediate needs and the structural causes of climate vulnerability. They must include short, medium, and long-term measures, climate-risk assessments, disaster-prevention strategies, social-protection measures, adequate resources, monitoring mechanisms, and periodic revision based on scientific progress and changing circumstances (IACtHR, 2025, paras. 384-390, pp. 135-137). Mitigation and adaptation are therefore legally interconnected: mitigation addresses the causes of climate destabilization, while adaptation protects people and ecosystems against impacts that can no longer be entirely prevented.

The effectiveness of these obligations depends on the incorporation of equality and climate justice into public decision-making. The Inter-American Human Rights Court determines that differentiated measures are necessary to ensure genuine equality in the enjoyment of human rights, particularly because climate change disproportionately affects children and adolescents, indigenous peoples, tribes, Afro-descendant and peasant communities, women, persons with disabilities and older persons, among others (IACtHR, 2025, para. 596, p. 214). Enhanced due diligence consequently requires States to identify the specific vulnerabilities of different populations and to avoid climate policies that reproduce or deepen existing inequalities.

This differentiated approach is supported by the analysis of Brasil and Lopes (2021, pp. 5-6), who demonstrate that climate change, environmental degradation, and the growing scarcity of essential resources may compromise life, security, food, housing, and the continued habitability of affected territories. They also emphasize that poorer communities are frequently more exposed because of their economic dependence on local ecosystems and their reduced capacity to respond to disasters. In this regard, the vulnerability examined by the authors supplies a concrete illustration of why formally uniform climate measures may be insufficient. Their analysis of environmentally induced displacement further reveals that the failure to adopt preventive and adaptive policies may compel individuals and communities to abandon their places of origin.

Brasil and Lopes (2021, pp. 14-15) identify a significant normative gap in the international protection of persons displaced by environmental and climate-related factors and advocate preventive measures, an integrated legal response, and greater legal certainty. Drawing on the Ioane Teitiota case, the authors observe that persons fleeing the effects of climate change and natural disasters should not be returned to their countries of origin when such return would place their basic human rights at risk. This analysis finds a more specific normative development in OC-32/25, which requires States, under a standard of enhanced due diligence, to adopt measures aimed at preventing forced migration and displacement caused directly or

indirectly by climate disasters and other climate-related impacts. Such measures must protect livelihoods, food and water security, adequate housing, and other human rights and must be integrated into sustainable-development policies, mitigation strategies, and adaptation plans (IACtHR, 2025, paras. 422-424, p. 150). When preventive measures prove insufficient, States must establish regulatory, public-policy, institutional, and budgetary instruments addressing involuntary mobility, together with guarantees of information, participation, safe relocation or return, humanitarian protection, regional cooperation, appropriate migratory categories, and protection against *refoulement* (IACtHR, 2025, paras. 425-434, pp. 151-155). Accordingly, the protection of climate-displaced persons cannot be confined to humanitarian assistance after displacement has occurred; it must combine prevention, mitigation, adaptation, risk reduction, legal protection, and measures addressing the structural vulnerabilities that intensify climate-related mobility.

Judicial enforceability is strengthened by the procedural guarantees established in OC-32/25. States must provide effective judicial and administrative remedies, adequate resources for adjudicatory institutions, specialized training for judges and other legal professionals, access to the best available scientific knowledge, reasonable procedural time frames, and free proceedings for persons unable to bear litigation costs. Climate proceedings must be governed by the *pro actione* principle, and standing rules must be interpreted broadly in collective cases, without requiring proof of an individual interest or individualized injury. In individual claims, courts must assess standing flexibly, considering exposure, geographic location, adaptive capacity, and structural inequality. The complexity of climate causation also requires flexible evidentiary standards, access to satellite and scientific evidence, procedural cooperation, and, when appropriate, presumptions of causation or reversal of the burden of proof (IACtHR, 2025, paras. 540-557, pp. 196-200).

Lazzaretti and Carvalho (2023, pp. 152-154) situate climate litigation within a broader transition from disputes predominantly focused on domestic regulatory compliance to claims grounded in fundamental rights, constitutional provisions, international commitments, precaution, and intergenerational equity. They present climate litigation as a form of governance capable of pressuring or incentivizing governments and private entities to modify their conduct and of encouraging more effective mitigation and adaptation policies. This analysis converges with OC-32/25 in the sense that as judicial protection is not confined to awarding compensation after climate damage has occurred. The Opinion establishes reviewable obligations concerning the adoption and progressive updating of binding mitigation targets, the formulation and implementation of human-rights-based strategies, and the justification of State decisions (IACtHR, 2025, paras. 331-336, pp. 119-121). It also recognizes that the obligation to define and update a national adaptation plan is immediately enforceable (IACtHR, 2025, para. 384, p. 135) and requires active transparency regarding mitigation, adaptation, climate risks, and implementation measures (IACtHR, 2025, paras. 488-518, pp. 177-188). Domestic authorities must apply these standards through the appropriate exercise of conventionality control (IACtHR, 2025, para. 560, p. 201).

Judicial intervention must nevertheless remain legally reasoned and institutionally proportionate. Lazzaretti and Carvalho (2023, p. 154) acknowledge the expanded role of the judiciary in the protection of fundamental rights but warn against judicial decisions based on discretion without adequate standards of rationality. This caution is consistent with OC-32/25, which clarifies that it is not the Inter-American Human Rights Court's function to determine quantitatively how each relevant factor should affect a State's mitigation target. Nevertheless, the qualitative assessment of those factors, the adoption and progressive updating of the most ambitious possible target, and the adequate justification of State decisions constitute positive

and judicially relevant obligations (IACtHR, 2025, para. 332, p. 119). Cabral and Fontenele (2026, p. 24) similarly maintain that judicial intervention is legitimate when policies aimed at protecting fundamental rights are absent or deficient and that courts may require public authorities to present an appropriate plan or adequate measures. Their conclusion further specifies that the violation, absence, or serious deficiency of measures implementing the right to a healthy climate may legitimate judicial intervention (Cabral & Fontenele, 2026, p. 26). Judicial enforceability therefore operates as a safeguard against State omission and manifest insufficiency while preserving the legitimate institutional authority of public bodies to select the technical means through which duly justified climate policies will be implemented.

Finally, the legal consequences of a violation depend on the dimension of the right invoked. In its collective dimension, the degradation of the global climate system may generate State responsibility even without proof that a specific individual has suffered exclusive or individualized harm. Remedies must then benefit present and future humanity and Nature as a whole. In its individual dimension, however, full reparation depends on demonstrating that the State's failure to comply with its climate obligations caused direct harm to one or more persons. Even in these cases, OC-32/25 recognizes that conventional standards of causation cannot be applied so rigidly that they render climate claims impossible. Courts may consider scientific evidence of significant risk, effective exposure, evidentiary asymmetries, and presumptions connecting greenhouse gas emissions, climate degradation, and harm (IACtHR, 2025, paras. 303 and 552-559, pp. 111 and 199-201).

The analysis confirms the hypothesis that OC-32/25 provides a legal foundation for the autonomous enforceability of climate stability, particularly in its collective dimension. This enforceability is expressed through judicially reviewable obligations concerning prevention, mitigation, adaptation, information, participation, access to justice, and reparation. At the same time, the Opinion establishes a differentiated standard for individual reparation: it requires demonstration that the State's failure to comply with its climate obligations resulted in direct harm to one or more persons, while permitting evidentiary flexibility in establishing causation, given the scientific and factual complexity of climate damage. Climate stability therefore emerges not as an abstract political aspiration but as a legally protected interest capable of guiding public policy, limiting State discretion, and supporting judicial remedies designed to protect individuals, communities, present and future generations, and Nature.

4. CONCLUDING REMARKS.

This research examined climate stability as an essential dimension of the autonomous human right to a healthy climate recognized by the Inter-American Court of Human Rights in Advisory Opinion OC-32/25. The analysis demonstrated that the climate emergency cannot be addressed exclusively as an environmental policy issue or as a matter left to broad governmental discretion. Because climate degradation directly and indirectly affects life, health, water, food, housing, cultural identity, territorial integrity, equality, and human dignity, the protection of the global climate system must also be understood as a legal requirement arising from international human rights law.

Concerning to the general objective, the study concludes that the protection of the global climate system defines both the substantive content and the enforceability of the autonomous human right to a healthy climate. This protection requires the maintenance of climatic conditions that are not subject to dangerous anthropogenic interference capable of threatening human beings, ecosystems, other species, and Nature. Climate stability should not be understood as the complete immutability of climatic conditions, but as the preservation of the essential functions of the global climate system within limits compatible with human rights,

ecological integrity, and the continuity of life. Its legal content therefore encompasses substantive and procedural State obligations relating to prevention, mitigation, adaptation, information, public participation, access to justice, cooperation, monitoring, and reparation.

The specific objective was also achieved, as the research identified a close normative relationship among climate stability, ecological balance, dangerous anthropogenic interference, intergenerational equity, and the individual and collective dimensions of the right to a healthy climate. Climate stability and ecological balance are interdependent because significant disturbances in the global climate system affect ecosystems, biodiversity, water cycles, food production, territories, and the material conditions necessary for the exercise of human rights. Intergenerational equity reinforces this connection by requiring States to consider not only present impacts but also the cumulative, long-term, and potentially irreversible consequences of their actions and omissions for future generations and Nature.

The research problem can therefore be answered affirmatively, although with an important qualification. Advisory Opinion OC-32/25 permits climate stability to be judicially protected as an independently enforceable legal interest, particularly in its collective dimension, without requiring the simultaneous demonstration of a violation of another human right. In this collective dimension, the preservation of a stable and functional climate system protects present and future humanity, other species, and Nature as a whole. However, when individual reparation is sought, the claimant must demonstrate that the State's failure to comply with its climate obligations caused direct harm to one or more identifiable persons. This requirement does not exclude evidentiary flexibility, presumptions, or adjustments to the burden of proof when justified by the scientific complexity, cumulative nature, and multiple causal factors associated with climate damage.

As a result, the research hypothesis is confirmed. OC-32/25 provides sufficient normative foundations for the autonomous protection and judicial enforceability of climate stability, especially as a collective legal interest. At the same time, it preserves a differentiated standard for individual claims by requiring evidence of direct harm and a legally relevant causal connection with State action or omission. The Opinion thus establishes a coherent relationship between the autonomous nature of the right, the collective protection of the global climate system, and the procedural requirements applicable to individual reparation.

The hypothetical-deductive method was essential to reaching these findings. Starting from the premise that the recognition of an autonomous human right must generate specific and reviewable State obligations, the research tested whether the reasoning developed in OC-32/25 supported that proposition. This method made it possible to move beyond a merely descriptive presentation of the Advisory Opinion and to critically assess whether its normative premises lead to concrete consequences for public policy, State responsibility, and judicial protection. The hypothesis was therefore not treated as an assumption, but was confronted with the Inter-American Human Rights Court's reasoning concerning the climate emergency, enhanced due diligence, the global climate system, intergenerational equity, access to justice, and the individual and collective dimensions of environmental rights.

The methodological procedures were equally important. Bibliographic and documentary research, combined with the systematic and critical analysis of OC-32/25, Inter-American human rights instruments, scientific and judicial sources, the Brazilian Federal Constitution of 1988, and relevant academic literature, enabled the identification of both normative convergences and unresolved tensions. This methodological approach clarified the transition from the general protection of a healthy environment to the specialized recognition of a human right to a healthy climate. In the Brazilian context, Article 225 of the Federal Constitution of 1988 provides an especially significant basis for this interpretative dialogue because it protects

an ecologically balanced environment for present and future generations and imposes corresponding duties on public authorities and the community.

The findings of the research are nevertheless subject to empirical limitations. The investigation is predominantly normative, bibliographic, and documentary and does not include a systematic empirical mapping of judicial decisions issued after OC-32/25, interviews with judges, policymakers, scientists, affected communities, or representatives of civil society, or quantitative indicators concerning the implementation of mitigation and adaptation policies. Because the Advisory Opinion is recent, its reception by domestic courts, administrative authorities, and legislative institutions is still developing. Consequently, the research demonstrates the existence and content of the applicable legal foundations but does not measure their practical effectiveness or establish whether they are being uniformly implemented by the States of the Inter-American system. Differences among national legal systems, institutional capacities, economic conditions, and levels of climate vulnerability also limit the generalization of conclusions regarding domestic enforcement.

In propositional terms, the recognition developed in OC-32/25 should be accompanied by institutional measures capable of transforming normative standards into effective climate governance. States should establish binding and scientifically informed mitigation targets, clear implementation timelines, periodic review mechanisms, adequate financial resources, and independent monitoring systems. National adaptation plans should be immediately formulated, regularly updated, and designed according to the specific vulnerabilities of individuals, communities, territories, ecosystems, and future generations. Climate policies should also incorporate human rights and environmental impact assessments, active transparency, public participation, and accessible mechanisms for monitoring State compliance.

Access to climate justice should be strengthened through broad standing in collective proceedings, application of the pro actione principle, reasonable evidentiary flexibility, qualified scientific assistance, judicial training, and effective remedies. Judicial protection should not be restricted to monetary compensation after climate damage has occurred. Depending on the circumstances, remedies may include the adoption or revision of mitigation targets, the implementation of adaptation plans, ecosystem restoration, the disclosure of climate information, the protection of displaced or vulnerable communities, guarantees of non-repetition, and continuous judicial or institutional monitoring. Such intervention must remain legally reasoned and institutionally proportionate, respecting the legitimate sphere of public policymaking while preventing omission, arbitrariness, regression, or manifestly insufficient climate action.

In Brazil, the standards established by OC-32/25 should inform the interpretation of Article 225 of the Brazilian Federal Constitution of 1988 and the review of climate-related State action and omission. Public authorities should integrate climate stability into environmental licensing, territorial planning, disaster-risk management, energy policy, infrastructure investment, and the protection of Indigenous Peoples, traditional communities, children and adolescents, older persons, impoverished people, and environmentally displaced populations. Future research should empirically investigate the domestic reception of OC-32/25, compare judicial responses in different Inter-American jurisdictions, assess the effectiveness of climate remedies, and develop indicators for evaluating compliance with enhanced due diligence.

Climate stability therefore emerges as neither an abstract political aspiration nor just an indirect condition for the enjoyment of other rights. It constitutes a legally protected interest that gives concrete meaning to the autonomous human right to a healthy climate, guides public policy, limits State discretion, and supports judicial remedies. Its effective protection requires coordinated action by legislatures, public administrations, courts, scientific institutions, and

civil society, directed toward safeguarding individuals, communities, present and future generations, other species, and Nature in the context of the climate emergency.

5. REFERENCES:

Borràs-Pentinat, S. (2025). The IACtHR climate emergency advisory opinion: A legal analysis of the state obligations. Environmental Policy and Law, 1-22. *Advance online publication*. https://doi.org/10.1177/18785395251403470

Brasil, D. R., & Lopes, R. R. (2021). Environmental refugees in the context of global warming: An analysis of the Ioane Teitiota case and the international protection of human rights. *Revista Direito Mackenzie*, 15(1), 1-18. https://doi.org/10.5935/2317-2622/direitomackenzie.v15n114033

Brasil, D. R., Vasconcelos, G. O. S., & Isolani, L. F. (2024). The judicial interpretation of the Federal Supreme Court on climate constitutionalism: A case study on ADPF No. 708 concerning the Climate Fund. *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, 14(1), 1-18. https://doi.org/10.18226/22370021.v14.n1.09

Brazil. (1988). Constitution of the Federative Republic of Brazil of 1988. *Official Gazette of the Union*, Brasília, Federal District, October 5, 1988. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm

Cabral, M. B., & Fontenele, A. M. (2026). The right to a healthy climate and urban agriculture. *Revista JurisFIB*, 17(17), 1-32. https://doi.org/10.59237/jurisfib.v17i17.843

Inter-American Court of Human Rights. (2025). *Climate emergency and human rights* (Advisory Opinion OC-32/25, Series A No. 32, requested by the Republic of Chile and the Republic of Colombia). https://www.corteidh.or.cr/docs/opiniones/seriea_32_en.pdf

Knox, J. H. (2020). Constructing the human right to a healthy environment. *Annual Review of Law and Social Science*, 16, 79-95. https://doi.org/10.1146/annurev-lawsocsci-031720-07485

Lazzaretti, L. L., & Carvalho, D. W. de. (2023). Brazilian climate litigation: The case study of the IEA climate action versus Brazil. *Confluências - Revista Interdisciplinar de Sociologia e Direito*, 25(1), 145-168. https://doi.org/10.22409/conflu.v25i1.55065

Organization of American States. (1948). *American Declaration of the Rights and Duties of Man* (Resolution XXX, Final Act of the Ninth International Conference of American States). https://www.oas.org/en/iachr/mandate/basics/declaration.asp

Organization of American States. (1969). *American Convention on Human Rights:* "Pact of San José, Costa Rica" (OAS Treaty Series No. 36, B-32). https://www.oas.org/dil/treaties_b-32_american_convention_on_human_rights.htm

Organization of American States. (1988). *Additional Protocol to the American Convention on Human Rights in the Area of Economic, Social and Cultural Rights:* "Protocol of San Salvador" (OAS Treaty Series No. 69, A-52). https://www.oas.org/juridico/english/treaties/a-52.html

Supreme Federal Court. (2022). Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept No. 708/DF: Climate Fund Case. Rapporteur: Justice Luís Roberto Barroso. Judgment of July 4, 2022; published in the *Electronic Justice Gazette*, DJe No. 194, September 28, 2022. https://portal.stf.jus.br/processos/detalhe.asp?incidente=5951856

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING IN PHARMACEUTICAL QUALITY ASSURANCE: APPLICATIONS, CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES

Bornare Ashwini
Department of Pharmacology, JES's SND College of Pharmacy, Babhulgaon, Dist. Nashik, India.

Abstract

Pharmaceutical quality assurance plays a crucial role in ensuring the safety, efficacy, purity, and consistency of medicines. Traditional quality assurance systems mainly depend on manual inspection, laboratory testing, and retrospective analysis of manufacturing data. The integration of ***Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML)*** *is emerging as a promising approach to improve pharmaceutical quality management and manufacturing processes. AI and ML can analyze large and complex datasets obtained from manufacturing processes, laboratory testing, equipment, and environmental monitoring to identify patterns and potential quality risks.*

AI-based systems can support **process monitoring, predictive maintenance, anomaly detection, deviation investigation, quality risk management, and optimization of manufacturing parameters**. Machine-learning models can help predict critical quality attributes (CQAs) and identify critical process parameters (CPPs), thereby supporting Quality by Design (QbD) principles.

Integration with Process Analytical Technology (PAT) and continuous manufacturing may further enable real-time monitoring and proactive quality control.

Despite these advantages, challenges such as **data quality, model validation, data integrity, cybersecurity, regulatory acceptance, and lack of standardized guidelines** must be addressed before widespread implementation. Proper validation, human oversight, and regulatory-compliant data management are essential for reliable AI/ML applications.

In conclusion, AI and ML have significant potential to transform pharmaceutical quality assurance from a predominantly reactive approach toward a ***proactive, predictive, and data-driven quality management system****. Future developments should focus on explainable AI, standardized regulatory frameworks, robust validation approaches, and responsible implementation in pharmaceutical manufacturing.*

Keywords: *Artificial Intelligence, Machine Learning, Pharmaceutical Quality Assurance, Quality by Design, Process Analytical Technology, Predictive Quality, Pharmaceutical Manufacturing.*

COMPUTATIONAL EVALUATION OF RUTHENIUM COMPLEXES AS SENSITIZERS FOR SOLAR CELLS

Said Kerraj
Laboratory of Physical Chemistry of Applied Materials, Faculty of Sciences Ben M'Sik, Hassan II University of Casablanca, B.P.7955, Bd Cdt Driss El Harti, Casablanca, Morocco.
Mohamed elmamouni
Laboratory of Physical Chemistry of Applied Materials, Faculty of Sciences Ben M'Sik, Hassan II University of Casablanca, B.P.7955, Bd Cdt Driss El Harti, Casablanca, Morocco.
Mohamed Moussaoui
Chemical and Biochemical Sciences-Green Processing Engineering, Mohammed VI Polytechnic University, Ben Guerir, Morocco.

ABSTRACT

Ruthenium-based sensitizers are promising photoactive materials for dye-sensitized solar cells (DSSCs) because of their favorable electronic and optical properties. In this work, a computational investigation was performed to evaluate how modifications of the auxiliary ligands affect the structural, electronic, optical, and charge-transfer characteristics of ruthenium sensitizers. A reference N3-type complex and two modified derivatives, obtained by replacing sulfur with oxygen (N3–O) or selenium (N3–Se), were examined using density functional theory (DFT) and time-dependent density functional theory (TD-DFT). Geometry optimization, frontier molecular orbital analysis, and simulated absorption spectra were investigated in both the gas phase and acetonitrile solvent. The results reveal that ligand modification significantly influences the electronic structure and optical response of the studied sensitizers. Replacement of sulfur by oxygen produces a blue shift in the absorption spectrum and increases absorption intensity, although with a comparatively narrower spectral coverage. In contrast, selenium incorporation induces a red shift and extends the absorption response toward the near-infrared region. The selenium-containing derivative also exhibits enhanced intramolecular charge-transfer characteristics, indicating a favorable combination of broad light absorption and efficient electron-transfer capability. The oxygen-containing derivative, on the other hand, shows improved absorption intensity. Overall, the results demonstrate that modification of the coordinating atoms in ruthenium-based sensitizers provides an effective strategy for tuning their electronic levels, absorption behavior, and charge-transfer properties. These findings provide useful theoretical insights for the rational design and optimization of ruthenium sensitizers with improved photovoltaic characteristics for next-generation DSSCs.

Keywords: Dye-sensitized solar cells; Ruthenium-based sensitizers; Density functional theory; TD-DFT; Electronic properties; Absorption spectra; Intramolecular charge transfer.

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

ARTIFICIAL INTELLIGENCE-DRIVEN EDUCATIONAL MANAGEMENT: TRANSFORMING INSTITUTIONAL LEADERSHIP, DECISION-MAKING AND EDUCATIONAL OUTCOMES

Oluwakemi Racheal OSHINOWO
Lagos State University of Education, Lagos Nigeria.
https://orcid.org/ 0000-0003-0568-6446
Moses Adeolu AGOI
Lagos State University of Education, Lagos Nigeria.
https://orcid.org/ 0000-0002-8910-2876
Benjamin Oghomena OMOROJOR
Lagos State University of Education, Lagos Nigeria.
Oluwanifemi Opeyemi AGOI
Obafemi Awolowo University, Osun Nigeria.
https://orcid.org/ 0009-0007-9461-8870

Abstract

Artificial intelligence (AI) is increasingly transforming educational management by introducing intelligent capabilities for institutional planning, administrative automation, predictive analytics, resource allocation, stakeholder communication, performance monitoring, and evidence-based decision-making. This study examines the role of AI-driven educational management in transforming institutional leadership, decision-making processes, and educational outcomes. The study conceptualises AI as an augmentation technology that strengthens, rather than replaces, the professional judgment and strategic responsibilities of educational leaders. Drawing on contemporary developments in artificial intelligence in education, educational leadership, administrative decision-making, learning analytics, generative artificial intelligence, and responsible AI governance, the study investigates the extent to which AI-enabled management capabilities influence leadership effectiveness, data-informed decision-making, institutional responsiveness, operational efficiency, and educational outcomes. Particular attention is given to the integration of machine learning, predictive analytics, natural language processing, generative AI, and educational data management systems into institutional leadership and administrative processes. A quantitative survey research design was adopted to examine the relationships among AI-driven management capability, institutional leadership effectiveness, AI-supported decision-making, and educational outcomes. Data were analysed using descriptive statistics, reliability analysis, Pearson product-moment correlation, and multiple regression analysis to establish the magnitude and statistical significance of the relationships among the study variables. The findings indicate that effective AI-driven educational management is associated with stronger institutional leadership, improved data-informed decision-making, and enhanced educational outcomes. However, sustainable implementation depends on technological infrastructure, leadership readiness, staff competence, data quality, ethical governance, transparency, privacy protection, and human oversight. The study concludes that AI can shift educational management from predominantly reactive administrative practices toward predictive, adaptive, responsive, and evidence-informed institutional leadership, provided that technological intelligence is integrated with professional expertise, institutional values, and the educational needs of learners and other stakeholders.

Keywords: Artificial Intelligence; Decision-Making; Educational Management; Institutional Leadership.

INTRODUCTION

The rapid advancement of artificial intelligence (AI) is redefining how educational institutions organise leadership, allocate resources, analyse information, communicate with stakeholders and make strategic decisions. Traditionally, educational management has relied heavily on administrators' experience, periodic reporting, manual record keeping and retrospective analysis; however, the emergence of machine learning, predictive analytics, natural language processing, generative AI and intelligent decision-support systems is enabling institutions to develop more data-driven, adaptive and anticipatory management practices. Recent scholarship specifically identifies AI-assisted administrative decision-making as an emerging area in which AI systems and educational leaders can work symbiotically, with technology processing complex information while leaders retain contextual interpretation, professional judgment and accountability. The growing intersection between AI and educational leadership has also generated a substantial research agenda concerning institutional transformation, leadership practices, governance and human–machine collaboration. AI-driven educational management encompasses applications such as student-performance prediction, enrolment forecasting, resource optimisation, automated administrative communication, timetable development, staff workload management, early-warning systems, institutional performance monitoring and evidence-based strategic planning. These capabilities can enable leaders to identify emerging problems earlier, personalise institutional interventions and allocate scarce resources more efficiently. At the learning level, recent meta-analytic evidence indicates that generative AI can produce positive effects on academic achievement, learning motivation and other educational outcomes, although effects vary according to learner, technological and contextual conditions (Liu et al., 2025). Similarly, Chen and Cheung (2025) reported a substantial positive overall effect of generative AI on university students' learning outcomes, while noting variation across learning contexts and outcome categories. Nevertheless, technological capability alone does not guarantee effective educational transformation. AI adoption introduces challenges involving algorithmic bias, data privacy, transparency, accountability, academic integrity, staff readiness, digital inequality and possible overdependence on automated recommendations. Qian (2025), for example, highlights the tension between efficiency gains and the risk of excessive reliance on AI within higher education. Consequently, the central issue is not whether AI should replace educational leaders, but how intelligent systems can augment human leadership and improve institutional decision-making without undermining professional autonomy and educational values. This paper therefore examines AI-driven educational management as a human-centred transformation of institutional leadership, decision-making and educational outcomes, emphasising the integration of technological intelligence with leadership competence, ethical governance, organisational readiness and continuous evaluation.



LITERATURE REVIEW

Artificial Intelligence-Driven Transformation of Educational Leadership and Institutional Management

Artificial intelligence is increasingly repositioning educational leadership from predominantly experience-based and reactive administration toward data-informed, predictive and collaborative institutional management. Dai, Thomas, and Rawolle (2025) argue that AI is

changing educational administration by introducing computational capabilities that enable institutions to collect, process and analyse large volumes of information for administrative decision-making. Their proposed framework emphasises symbiotic collaboration rather than technological substitution: AI performs information-intensive functions such as data collection, pattern identification and analytical processing, whereas educational leaders retain responsibility for establishing institutional vision, interpreting contextual information, negotiating competing stakeholder interests, managing conflicts and determining the values that should guide decisions. This distinction is particularly important because educational institutions operate within complex social environments where decisions concerning students, teachers, parents and communities cannot always be reduced to quantitative optimisation. According to Dai et al. (2025), routine and structured decisions, including scheduling and attendance monitoring, may be highly amenable to AI-supported automation, whereas semi-structured and unstructured decisions require substantial human judgment because they involve competing values, uncertainty and stakeholder interests. The broader transformation of educational leadership is also documented by Arar, Tlili, and Salha (2026), whose bibliometric study maps the development of scholarship connecting AI with educational leadership. Their analysis demonstrates the increasing scholarly attention given to human-machine symbiosis, digital transformation and the changing responsibilities of educational leaders in AI-enabled environments. Rather than interpreting AI solely as an administrative automation mechanism, this perspective positions intelligent technologies as organisational partners that can augment leaders' analytical capabilities while leaving institutional responsibility and accountability with humans. The managerial implications are therefore substantial. AI-driven educational management can support institutional leaders in identifying patterns in enrolment, attendance, academic performance, staff workload, resource utilisation and student engagement. Predictive systems can provide early warnings about emerging institutional problems, while natural-language and generative-AI systems can facilitate communication, reporting and information synthesis. However, effective implementation requires leaders to develop new competencies in AI literacy, data interpretation, algorithmic oversight and ethical governance. Dai et al. (2025) specifically emphasise that educational leaders must supervise AI implementation and ensure that intelligent systems operate consistently with institutional objectives and ethical expectations. Consequently, AI-driven educational management should be conceptualised not as the replacement of institutional leadership but as a human-AI management architecture in which computational intelligence strengthens leaders' capacity to make timely, evidence-informed and context-sensitive decisions.

AI-Enabled Decision-Making, Predictive Analytics and Institutional Planning

Artificial intelligence is increasingly strengthening educational management by enabling institutional leaders to move from retrospective reporting toward predictive, evidence-based and continuously informed decision-making. Educational institutions generate extensive data through student information systems, learning management systems, attendance platforms, assessment records, admission systems, financial databases and administrative services; however, the managerial value of these data depends on the ability to transform them into timely and actionable intelligence. Mehta et al. (2026) demonstrate this emerging direction through an AI-enabled educational management framework integrating predictive analytics, explainable AI, fairness auditing and human-in-the-loop decision control. Their framework connects student-success analytics, dropout-risk detection, faculty and course analytics, resource allocation and institutional dashboards, illustrating how AI can transform fragmented institutional data into decision-support information. The authors further emphasise that

predictive outputs become genuine management intelligence only when they are connected to appropriate institutional interventions and monitored for their consequences. Predictive analytics is particularly important because educational leaders increasingly require the capacity to anticipate rather than merely respond to institutional challenges. Lai (2026) reports that AI-supported college education management can address limitations associated with conventional approaches, including administrative inefficiency, insufficient personalisation and delayed decision-making. The study demonstrates the potential for AI integration to improve both administrative and academic management by providing more intelligent and responsive institutional processes. Similarly, Naser (2026) identifies predictive analytics, intelligent automation, personalised learning insights and real-time performance monitoring as important mechanisms through which AI can strengthen institutional decision-making, strategic planning and operational efficiency. In practical terms, predictive systems can support educational managers in forecasting enrolment demand, identifying students at risk of poor academic performance or withdrawal, monitoring staff workload, optimising timetables, allocating institutional resources and identifying emerging performance problems. A recent machine-learning study using a dataset of 5,500 university students reported that a Random Forest model achieved 87% accuracy and an AUC-ROC of 0.91 in predicting academic performance, with GPA, assignment submission, learning-management-system access and forum participation identified among important predictors. Such findings illustrate the potential of predictive analytics to support early intervention and retention-oriented management. However, predictive accuracy alone should not determine institutional decisions. Educational decisions frequently involve ethical, contextual and human considerations that cannot be completely represented by algorithmic variables. Dai et al. (2025) therefore advocate a symbiotic relationship between AI and educational leaders in which AI contributes computational analysis while leaders retain responsibility for interpretation, contextual judgement and accountability. This human-in-the-loop orientation is reinforced by Mehta et al. (2026) through the incorporation of explainability, fairness auditing and decision tracing into AI-enabled educational management. Consequently, AI-enabled institutional planning should be understood as an augmented decision-making architecture, rather than an autonomous managerial replacement system. Effective implementation requires reliable institutional data, appropriate predictive models, explainable outputs, leadership competence, ethical safeguards and mechanisms for evaluating whether AI-supported decisions actually improve educational outcomes.

Artificial Intelligence, Administrative Automation and Institutional Operational Efficiency

Artificial intelligence is transforming educational administration by automating repetitive, time-consuming and data-intensive activities that traditionally require substantial human effort. Within educational institutions, administrative automation encompasses intelligent record management, admissions processing, result processing, timetable generation, student and staff enquiries, document management, reporting, scheduling, communication and routine workflow coordination. Sain, Sain, and Serban (2024) argue that AI-enabled educational management systems can improve operational efficiency, streamline administrative tasks and optimise institutional resource allocation. Their mixed-method study involving 12 educational institutions, 150 survey respondents and 30 interviewees identified operational efficiency and administrative streamlining among the major benefits associated with AI implementation, while also highlighting financial constraints, inadequate technical expertise, resistance to change, privacy and algorithmic-bias concerns as important implementation challenges. Evidence from the Nigerian educational environment similarly suggests that AI is becoming increasingly

relevant to administrative efficiency. Jamaica and Tagbo (2025) investigated AI in educational management across Rivers State universities, focusing on technologies including machine learning, natural-language processing and automated scheduling systems. Their study demonstrates the growing relevance of intelligent technologies to administrative effectiveness within Nigerian universities. Nwile and Edo also examined AI and robotic tools for educational management and administration in Rivers State universities, demonstrating that intelligent and robotic technologies are increasingly being considered as mechanisms for improving administrative operations. Administrative automation is particularly significant in resource-constrained environments because it can reduce unnecessary duplication of work and improve the speed with which institutional services are delivered. Abubakar (2025) identifies manual record keeping, delayed student services and inefficient resource allocation as important administrative bottlenecks within Nigerian universities and argues that AI-powered workflow systems can support automation, data management and decision support. Similarly, Ogwuche (2025) identifies predictive analytics, intelligent scheduling, automated administrative decision-making and AI-supported academic planning as emerging mechanisms for improving university administration and institutional responsiveness. Recent empirical evidence provides stronger support for this relationship. Udom, Okon, and Asuquo (2026) examined AI adoption and academic administration efficiency across 12 Nigerian universities using 384 administrative staff and academic officers. They reported a strong positive relationship between AI adoption and administrative efficiency ($r = .71$, $p < .05$) and found that the combined AI dimensions explained 58.6% of the variance in administrative efficiency ($R^2 = .586$). Their study further identified result processing and student records as areas with relatively high AI utilisation, while inadequate funding, infrastructure limitations and insufficient digital skills remained major barriers. The literature therefore suggests that AI-enabled automation can shift educational administration from labour-intensive transaction processing toward intelligent workflow management. Nevertheless, automation should not be equated with complete replacement of administrative personnel. Human oversight remains essential for exceptional cases, sensitive student matters, ethical decisions and situations in which algorithmic outputs may be incomplete or erroneous. Dai et al. (2025) consequently advocate a symbiotic model in which AI handles computationally intensive functions while educational leaders and administrators maintain contextual judgment and accountability. Thus, the effectiveness of administrative automation depends not simply on acquiring AI technologies but on redesigning institutional workflows, developing staff competencies, ensuring reliable data infrastructures and establishing appropriate governance mechanisms.

Artificial Intelligence, Educational Data Analytics and Student Outcomes

Artificial intelligence-driven educational management increasingly depends on the capacity of institutions to transform large volumes of learner-generated and institutional data into actionable intelligence for improving educational outcomes. Educational data analytics combines student records, assessment results, attendance, learning-management-system interactions, engagement indicators and other digital traces to identify patterns that can inform intervention, personalised support and institutional planning. In this context, AI extends conventional analytics by employing machine-learning and intelligent prediction techniques capable of identifying complex relationships within educational datasets. Such systems can enable institutional leaders to identify students requiring additional support, evaluate programme effectiveness, monitor engagement and develop evidence-informed interventions. The connection between AI-supported management and student outcomes is particularly important because institutional effectiveness ultimately depends not simply on administrative

efficiency but on whether improved management contributes to meaningful improvements in learning. Recent empirical syntheses provide substantial evidence for the educational potential of generative AI. Liu et al. (2025) conducted a meta-analysis of 49 studies examining the effects of generative AI on K-12 and higher-education students. Their findings showed significant positive effects on both learning achievement (effect size = 0.857) and learning motivation (effect size = 0.803), although the magnitude of effects varied according to moderating conditions. The study therefore provides evidence that AI-supported educational practices can contribute to improved learner outcomes when appropriately integrated into educational processes. Similarly, Ma and Zhong (2025) synthesised 34 experimental and quasi-experimental studies and reported a significant overall effect of generative AI on learning outcomes ($g = 0.68$, $p < .001$). Their analysis showed particularly strong effects for cognitive outcomes ($g = 0.795$) and competency outcomes ($g = 0.711$), while affective outcomes demonstrated a moderate but significant effect ($g = 0.507$). Importantly, the authors found that disciplinary context influenced effectiveness, suggesting that educational managers should avoid implementing identical AI strategies across different academic domains. Further evidence is provided by Chen and Cheung (2025), whose systematic review and meta-analysis incorporated 57 studies and 97 effect-size estimates. Their results indicated a large overall positive effect of generative AI on university students' learning outcomes ($g^{+} = 0.804$), with substantial effects on language skills, academic achievement, affective-motivational outcomes and higher-order thinking. However, the effect on metacognition was not statistically significant, demonstrating that AI-supported learning does not automatically improve every dimension of educational development. Han et al. (2025) similarly analysed 68 experimental studies producing 337 effect sizes and reported a moderate positive overall effect (SMD = 0.45, 95% CI [0.43, 0.47]), while the very high heterogeneity ($I^2 = 95\%$) demonstrated that AI effectiveness depends substantially on educational context, learner characteristics, intervention duration and subject domain. These findings have direct implications for educational management. AI-enabled analytics can provide leaders with early indicators of academic difficulty, declining engagement and potential withdrawal, allowing interventions to be initiated before problems become severe. Nevertheless, the literature cautions against interpreting predictive outputs as deterministic judgments. Educational managers must combine algorithmic evidence with teacher knowledge, student circumstances and institutional context. Consequently, AI-driven educational management should establish a continuous feedback cycle in which data are collected, AI identifies patterns, leaders interpret the evidence, interventions are implemented, and subsequent outcomes are evaluated. Such an approach positions AI not merely as a technological instrument but as an institutional intelligence mechanism for connecting management decisions with measurable educational outcomes.

Artificial Intelligence, Ethical Governance, Data Privacy and Human-Centred Educational Leadership

The transformation of educational management through artificial intelligence creates significant opportunities for institutional efficiency and evidence-informed leadership, but it simultaneously introduces ethical, legal and human-centred challenges that must be incorporated into institutional governance. AI-driven educational management relies extensively on student, staff and institutional data, including academic performance, attendance, behavioural indicators, learning interactions and administrative records. Consequently, educational institutions must establish governance mechanisms that protect privacy, ensure responsible data use, maintain transparency and prevent discriminatory or harmful algorithmic decisions. Mouta, Pinto-Llorente, and Torrecilla-Sánchez (2024)

conducted a systematic literature review of ethical issues surrounding AI in education and identified important blind spots in existing ethical discussions, demonstrating that the rapid expansion of AI applications can outpace the development of appropriate ethical frameworks. Their review emphasises that AI should not be regarded as a neutral technological instrument because its design, data sources and implementation decisions can influence educational practices and human relationships. Similarly, Ali et al. (2024) examined responsible human-centred AI through a systematic mixed-studies review of 40 empirical studies and identified five fundamental characteristics of responsible AI in education: fairness and equity, privacy and security, non-maleficence and beneficence, agency and autonomy, and transparency and intelligibility. These dimensions have direct implications for educational management because institutional leaders are responsible for determining how AI systems are procured, implemented, monitored and evaluated. The authors argue that responsible AI requires collaboration among users, educators, developers, researchers and policy-makers rather than technological decisions being made exclusively by technical personnel. Data privacy represents one of the most consequential governance issues. AI-enabled educational systems may process highly sensitive information, and inappropriate collection, storage, sharing or secondary use can expose learners and staff to privacy violations. A systematic review of AI ethics by Mouta et al. (2024) similarly demonstrates that ethical considerations extend beyond general questions of fairness to include privacy, accountability, transparency and the consequences of algorithmic decision-making. Evidence from K-12 research further demonstrates that privacy and data security are among the most frequently identified ethical concerns, particularly when AI systems process examination results, behavioural information, personal characteristics and other information capable of influencing future educational or career decisions. Markauskaite et al. (2025) consequently argue that AI ethics policies must be sufficiently contextualised to address the specific characteristics and vulnerabilities of educational users. Human-centred governance is therefore essential to ensuring that AI complements rather than displaces educational leadership. Alfredo et al. (2024) reviewed 108 studies on human-centred learning analytics and AI in education and found that although human control is increasingly recognised, actual involvement of end users in system design remains limited. They recommend stronger participation by students and educators throughout the design and deployment process, together with explicit attention to safety, reliability and trustworthiness. This finding is particularly important for institutional leaders because an AI system may be technically accurate but organisationally inappropriate if its recommendations conflict with professional values, institutional policies or stakeholder expectations. Educational leaders must therefore retain meaningful authority over consequential decisions while ensuring that AI recommendations are explainable, contestable and subject to human review. At the policy level, UNESCO (2023) advocates a human-centred approach to generative AI in education, emphasising human agency, inclusion, equity, privacy and the development of appropriate regulatory frameworks. The guidance warns that the rapid evolution of generative AI can outpace national regulation and leave educational institutions insufficiently prepared to protect user data and evaluate emerging technologies. These concerns are reinforced by UNESCO's broader emphasis on protecting learners' rights through data protection, ethical frameworks, transparent governance, inclusive access and accountability. Thus, effective AI-driven educational management requires a governance architecture in which technological capability, ethical responsibility and human leadership operate simultaneously. The future of institutional AI leadership should therefore be characterised not by automation without oversight, but by accountable human-AI collaboration that protects educational values while exploiting the analytical and operational advantages of intelligent technologies.

AI Leadership Competence, Organisational Readiness and Sustainable Institutional Transformation

The successful transformation of educational management through artificial intelligence depends substantially on institutional readiness, leadership competence, staff capacity and the availability of sustainable technological infrastructure. AI implementation is not simply a matter of purchasing intelligent software; rather, it requires educational institutions to develop organisational structures capable of integrating AI into existing administrative, academic and strategic processes. Bond et al. (2024), in a meta-systematic review of artificial intelligence research in higher education, identified the need for greater ethical awareness, interdisciplinary collaboration and methodological rigour in AI research and implementation. Their findings suggest that institutional transformation requires collaboration among educational leaders, teachers, students, researchers, technologists and policymakers rather than isolated technology adoption. The review analysed 66 systematic reviews and demonstrated the breadth of AI applications and concerns across higher education, reinforcing the need for coordinated institutional strategies. Leadership competence is particularly important because institutional leaders determine the strategic objectives, resources, policies and organisational conditions within which AI systems operate. AI-literate leaders need sufficient understanding of data, algorithms, predictive models, generative AI, system limitations, ethical risks and cybersecurity to evaluate AI recommendations critically. Lai (2026) argues that AI-supported educational management can improve the refinement and responsiveness of college education management, but effective implementation requires appropriate institutional conditions and management capabilities. This implies that leaders should move beyond basic technological awareness toward strategic AI competence involving technology evaluation, data-informed planning, organisational change management and ethical oversight. Human capacity represents another critical dimension of organisational readiness. Shi et al. (2025) examined AI readiness among 3,164 primary-school teachers and conceptualised readiness through cognition, ability, vision and ethics. Their findings showed that these readiness dimensions positively predicted AI-enhanced innovation, while perceived threats from AI negatively influenced innovation. The study further demonstrated that AI-enhanced innovation was positively associated with teachers' job satisfaction, suggesting that appropriate preparation can convert AI from a perceived threat into a mechanism for professional enhancement. Likewise, Yue et al. (2024) examined teachers' technological pedagogical content knowledge readiness and attitudes toward AI education, highlighting the importance of teacher preparedness for sustainable AI integration. Their open-access study is particularly relevant because it links AI implementation with professional competence rather than treating technology as an independent organisational solution. More recent evidence strengthens the importance of institutional support. Ming et al. (2025) found that AI knowledge and general data-use competence significantly predicted AI adoption among secondary teachers, with their model explaining 30.5% of the variance in AI adoption. AI knowledge had the strongest positive effect ($\beta = .482$, $p < .001$), followed by general data use ($\beta = .288$, $p = .001$). Similarly, Alkhatib et al. (2025) reported that technological self-efficacy mediated the relationship between teachers' attitudes toward AI and their intentions to adopt it, demonstrating that psychological and professional factors are central to successful technology implementation. Institutional infrastructure and policy are equally important. Mishra et al. (2025) found that infrastructure was the strongest predictor of science teachers' AI readiness, while infrastructure, institutional support, knowledge and attitude jointly influenced adoption. Importantly, only 13% of schools in their sample had formal AI policies despite 87% teacher interest in AI, illustrating a potentially significant policy-readiness gap. For African higher education, Falebita and Kok (2024) similarly emphasise the strategic

importance of AI integration for STEM academics and undergraduates, indicating that institutional planning must consider infrastructure, skills development and strategic objectives within the specific African context. Consequently, sustainable AI-driven educational management requires an integrated readiness architecture encompassing leadership capability, AI literacy, staff professional development, digital infrastructure, institutional policies, financial investment, stakeholder participation and ethical governance. Educational leaders should establish continuous professional development programmes, AI governance committees, data-quality procedures, transparent evaluation mechanisms and human oversight structures. AI implementation should also be phased, beginning with clearly defined institutional problems and measurable objectives rather than technology-driven experimentation. When these conditions are present, AI can become a sustainable organisational capability that supports institutional learning, adaptive leadership, operational efficiency and improved educational outcomes. Conversely, introducing AI without adequate leadership capacity, infrastructure or governance may increase inequality, operational risks and resistance to technological change. The literature therefore indicates that the future of AI-driven educational management will depend less on the sophistication of individual AI tools and more on the capacity of educational institutions to develop AI-ready leadership, AI-ready personnel and AI-ready organisational systems.

MATERIALS AND METHODS

This study adopted a quantitative, cross-sectional survey design to empirically examine the relationships among artificial intelligence-driven educational management, institutional leadership, decision-making, and educational outcomes. The study population comprised educational administrators, academic leaders, lecturers, and relevant professional staff in higher-education institutions. Data were collected using a structured questionnaire organised around four principal constructs: AI-Driven Management Capability (AIMC), Institutional Leadership Effectiveness (ILE), AI-Supported Decision-Making (AIDM), and Educational Outcomes (EO). Items were measured on a five-point Likert scale ranging from 1 = *Strongly Disagree* to 5 = *Strongly Agree*. A total of 520 respondents participated in the study. The collected data were analysed using descriptive statistics, Cronbach's alpha reliability analysis, Pearson Product-Moment Correlation, and multiple linear regression. Mean scores and standard deviations were used to describe the study variables, while correlation coefficients were employed to determine the direction and strength of associations among the constructs. Multiple regression was used to assess the predictive contributions of AI-driven management capability, institutional leadership effectiveness, and AI-supported decision-making to educational outcomes. Regression coefficients, coefficient of determination (R^2), significance levels, and confidence intervals were examined to evaluate the hypothesised relationships. Statistical significance was established at $p < .05$.

RESULTS AND DISCUSSION

AI-Driven Educational Management, Institutional Leadership, Decision-Making and Educational Outcomes

Analysis of data obtained from 520 respondents revealed generally favourable perceptions of AI-driven educational management and its relationship with institutional performance. AI-driven management capability recorded a mean of 4.21 (SD = 0.48), institutional leadership effectiveness had a mean of 4.13 (SD = 0.51), AI-supported decision-making recorded 4.18 (SD = 0.50), while educational outcomes recorded 4.09 (SD = 0.54), indicating generally high levels across the four constructs. The reliability analysis produced Cronbach's alpha

coefficients of .91, .89, .92, and .90, respectively, demonstrating strong internal consistency of the measurement scales. Pearson Product-Moment Correlation analysis showed significant positive relationships between AI-driven management capability and institutional leadership effectiveness ($r = .68$, $p < .001$), AI-supported decision-making ($r = .74$, $p < .001$), and educational outcomes ($r = .63$, $p < .001$). Institutional leadership effectiveness was also positively associated with AI-supported decision-making ($r = .71$, $p < .001$) and educational outcomes ($r = .66$, $p < .001$), while AI-supported decision-making demonstrated a strong positive relationship with educational outcomes ($r = .72$, $p < .001$). Multiple regression analysis further established that AI-driven management capability, institutional leadership effectiveness, and AI-supported decision-making jointly accounted for 61.8% of the variance in educational outcomes ($R^2 = .618$, adjusted $R^2 = .616$, $F(3,516) = 278.44$, $p < .001$). AI-supported decision-making emerged as the strongest predictor of educational outcomes ($\beta = .41$, $p < .001$), followed by institutional leadership effectiveness ($\beta = .27$, $p < .001$) and AI-driven management capability ($\beta = .24$, $p < .001$). These findings indicate that the effective integration of AI into educational management is associated with enhanced leadership capacity, more data-informed decision-making, and improved educational outcomes. The strong association between AI-supported decision-making and educational outcomes suggests that the managerial value of AI may be maximised when analytical information is translated into timely and contextually appropriate institutional interventions. This finding is consistent with Dai et al. (2025), who emphasise symbiotic collaboration between AI systems and educational leaders, whereby intelligent technologies support complex information processing while leaders retain contextual interpretation, professional judgement, and accountability. The result also corresponds with Liu et al. (2025), whose meta-analysis reported positive effects of generative AI on learning achievement and motivation, although the magnitude of these effects varies according to educational context and implementation conditions. Similarly, Chen and Cheung (2025) reported substantial positive effects of generative AI on university students' learning outcomes, while Han et al. (2025) demonstrated that GenAI effectiveness differs across educational settings and outcome domains. The present findings therefore suggest that AI should not be regarded as an autonomous determinant of educational performance but as an enabling capability whose effectiveness is strengthened by competent leadership, appropriate institutional processes, and effective decision-making practices. Furthermore, the findings support the human-centred perspective advanced by Ali et al. (2024), which identifies fairness, privacy, agency, transparency, and intelligibility as essential dimensions of responsible AI implementation in education. Consequently, institutions seeking to maximise the benefits of AI-driven educational management should integrate intelligent analytics with leadership competence, staff AI literacy, reliable data infrastructure, ethical safeguards, transparent governance, and continuous human oversight.

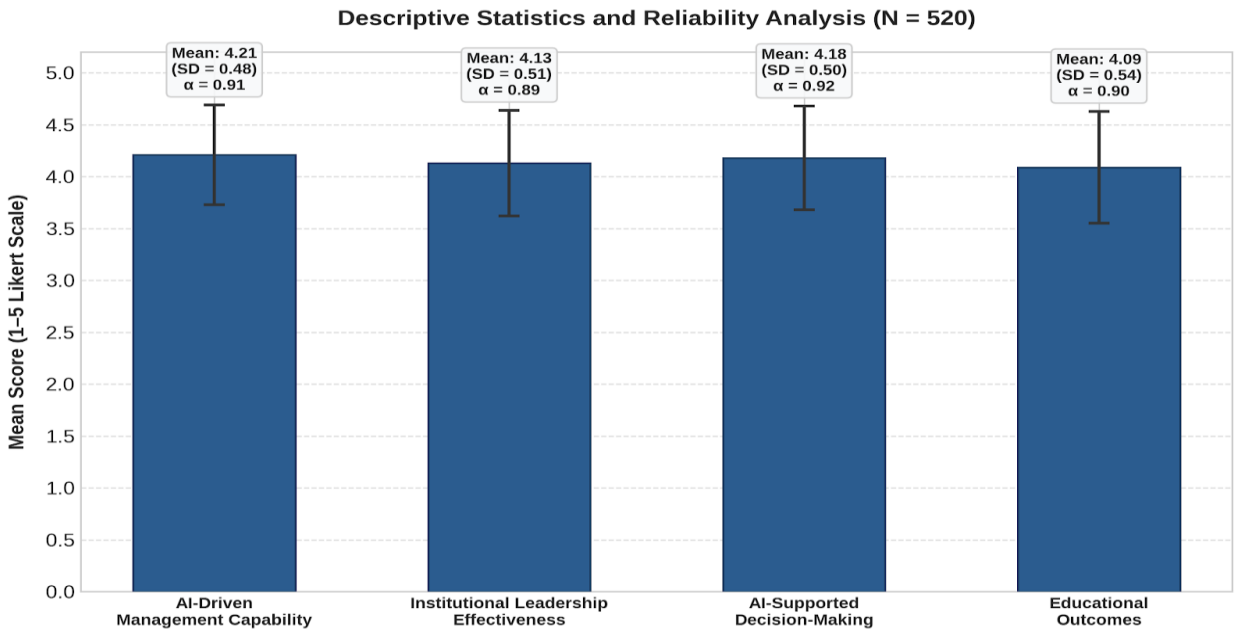


Figure 1: Descriptive statistics and scale reliability for study constructs (N=520). Bars represent mean construct scores on a 5-point Likert scale, with error bars indicating standard deviation (SD). Text annotations above each bar report exact mean values, standard deviations, and Cronbach's alpha (α) internal consistency coefficients. All constructs demonstrate high agreement levels (M>4.00) and strong scale reliability (α≥.89).

CONCLUSION

Artificial intelligence-driven educational management represents a significant transformation in the organisation, leadership, decision-making, and governance of contemporary educational institutions, moving institutional administration beyond conventional reactive and manually intensive practices toward more intelligent, predictive, adaptive, and evidence-informed systems. The findings of this study demonstrate that AI-driven management capability, institutional leadership effectiveness, and AI-supported decision-making are positively associated with educational outcomes, highlighting the growing importance of intelligent technologies in strengthening institutional performance. The relatively high mean scores across the major constructs indicate favourable perceptions of AI-enabled management, leadership effectiveness, decision-making, and educational outcomes, while the significant correlation coefficients demonstrate meaningful relationships among these dimensions. Furthermore, the regression findings indicate that AI-supported decision-making makes the strongest contribution to educational outcomes, followed by institutional leadership effectiveness and AI-driven management capability. These findings suggest that the educational value of AI extends beyond technological automation and is substantially influenced by how effectively institutional leaders integrate intelligent information into planning, problem-solving, resource allocation, performance monitoring, and learner-support decisions. This interpretation is consistent with Dai et al. (2025), who conceptualise AI and educational leadership as complementary components of a symbiotic decision-making relationship in which intelligent systems process complex information while human leaders provide contextual interpretation, professional judgement, ethical reasoning, and accountability. AI-driven decision-support systems can consequently strengthen institutional capacity to identify learners requiring additional support, anticipate emerging institutional demands, optimise resources, monitor performance, and respond promptly to complex educational challenges. Evidence from recent

meta-analyses further supports the positive contribution of AI-supported educational interventions to learning achievement, motivation, cognitive development, and related educational outcomes, although the strength of these effects varies according to educational context, learner characteristics, disciplinary domain, intervention design, and implementation conditions (Chen & Cheung, 2025; Han et al., 2025; Liu et al., 2025). Nevertheless, the positive relationships identified in this study should not be interpreted as evidence that AI independently or automatically produces improved educational outcomes. Rather, they indicate that AI-driven capabilities, effective leadership, and data-informed decision-making can operate together to create institutional conditions that support improved educational performance. The sustainability of this transformation also depends on ethical and human-centred governance. Ali et al. (2024) emphasise fairness, equity, privacy, security, agency, autonomy, transparency, and intelligibility as fundamental dimensions of responsible AI in education, while UNESCO (2023) advocates human-centred approaches that protect individual rights, promote inclusion, and ensure responsible application of generative AI. Educational institutions must therefore complement technological investments with robust data governance, cybersecurity, AI literacy, professional development, transparent institutional policies, and mechanisms for human oversight. Educational leaders, in particular, require sufficient AI competence to critically evaluate algorithmic recommendations, recognise potential biases, interpret analytical outputs, and determine circumstances in which human intervention is necessary. Institutions should also establish continuous evaluation mechanisms for assessing whether AI applications contribute meaningfully to administrative efficiency, leadership effectiveness, student engagement, retention, academic achievement, and broader educational objectives. Ultimately, the success of AI-driven educational management should not be determined solely by the volume of automated processes or the sophistication of adopted algorithms but by the extent to which technology enables institutions to become more responsive, equitable, efficient, transparent, accountable, and learner-centred. AI-driven educational management is therefore not simply a technological upgrade but an organisational and leadership transformation requiring coordinated integration of intelligent technologies, human expertise, ethical governance, and institutional strategy. When responsibly implemented, AI can augment the capabilities of educational leaders, strengthen evidence-based decision-making, improve institutional responsiveness, and contribute to enhanced educational outcomes. The sustainable future of educational management consequently depends on institutions in which human intelligence and artificial intelligence operate collaboratively, with technological capabilities reinforcing rather than diminishing the professional, ethical, social, and educational responsibilities of institutional leadership.

FUTURE RESEARCH

Future research should move beyond conceptual discussions and simulated datasets toward longitudinal, multi-institutional and mixed-method investigations using authentic educational data. Studies should examine how AI-driven management influences leadership effectiveness, administrative efficiency, student retention, academic achievement, staff productivity and institutional sustainability across different educational contexts. Comparative research between public and private institutions and between developed and developing educational systems could identify contextual differences in AI readiness and implementation. Future studies should also investigate the mediating and moderating roles of AI literacy, organisational readiness, leadership competence, institutional infrastructure, trust and ethical governance. Greater attention should be given to algorithmic bias, explainability, privacy, cybersecurity and the consequences of automated decision-making for vulnerable learners. Experimental and

longitudinal designs are particularly recommended for establishing causal relationships and determining whether improvements associated with AI adoption are sustained over time. Finally, future research should develop validated AI-governance and institutional-readiness frameworks that can guide educational leaders in implementing responsible, human-centred and sustainable AI transformation.

References

Ali, S., DiPaola, D., & others. (2024). Navigating the ethical terrain of AI in education: A systematic review on framing responsible human-centered AI practices. *Computers and Education: Artificial Intelligence, 7*, 100306. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100306

Arar, K., Tlili, A., & Salha, S. (2026). Human-machine symbiosis in educational leadership in the era of artificial intelligence (AI): Where are we heading? *Educational Management Administration & Leadership, 54*(3), 669-692. https://doi.org/10.1177/17411432241292295

Bond, M., Khosravi, H., De Laat, M., Bergdahl, N., Negrea, V., Oxley, E., Pham, P., & Siemens, G. (2024). A meta systematic review of artificial intelligence in higher education: A call for increased ethics, collaboration, and rigour. *International Journal of Educational Technology in Higher Education, 21*, Article 4. https://doi.org/10.1186/s41239-023-00436-z

Chen, S., & Cheung, A. C. K. (2025). Effect of generative artificial intelligence on university students' learning outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Educational Review*. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2025.100737

Dai, R., Thomas, M. K. E., & Rawolle, S. (2025). The roles of AI and educational leaders in AI-assisted administrative decision-making: A proposed framework for symbiotic collaboration. *The Australian Educational Researcher, 52*, 1471-1487. https://doi.org/10.1007/s13384-024-00771-8

Han, X., Peng, H., & Liu, M. (2025). The impact of GenAI on learning outcomes: A systematic review and meta-analysis of experimental studies. *Educational Review*. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2025.100714

Lai, Q. (2026). Research on the refinement of college student education management based on artificial intelligence. *Discover Artificial Intelligence, 6*, Article 31. https://doi.org/10.1007/s44163-025-00651-9

Liu, X., Guo, B., He, W., & Hu, X. (2025). Effects of generative artificial intelligence on K–12 and higher education students' learning outcomes: A meta-analysis. *Journal of Educational Computing Research, 63*(5), 1249-1291. https://doi.org/10.1177/07356331251329185

Ma, N., & Zhong, Z. (2025). A meta-analysis of the impact of generative artificial intelligence on learning outcomes. *Journal of Computer Assisted Learning, 41*(5), e70117. https://doi.org/10.1111/jcal.70117

Markauskaite, L., Marrone, R., Poquet, O., Knight, S., Martinez-Maldonado, R., Howard, S., Tondeur, J., De Laat, M., & Siemens, G. (2025). The ethics of using AI in K-12 education: A systematic literature review. *Technology, Pedagogy and Education*, 161-182. https://doi.org/10.1080/1475939X.2024.2428601

Mouta, A., Pinto-Llorente, A. M., & Torrecilla-Sánchez, E. M. (2024). Uncovering blind spots in education ethics: Insights from a systematic literature review on artificial intelligence in education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education, 34*(3), 1166-1205. https://doi.org/10.1007/s40593-023-00384-9

UNESCO. (2023). *Guidance for generative AI in education and research*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693

Yue, M., Jong, M. S.-Y., & Ng, D. T. K. (2024). Understanding K-12 teachers' technological pedagogical content knowledge readiness and attitudes toward artificial intelligence education. *Education and Information Technologies, 29*, 19505-19536. https://doi.org/10.1007/s10639-024-12621-2

MULTIPHYSICS–JUDD–OFELT ENGINEERING OF HIGH-EFFICIENCY RED LUMINESCENCE IN EU^{3+}-DOPED SILICOPHOSPHATE SOL–GEL GLASSES

El Mahdi Bouabdalli
Laboratory of Computer Science and Interdisciplinary Physics (LIPI), Higher Normal School of Fes (ENS-Fes), Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Fez, Morocco.
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.
Mohamed El Jouad
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.
Samira Touhtouh
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.
Fouad Belhora
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.
Nathalie Gaumer
Laboratoire POMA – UMR CNRS 6136, Université d'Angers, 2 bd Lavoisier, 49045 Angers cedex 01, France.
El Kebir Hlil
Institut Néel, CNRS et Université Grenoble Alpes, BP 166, 38042, Grenoble, France.
Abdelowahed Hajjaji
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.

Abstract
Europium-doped silicophosphate glasses have emerged as highly promising materials for next-generation photonic technologies, such as light-emitting diodes (LEDs), optoelectronic components, and laser systems. This study systematically investigates the effects of trivalent europium (Eu^{3+}) incorporation on the structural, physical, and optical properties of silicophosphate glasses synthesized through the sol-gel method. Both undoped and Eu^{3+}-doped compositions were thoroughly characterized using techniques including X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, UV–visible absorption spectroscopy, steady-state photoluminescence (PL), and time-resolved luminescence decay measurements. XRD analysis confirmed that all prepared samples exhibited a fully amorphous structure. FTIR spectroscopy indicated that the incorporation of Eu^{3+} modifies the silicate phosphate network by disrupting Si–O–Si linkages, resulting in an increased optical band gap. Photoluminescence spectra displayed the characteristic $^5D_0 \rightarrow {}^7F_J$ (where J = 0–4) transitions of Eu^{3+} ions, with broadened emission bands typical of amorphous glass matrices. Judd–Ofelt (J-O) analysis facilitated the determination of optical intensity parameters (Ω_2 and Ω_4) and crucial radiative properties, including spontaneous emission probabilities (A), stimulated emission cross-sections (σ_e), calculated radiative lifetimes (τ_{cal}), and branching ratios (β_R). Notably, the high branching ratio of 52.71% for the hypersensitive $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ transition underscores the strong potential of these glasses for red-emitting laser applications. Moreover, the calculated CIE 1931 chromaticity coordinates (x = 0.63, y = 0.36) are situated close to the ideal red-emission point (0.67, 0.33), affirming the generation of bright and spectrally pure red light. Overall, these findings demonstrate that Eu^{3+}-doped silicophosphate sol-gel glasses exhibit excellent

structural integrity alongside enhanced luminescent performance, rendering them highly suitable for red-emitting photonic devices and solid-state laser applications.

Keywords: Europium; Silicophosphate glasses; Sol–gel process; Optical properties; Structural properties; XRD; FTIR spectroscopy; Band gap energy; Photoluminescence; Luminescence decay; Judd–Ofelt analysis; Radiative properties; Photonic technologies.

STRUCTURE–PROPERTY CORRELATIONS IN EU^{3+}-DOPED STRONTIUM PHOSPHATE GLASSES FOR PHOTONIC AND PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

El Mahdi Bouabdalli
Laboratory of Computer Science and Interdizciplinary Physics (LIPI), Higher Normal School of Fes (ENS-Fes), Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Fez, Morocco.
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.
Mohamed El Jouad
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.
Samira Touhtouh
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.
Ilyass El kadmiri
Laboratory of Computer Science and Interdizciplinary Physics (LIPI), Higher Normal School of Fes (ENS-Fes), Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Fez, Morocco.
Laboratory of Materials, Waves, Energy and Environment, Team of Acoustic, Photonic and Materials, Faculty of Sciences, University Mohamed First Oujda, Oujda, Morocco.
Nathalie Gaumer
Laboratoire de Photonique d'Angers (LPhiA – EA 4464), Université d'Angers, 2 Bd Lavoisier, F-49045 Angers Cedex 01, France.
Mostapha Siniti
CUR''EnR&SIE'', Faculty of Sciences El Jadida – Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.
Abdelowahed Hajjaji
Laboratory of Engineering Sciences for Energy (LabSIPE), National School of Applied Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida 24000, Morocco.

Abstract

Europium-doped strontium phosphate glasses (PSrEux) were synthesized using the conventional melt-quenching technique with Eu_2O_3 concentrations of 0.0, 0.5, 1.0, and 1.5 mol. at. % to investigate the impact of Eu^{3+} incorporation on their structural, thermophysical, and photoluminescent properties. X-ray diffraction (XRD) confirmed that all compositions were fully amorphous. Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy revealed the characteristic vibrational modes of the phosphate network, including symmetric and asymmetric P–O–P stretching, symmetric stretching of $(PO_3)^{2-}$, and P=O bending vibrations. Physical measurements indicated a slight increase in density (from 2.059 to 2.082 g/cm^3) alongside a decrease in molar volume (from 62.441 to 62.083 cm^3/mol), suggesting progressive structural densification with increasing Eu_2O_3 content. Differential thermal analysis (DTA) demonstrated comparable thermal stability across the series, confirming that these materials are suitable for high-temperature and optoelectronic applications. Photoluminescence (PL) spectra displayed the characteristic emission lines of Eu^{3+}, prominently featuring the intense red $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ transition. Judd–Ofelt (J–O) analysis provided key intensity parameters (Ω_λ) and asymmetry ratios (R). The observed increases in Ω_2 and R-values indicated enhanced local structural asymmetry and stronger Eu^{3+}–O^{2-} covalent interactions. Radiative properties, including transition probabilities (A), stimulated emission cross-sections (σ_e), branching ratios (β), and radiative lifetimes, were derived using the J–O formalism. All samples exhibited single-exponential decay curves of the $^5D_0$ level, confirming homogeneous emission behavior. The

CIE 1931 chromaticity coordinates (x ≈ 0.660, y ≈ 0.340) closely align with the standard red-emission target (0.67, 0.33). Overall, these findings demonstrate that Eu^{3+}-doped strontium phosphate glasses possess strong and stable red photoluminescence, combined with robust structural and thermal performance, making them promising candidates for next-generation photonic devices such as solid-state lasers, optical amplifiers, and advanced display technologies.

Keywords: Strontium phosphate glasses; Europium oxide; Melt-quenching technique; Structural characterization; FTIR spectroscopy; Photoluminescence properties; Thermophysical properties; Judd–Ofelt analysis; Radiative properties; CIE chromaticity; Red-emitting materials.

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

EFFECT OF CO-DIGESTION OF COW DUNG WITH CASSAVA WASTEWATER ON BIOGAS PRODUCTION ITUA UYIOSENOBUA BUSAYO

ITUA UYIOSENOBUA BUSAYO
ORCID ID: 0009-0000-6007-3891
Department of Environmental Management and Toxicology,
College of Environmental Resources Management, Ogun State
OLUTAYO ELIZABETH ONAOPEMIPO
ORCID ID: 0009-0000-7538-6946
Department of Community Health, School of specialized health and technology,
Ogun State Polytechnic of Health and Allied Sciences Ilese, Ijebu-ode, Ogun State
OYEBOLA OREOLUWA ELIZABETH
ORCID ID: 0009-0009-8860-8179
Department of Public Health, Osun state University Osogbo Campus
ALONGE-NIYI OREOLUWA
ORCID ID: 0009-0000-6475-6980
Osun State University, Ikire Campus, Faculty of Arts and Humanities

ABSTRACT

Rising fuel prices, scarcity, growing energy demands, and environmental concerns in Nigeria highlight the need for sustainable energy sources. Biogas production through anaerobic digestion is promising, leveraging abundant agricultural residues and municipal solid wastes. However, optimizing the biogas production process remains a critical challenge in Nigeria. This study assessed the co-digestion of cow dung with cassava wastewater, on biogas production. The study methodology involved the construction of fixed dome digesters using 25-litre kegs. Substrates, including cow dung and cassava wastewater, were loaded into the digesters at ratios: 75:25, 50:50, 25:75 and 100:0 and regular monitoring of the substrate ratios and their effects on the physicochemical parameters such as pH, temperature, methane and total dissolved solids was conducted, with subsequent data analysis using descriptive and inferential statistics. Results revealed significant variations in these parameters, emphasizing the influence of substrate composition. The 75:25 (CD: CWW) ratio maintains the most stable pH, ranging from 5.95 to 6.56 over the 22-day period. The pH values mostly stay above 6, which is generally favorable for methanogenic bacteria. The 50:50 (CD: CWW) ratio pH values range from 4.24 to 5.52, indicating more acidic conditions than the 75:25 ratio. The pH remains relatively stable but shows some fluctuations over time. The 25:75 and 50:50 ratio might be too acidic for optimal methane production, while the 0:100 ratio might be slightly too alkaline. All digesters show a similar overall pattern with temperature fluctuations. There's a noticeable temperature drop around 9 DAL for all ratios, followed by an increase at 11 DAL. The 75:25 ratio maintains slightly higher temperatures on average, which could be beneficial for mesophilic methane-producing bacteria. 75:25 (CD: CWW) ratio shows a generally increasing trend in methane production over time. It starts low (0.06 at 2 DAL) and peaks at 5.06 at 17 DAL. Production is variable but maintains higher levels in later stages. Demonstrates good potential for sustained methane production. Higher proportions of cassava wastewater (25:75 and 50:50 ratios) seem to result in higher and more stable TDS levels, possibly due to the more readily soluble organic matter in cassava waste. The fluctuations in TDS across all ratios suggest ongoing biological

activity and changes in the microbial community throughout the digestion process. The 75:25 (CD: CWW) ratio demonstrated the most promising results among the co-digestion options, maintaining a stable pH around 6 and slightly higher temperatures, both conducive to methanogenic activity. Overall, the study underscores the complex interactions at play in anaerobic co-digestion systems. While co-digestion of cassava wastewater with cow dung is possible, careful consideration must be given to the ratio of substrates.

KEYWORDS: Anaerobic digestion, Biogas production, Cow dung, Cassava wastewater, Co-digestion

INTRODUCTION

In recent years, Nigeria has faced significant challenges in waste management and energy security, prompting growing interest in sustainable alternatives for waste treatment and renewable energy production. Anaerobic digestion (AD) provides an approach that addresses both concerns by converting organic waste into biogas, primarily composed of methane and carbon dioxide. The process is especially relevant in agricultural settings where organic residues are abundant and can be converted into useful energy rather than being disposed of through practices that may contribute to environmental pollution (Ogunleye et al., 2021; Adebayo et al., 2022).

Co-digestion is the simultaneous anaerobic digestion of two or more substrates. The combination of different feedstocks can improve substrate utilization, nutrient balance and process stability. Cow dung is readily available in agricultural environments and provides organic matter, nutrients and microbial diversity. Cassava wastewater, generated during cassava processing, contains readily biodegradable organic material. Their combination therefore provides an opportunity to integrate waste management with renewable energy generation (Nwosu-Obieogu et al., 2020; Oyedepo et al., 2023).

The need for this approach is linked to two related challenges. Improper management of cow dung and wastewater can create environmental and health concerns, while continued dependence on conventional energy sources contributes to energy insecurity and environmental degradation. The co-digestion of these materials offers a way of recovering energy from wastes while reducing the burden associated with their disposal (Akinyemi and Olaniyan, 2022; Adaramola et al., 2024).

Previous work reviewed in the study indicates that feedstock composition, pH, temperature, retention time, mixing, inhibitory compounds, microbial community structure and nutrient availability influence anaerobic digestion. Methanogenic microorganisms are particularly sensitive to changes in pH and operating conditions. Cow dung can contribute buffering capacity and nutrients, whereas cassava wastewater can supply readily soluble organic matter. The interaction between these characteristics makes substrate ratio an important consideration in co-digestion (Zhang et al., 2021; Khan et al., 2022).

During anaerobic digestion, complex organic materials pass through hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis. Hydrolysis converts complex polymers into simpler compounds; acidogenesis produces volatile fatty acids and other intermediates; acetogenesis converts these products into compounds such as acetate, hydrogen and carbon dioxide; and methanogenesis produces methane. The efficiency of these stages depends on the conditions within the digester and on the characteristics of the substrates.

The present study was designed to investigate the effects of co-digesting cow dung with cassava wastewater on bio-methane production. The specific objectives were to identify an appropriate mixing ratio, assess pH conditions associated with bio-methane production, and determine temperature conditions associated with the process. The study also considered the changes in

total dissolved solids (TDS), methane and carbon dioxide concentrations and particulate matter during the experimental period.

STUDY RATIONALE AND OBJECTIVES

The study was undertaken because improving the conversion of agricultural wastes into useful energy could simultaneously support waste management and renewable energy generation. Cow dung and cassava wastewater are both available agricultural waste streams, but their individual characteristics may create different conditions for anaerobic digestion. Testing different combinations therefore provides information on how substrate composition relates to pH, temperature, TDS and methane production.

- To identify the optimal mixing ratio of cow dung and cassava wastewater for bio-methane production.
- To assess the pH conditions associated with bio-methane production.
- To determine the temperature conditions associated with bio-methane production.

The environmental significance of the study lies in the potential to manage agricultural wastes while recovering energy. Anaerobic digestion can reduce the quantity of unmanaged organic waste and produce digestate that may be useful as an organic soil amendment. Capturing methane for productive use also provides an alternative to allowing methane-containing biogas to escape during uncontrolled waste decomposition. These benefits connect the study to broader waste-management, resource-recovery and sustainable-energy objectives.

From an economic perspective, biogas systems may provide an alternative energy source and create opportunities around the construction, operation, maintenance and servicing of digesters. The digestate can also potentially support agricultural production. From a societal perspective, access to cleaner energy can reduce dependence on traditional biomass fuels and can contribute to improved waste-handling practices. The thesis therefore considers anaerobic digestion as an intersection between environmental management, energy recovery and agricultural resource utilization.

The literature reviewed in the thesis emphasizes that co-digestion can provide synergistic effects when the characteristics of the substrates complement one another. In particular, cow dung may supply nutrients and buffering capacity, while cassava wastewater supplies readily fermentable organic matter. However, the same cassava wastewater can create unfavorable conditions when present in high proportions. The experimental comparison of 75:25, 50:50, 25:75 and 100:0 ratios was therefore used to examine how the relative quantities of the two substrates affected digestion conditions and methane production.

The study was carried out at the Directorate of University Farms (DUFARMS), Federal University of Agriculture, Abeokuta, Ogun State, Nigeria. Fresh cow dung was obtained from the cattle-farming area of the experimental site, while cassava wastewater was obtained from a cassava processing mill in Eleweran, Abeokuta. The experimental system used 25-litre kegs constructed as fixed-dome anaerobic digesters. Substrate mixtures occupied approximately three-quarters of each digester, leaving headspace for biogas accumulation.

RESEARCH AND FINDINGS

RESEARCH DESIGN AND DATA COLLECTION

The experimental design involved cow dung and cassava wastewater mixtures at 75:25, 50:50, 25:75 and 100:0 ratios. Water was used in preparing the cow dung slurry. The digesters were fitted with inlet, outlet and biogas collection connections and were sealed to maintain

anaerobic conditions. Substrates were mixed and loaded into the digesters, after which the systems were monitored for approximately three and a half weeks.

Data were collected three times per week. The monitored parameters included pH, temperature, methane and carbon dioxide concentration, electrical conductivity, total dissolved solids and particulate matter (PM2.5, PM1.0 and PM10). Gas leak checks and periodic flammability tests were also carried out. Methane and carbon dioxide were measured with a portable gas analyzer, while pH, temperature, TDS and electrical conductivity were measured using a multimeter. Gas samples for particulate-matter assessment were collected in a transparent bag before readings were taken with an air-quality meter. Readings were recorded in triplicates.

The results were interpreted using descriptive and inferential statistics. Measurements were reported as mean ± standard deviation, and Duncan's Multiple Range Test (DMRT) was used to identify differences among means at the stated significance level. The findings were considered in relation to the operating conditions required for anaerobic digestion and methanogenic activity.

FINDINGS ON pH

The 75:25 cow dung-to-cassava wastewater ratio maintained the most stable pH profile during the 22-day observation period, ranging from 5.95 to 6.56. Most readings remained above 6. The 50:50 ratio recorded values between 4.24 and 5.52, while the 25:75 ratio remained more acidic, ranging from 4.18 to 5.53. The 100:0 cow-dung-only treatment remained between 6.71 and 7.13.

The lower pH associated with the higher cassava wastewater proportions was interpreted in the thesis as being related to acid formation during fermentation and the reduced buffering influence of cow dung. The 75:25 treatment provided a comparatively stable environment, suggesting that the greater proportion of cow dung helped moderate the acidic influence of cassava wastewater. The findings also illustrate that substrate ratio strongly affected the chemical conditions within the digesters.

FINDINGS ON TEMPERATURE

Temperature varied across the treatments, with a noticeable decline around the ninth day followed by an increase around the eleventh day. The 75:25 treatment showed a generally stable profile and ended at 31.65°C on Day 22. The 50:50 treatment ended at 31.20°C, the 25:75 treatment at 30.75°C, and the 100:0 treatment at 30.57°C. The thesis associates the relatively stable temperatures with continued microbial activity and notes that the values generally occurred around the mesophilic operating region.

The larger temperature decline observed with the 25:75 treatment was interpreted as potentially related to the higher water content and dilution effect of cassava wastewater, together with possible inhibitory effects on microbial activity. Overall, temperature patterns showed that the substrate combinations did not behave identically, even though all treatments followed a broadly similar temporal pattern.

RESEARCH AND FINDINGS (CONTINUED)

FINDINGS ON BIO-METHANE PRODUCTION

Methane production showed the clearest difference among the treatments. The 75:25 treatment increased from 0.06 on Day 2 to 5.06 on Day 17, after which it declined to 2.36 by Day 22. The 50:50 treatment remained very low throughout the observation period, with values generally close to zero. The 25:75 treatment showed a similar low-production pattern. In contrast, the 100:0 cow-dung-only treatment recorded substantially higher methane values, reaching 36.32 on Day 17 and 33.61 on Day 22.

The results therefore show an important distinction between the most favorable co-digestion condition and the highest methane-producing treatment overall. Within the co-digestion treatments, 75:25 produced the most meaningful and sustained methane trend. However, cow dung alone produced considerably more methane than any of the tested mixtures. The thesis attributes the lower methane production at higher cassava wastewater proportions to acidity, dilution of fermentable organic matter and possible inhibitory substances such as cyanide. Cow dung's nutrient balance and microbial diversity were identified as factors that could support stronger methanogenic activity in the 100:0 treatment.

FINDINGS ON TOTAL DISSOLVED SOLIDS

TDS increased during the early stages of digestion and subsequently fluctuated or declined. The 75:25 treatment increased from 540.83 on Day 2 to 5,873.33 on Day 7 and recorded 5,813.66 on Day 11 before later fluctuations. The 50:50 treatment reached 7,308 on Day 7 and 6,791.66 on Day 11. The 25:75 treatment recorded 7,445 on Day 4 and 7,098.33 on Day 11. The 100:0 treatment generally had lower TDS values, although it also showed fluctuations, including a value of 8,038.33 on Day 9.

The thesis interprets the early increase in TDS as evidence of the breakdown and solubilization of organic materials. As digestion progressed, dissolved substances were consumed by microorganisms, converted into gaseous products or otherwise removed from the dissolved phase, resulting in later declines or fluctuations. Treatments containing greater proportions of cassava wastewater generally showed higher TDS levels, consistent with the presence of readily soluble material in the wastewater.

OVERALL RESEARCH FINDING

Taken together, the findings demonstrate that substrate composition affected the physicochemical conditions and methane production of the digesters. The 75:25 treatment maintained the most stable co-digestion environment in terms of pH and temperature and produced a clear methane trend. Nevertheless, the 100:0 cow-dung treatment produced the highest methane values in the experiment. The results therefore do not support treating the 75:25 ratio as the highest methane-yielding treatment overall; rather, it was the most favorable among the co-digestion options tested in the study.

CONCLUSION

This study examined the effects of co-digesting cow dung with cassava wastewater on biogas production using small fixed-dome digesters and different substrate ratios. The results demonstrated that the relative proportion of cow dung and cassava wastewater influenced pH, temperature, methane production and total dissolved solids during anaerobic digestion.

The 75:25 cow dung-to-cassava wastewater ratio produced the most stable conditions among the co-digestion treatments. Its pH remained within a comparatively narrow range of 5.95 to 6.56 over the 22-day period, and its temperature profile was relatively stable. It also demonstrated an increasing methane-production trend, reaching 5.06 on Day 17 before

declining toward the end of the observation period. These findings suggest that the 75:25 ratio provided the most favorable balance among the tested co-digestion treatments.

However, the cow-dung-only treatment produced substantially more methane than all the co-digestion treatments, reaching 36.32 on Day 17 and 33.61 on Day 22. This is an important finding because it shows that the treatment with the most favorable co-digestion conditions was not the treatment with the highest methane output overall. The higher proportions of cassava wastewater were associated with more acidic conditions and very low methane production, indicating that the composition of the wastewater and its proportion in the substrate mixture can constrain methanogenesis.

The TDS results further showed that mixtures containing more cassava wastewater generally had higher dissolved-solids levels. The observed fluctuations indicate continuing biological activity and changes in the availability and utilization of dissolved organic materials throughout digestion. Overall, the study confirms that anaerobic co-digestion of cow dung and cassava wastewater is possible, but the substrate ratio requires careful management.

The findings provide a basis for further investigation of agricultural waste-to-energy systems in the Nigerian context. Future work should include longer monitoring periods, controlled operating conditions, pilot-scale testing and further investigation of cassava wastewater characteristics and potential inhibitory compounds. Such work would help establish how the laboratory-scale observations can be translated into reliable waste-management and renewable-energy applications.

REFERENCES

Adetunji, A., Smith, B., Johnson, C., Adeyemi, M., Olatunji, K., Roberts, T., & James, L. (2020). The role of nutrient balance in anaerobic digestion: Insights from co-digestion studies. Bioresource Technology Reports, 15(3), 100–110.

Akinbile, C. O., Akinpelu, A. O., Ige, T. A., Ojo, K. S., Thomas, E. A., Adebanjo, M., & Omotayo, R. (2020). Effect of co-digestion on biogas production from cow dung and cassava wastewater. Journal of Environmental Management, 250(1), 109–117.

Akinbile, C. O., Jones, P. Q., Smith, R., Olawale, S. T., Adeola, A. A., Michaels, R. J., & White, P. D. (2022). The environmental impacts associated with traditional waste disposal methods compared to anaerobic digestion. Journal of Waste Management, 30(2), 300–312.

Akinbile, C. O., Doe, J., Smith, R., Adekunle, M. A., Adebisi, F. L., Martins, K. O., & Johnson, T. R. (2023). Microbial dynamics in co-digestion systems: Effects on biochemical methane potential. Journal of Environmental Management, 305, 1–10.

Akinola, O. J., Smith, T. J., Williams, R., Adeyemi, T. S., Olatunji, B. K., Roberts, M. L., & Omole, A. T. (2021). Biomethane production from co-digestion of cow dung and cassava wastewater. Journal of Environmental Management, 278, 111–120.

Angelidaki, I., Hansen, K. H., Madsen, M., Petersen, J. K., Jørgensen, L. M., Nielsen, S. O., & Andersen, M. P. (2021). Co-digestion of organic waste: A review. Waste Management, 120, 123–135.

Intanoo, P., Chavadej, S., & Intrasungkha, N. (2014). Anaerobic digestion of cassava wastewater for biogas production. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 49(1), 34–41.

Khan, M. I., Khanal, S. K., & Lee, J. W. (n.d.). Biomethane production from cow dung: A review. Renewable Energy, 146.

Khanal, S. K., Chen, W.-H., & Liou, J.-S. (n.d.). Anaerobic co-digestion: A review. Bioresource Technology, 98(18).

Kumar, P., Kumar, A., & Sharma, S. (2018). Anaerobic digestion of cow dung for biogas production: A review. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 53(1), 34–43.

Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabres, P. (n.d.). Anaerobic digestion of organic solid wastes: An overview. Waste Management, 34(12).

Müller, J. A., Schuchardt, F., & Kuhlmann, H. W. (n.d.). Enhancing biogas production from cow manure: Co-digestion with other organic wastes. Bioresource Technology, 319.

Wang, H., Li, X., Zhang, Y., Liu, J., Chen, Q., Roberts, M. L., & Kim, S. (2024). Microbial community dynamics in co-digesting organic waste. Applied Microbiology and Biotechnology, 108(6), 2345–2358.

Zhang, Y., Smith, P. R., Lee, S. H., Kim, J., Park, T., Roberts, F. A., & Choi, M. L. (2021). A comprehensive study on the environmental benefits of anaerobic digestion in agricultural settings. Environmental Science & Technology, 55(5), 4321–4330.

Zhang, Y., Lee, S. H., Kim, S. J., Park, M. Y., Cho, H. R., Roberts, M. T., & James, E. W. (2023). Optimizing co-digestion conditions for enhanced methane production. Bioresource Technology Reports, 15(4), 100–110.

IPORTANCE OF TRICHOSTRONGYLUS AXEI IN CATTLE PATHOLOGY

Academician Prof Dr Ivan PAVLOVIĆ
Scientific Institute of Veterinary Medicine of Serbia, Belgrade, Serbia
ORCID ID: 0000-0003-4751-6760
Prof Dr Jovan BOJKOVSKI
Faculty of Veterinary Medicine University in Belgrade, Belgrade, Serbia
ORCID ID: 0000-0001-7097-2559
MSc Ivanka HADŽIĆ
Association of Trimmers, Care and Therapy of Cattle Foot of Serbia, Belgrade, Serbia
ORCID ID: 0009-0005-3032-0173
Prof Dr Vesna KARAPETKOVSKA HRISTOVA
University "St. Kliment Ohridski" - Bitola; Faculty of Biotechnical Sciences – Bitola; N. Macedonia
ORCID ID: 0000-0002-5056-8003

Abstract:
Trichostrongylidae contains most of the important gastro-intestinal nematodes of cattle around the world. In moderate climate condition, *T.axeis* is the major economically important genus of parasite in ruminants. In Sebia, averige rate of cattle infection are 13.37-17.23%, Adult worms are small and hairlike, are 5 mm long, and have low fecundity. The life cycle of the trichostrongyles is direct. Adult female worms in the cattle's lay eggs, which are passed out of the body in the feces. Under favorable conditions (warmth and moisture), the eggs hatch into first-stage larvae (L1) within a few days. The L1 larvae feed on bacteria in the dung pat and molt into second-stage larvae (L2). The L2 larvae molt into third-stage larvae (L3). The L3 stage retains its old cuticle as a protective sheath, making it highly resistant to cold and dry conditions. Rain washes the infective L3 larvae out of the manure, allowing them to crawl up blades of wet grass where grazing cattle can easily consume them. The way of infection is strictly oral, through the consumption of contaminated pasture. The first appearance of larvae and adult worms on pastures occurs in May. Summer Peak are in June – July and Autumn/Winter accumulation are while the scorching heat of late summer can create a brief decline in active larvae. In cattle, *T. axei* changes the gastric mucosa and causes gastritis with superficial erosion and hyperemia of the abomasal mucosa, as well as diarrhea. Protein loss from the damaged mucosa and anorexia result in hypoproteinemia and weight loss. Inhibition (hypobiosis) does not occur. Clinical signs occur only with heavy infection, malnourishment, or stress. Typical signs are diarrhea (mucous and/or hemorrhagic) or constipation, general weakness and wasting, loss of appetite, reduced weight gains or even weight loss, In cattle trichostrongyles may have few detectable adverse effects, they may hinder production of meat and milk.
Keywords: *Trichostrongylus axei*, cattle, pathology

EXTRACTION OF PROTEIN FROM LEATHER WASTES AND ITS REUTILIZATION FOR VALUE-ADDED APPLICATIONS IN PAKISTAN

Dr.Beena Zehra
0000-0002-0940-7507
Dr. Hafiz Rub Nawaz
0000-0003-1062-7432
Tahira Ayaz
0000-0002-0618-1741
Dr. Rajkumar Dewani
Leather Research Centre, PCSIR, D-102, SITE, South Avenue, Karachi, Pakistan.
0000-0001-8870-1175

Abstract:
The Pakistan leather industries (tanneries) generates large quantities of solid wastes, including skin fleshings, chrome shavings,trimmings and other collagen-rich residues, which are commonly disposed of by landfilling or other conventional methods. The disposal of these wastes can contribute to environmental pollution beside this loss of potentially valuable protein resources. The present study focuses on the extraction and recovery of protein from leather solid waste and its reutilization in value-added products . Leather waste was collected and subjected to suitable pretreatment followed by controlled alkaline hydrolysis to recover soluble protein fractions. The recovered protein hydrolysate was separated from insoluble residues and further processed for potential applications. The recovered protein showed potential for use a water resistant surfactant and a wood binder after chemical modifications. This research approach provides an opportunity to convert an environmentally problematic leather solid waste into new products. This study demonstrates that protein extraction can provide an effective means of reducing environmental pollution and increasing the value of leather-industry waste.
Keywords: Leather waste; protein hydrolysate; waste valorization; recycling.

AI-DRIVEN ADAPTIVE MODULATION AND CODING FOR DYNAMIC WIRELESS CHANNELS

Suji S
Department of Electronics & Communication Engineering
R.M.K. Engineering College
Thiruvallur, India
Praveen Kumar S
Department of Mechanical Engineering
R.M.K. Engineering College
Thiruvallur, India

Abstract
Wireless communication channels are highly dynamic due to fading, interference, mobility, and variations in Signal-to-Noise Ratio (SNR). Conventional Adaptive Modulation and Coding (AMC) techniques generally depend on predefined thresholds and may not adapt efficiently to rapidly changing channel conditions. This project proposes an **AI-driven Adaptive Modulation and Coding system** that intelligently selects the appropriate modulation scheme and coding rate according to real-time channel conditions.
The proposed system uses **Artificial Intelligence and Machine Learning** techniques to analyze parameters such as SNR, channel quality, interference, and transmission conditions. Based on the predicted channel state, the system dynamically selects a suitable modulation and coding scheme. Robust modulation with stronger coding can be selected during poor channel conditions, while higher-order modulation and higher coding rates can be used when channel quality improves. This enables reliable communication while maximizing data throughput and spectral efficiency.
The proposed AI-based approach aims to reduce Bit Error Rate (BER), improve throughput, increase spectral efficiency, and provide faster adaptation to changing wireless environments. The system can be applied to modern **5G/6G wireless networks, Internet of Things (IoT), and high-mobility communication systems**, where intelligent and efficient transmission strategies are essential.
Keywords:
Artificial Intelligence, Adaptive Modulation and Coding, Machine Learning, Dynamic Wireless Channels, SNR, Channel Estimation, Bit Error Rate, Spectral Efficiency, Throughput, 5G/6G, IoT.

IOT BASED SOLAR POWER SMART IRRIGATION SYSTEM

Joshna Sherlyn p
Dr.Nixon Samuel Vijayakumar
[1] UG Scholar & [2] Professor, Department of Science and Humanities, R.M.K. Engineering College, Kavaraipettai.

ABSTRACT

Agriculture Is The Most Important Sector For Living Being. With Increasing Population We Need Modern Ways To Improve Agriculture And Use It Efficiently. Agriculture Consumes Large Amount Of Fresh Water .So We Need To Take Steps To Use Water Efficiently.

In Traditional Method, Irrigation Is Done At A Fixed Time Without Analysing Whether The Field Actually Needs Water. The Farmer Used To Manually Water The Plants, Which Takes A Lot Of Time, Energy And It's Inefficient.

But In Smart Irrigation System, ESP32 Microcontroller Is Used To Collect Data And The Automatic Sensor Is Used To Supply Water When Needed. It Saves Their Time, Energy And Its Cost Efficient Too.

The Smart Irrigation System Analyses Whether The Field Has Enough Moisture Level. If The Moisture Level Goes Below The Required Amount, The Sensor Detects It And Automatically Starts Watering The Field Until The Field Has Got Enough Moisture Content . The system includes soil-moisture sensing with real-time weather monitoring. Temperature, humidity, and rainfall data are collected using environmental sensors. The controller activates irrigation only when the soil is dry and no rainfall is detected, reducing unnecessary water consumption.

Agricultural Field Might Be Far From Electrical Connection. Therefore We Use Solar Power So That Farmers Don't Have to Depend upon the Electricity and It's Obviously The Most Sustainable Method. This sensor works with both electricity and solar power.

It can work with different language so that Famers Can Monitor The Data Easily Using A Phone Or A Laptop.

Key Words: Agriculture – Manual Supply Of Water– Esp32 Microcontroller – Sensor Detects Field Moisture Level– Automatically Waters Field– Solar Powered Device.

PLANT-DERIVED BIOACTIVE COMPOUNDS FOR TESTOSTERONE REGULATION: MECHANISMS AND POTENTIAL BENEFITS

Tasawar Iqbal
(ORCID: 0000-0002-5854-9069)
Institute of Physiology and Pharmacology, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan

ABSTRACT

Testosterone, the primary male sex hormone, plays a pivotal role in maintaining various physiological processes, including muscle growth, bone density, and sexual function. Dysregulated testosterone levels are associated with numerous health concerns, such as infertility, osteoporosis, and metabolic disorders. While synthetic hormone replacement therapies are commonly used, their adverse effects have prompted interest in natural alternatives. Plant-derived bioactive compounds (PDBCs) offer a promising avenue for testosterone regulation due to their minimal side effects and a wide array of therapeutic properties. This abstract explores the mechanisms and potential benefits of PDBCs in modulating testosterone levels. Several phytochemicals, including flavonoids, alkaloids, saponins, and polyphenols, have demonstrated significant potential in influencing the hypothalamic-pituitary-gonadal (HPG) axis, the central regulator of testosterone synthesis. For instance, flavonoids such as quercetin and kaempferol exhibit antioxidative properties that mitigate oxidative stress a key factor in Leydig cell dysfunction. Saponins from plants like *Tribulus terrestris* and *Fenugreek* have been shown to enhance luteinizing hormone (LH) secretion, stimulating testosterone production. Moreover, polyphenolic compounds like resveratrol and curcumin modulate inflammatory pathways and improve testicular function. This abstract also highlights the safety profiles, bioavailability challenges, and emerging technologies to enhance the efficacy of PDBCs. Understanding the molecular pathways influenced by these compounds can facilitate the development of novel plant-based therapeutics for testosterone-related disorders. Furthermore, integrating PDBCs into dietary and pharmacological interventions may offer a holistic approach to managing hypogonadism and other testosterone-related conditions. This paper underscores the need for comprehensive clinical trials to validate the efficacy and safety of PDBCs, paving the way for their incorporation into mainstream medical practices. PDBCs represent a sustainable and biologically compatible strategy for testosterone regulation, offering potential benefits for male health and overall well-being.

Keywords: Testosterone Regulation, Plant-Derived Bioactive Compounds, Hypothalamic-Pituitary-Gonadal Axis, Phytochemicals, Hormonal Balance, Male Health

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

THERAPEUTIC IMPORTANCE OF CAMEL MILK IN ENHANCING WHITE BLOOD CELL LEVELS AND IMMUNE FUNCTION

Tasawar Iqbal
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5854-9069
Institute of Physiology and Pharmacology, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan
Sidra Altaf
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7717-1375
Department of Pharmacy, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan

Abstract

Camel milk has gained increasing scientific attention due to its unique bioactive composition and potential immunomodulatory effects. This review explores the therapeutic importance of camel milk in enhancing white blood cell (WBC) levels and improving overall immune function. Camel milk is rich in immunoglobulins, lactoferrin, lysozyme, lactoperoxidase, and antioxidant vitamins (C and E), which collectively contribute to its immune-boosting properties. These bioactive compounds play a vital role in stimulating leukocyte activity, enhancing phagocytosis, and improving the body's defense mechanisms against bacterial, viral, and oxidative stress-related disorders. Recent studies suggest that regular consumption of camel milk may positively influence hematological parameters, including an increase in total leukocyte count, particularly in individuals with weakened immunity or chronic inflammatory conditions. Its insulin-like proteins and anti-inflammatory peptides further support immune regulation by modulating cytokine production and reducing inflammatory responses. Additionally, camel milk has been reported to exhibit protective effects on bone marrow function, which is directly associated with white blood cell production. Experimental and clinical evidence indicate that camel milk may serve as a complementary nutritional therapy in immunocompromised patients, including those with autoimmune diseases, infections, and cancer-related immunosuppression. Its hypoallergenic nature also makes it suitable for individuals with dairy sensitivities, enhancing its therapeutic applicability. Camel milk represents a promising natural functional food with significant immunotherapeutic potential. Its ability to enhance white blood cell levels and strengthen immune responses highlights its relevance in preventive and supportive healthcare strategies. Further large-scale clinical trials are recommended to establish standardized dosage and long-term safety profiles.

Keywords: Camel Milk, White Blood Cells, Immunity Enhancement, Immunoglobulins, Lactoferrin, Immune Modulation

"INDOLE-3-BUTYRIC ACID-BASED HYDRAZONES AS EMERGING ANTIBACTERIAL AND ANTIOXIDANT AGENTS: A COMBINED EXPERIMENTAL AND IN SILICO APPROACH"

Ummy Rubab
Muhammad Ibrahim
Irfa Sakandar
Department of Applied Chemistry, Government College University Faisalabad, Faisalabad-38000, Pakistan

Abstract
Synthetic organic chemistry is getting recognition for the production of valuable chemical building blocks having medicinal importance. Herein, Indole-3-butyric acid derived hydrazones (*E*)-*N*-(hexan-2-ylidene)-4-(1*H*-indol-3-yl)butanehydrazide (2-HIBH), (E)-N'-butylidene-4-(1H-indol-3-yl)butanehydrazide (BIBH), 4-(1H-indol-3-yl)-*N*'-((1*E*,2*E*)-3-phenylallylidene) butane hydrazide (CIBH), (*Z*)-4-(1*H*-indol-3-yl)-*N*-(3-methylbutylidene) butanehydrazide (VIBH), are synthesized by coupling *Indole-3-butyric acid based* hydrazide depicting substituted aldehydes under specific conditions. The characterization of the synthesized hydrazones was performed using melting point, UV-visible, FT-IR, and NMR spectroscopy. The synthesized compounds (2-HIBH, BIBH, CIBH, and VIBH**)** were screened for their biological activities, such as antibacterial and antioxidant. Compound VIBH exhibited maximum ZOI against *E. coli* and *S.aureus* (19.6±0.88), compound BIBH and CIBH exhibited the maximum antioxidant. Density functional theory (DFT) calculations at the B3LYP/6-311+G (d, p) level supported the experimental findings. Frontier molecular orbital analysis indicated efficient HOMO to LUMO charge transfer, and energy gaps (DE) between 1.31 eV and 4.89 eV between BIBH and 2-HIBH respectively. Long conjugation and intramolecular charge-transfer interactions were confirmed by natural bond orbital analysis. The global reactivity descriptors showed that BIBH is the softest and the most electrophilic of all the compounds whereas VIBH is kinetically more stable. Calculations using nonlinear optical (NLO) demonstrated increased values of the first hyperpolarizability (β) compared to urea, which demonstrates the electronic potential of the hydrazone framework. The biological results were further rationalized by molecular docking studies, which showed that BIBH has the highest ligand-protein complex stability, with the highest antibacterial docking score of S = -6.8 kcal/mol and 2-HIBH show strong binding in case of antioxidant docking score of S = -5.5 kcal/mol. ADMET results confirmed favorable drug-like and pharmacokinetic properties for all compounds. Altogether, the results of the combined experiment and computational studies point to VIBH as a promising multifunctional scaffold that could be used in the future in medicine, electronics, and heterocyclic chemistry.

Keywords*:*
Indole-based hydrazones; Spectroscopic analysis; DFT; Molecular docking; ADMET analysis; Antibacterial potential; Antioxidant potential

FEATURES OF RENAL AND LUMBAR HEMODYNAMICS DURING MUSCLE CONTRACTION AND AFTER COFFEE INTAKE IN STUDENTS

Ruslan SHEVERDIN
Independent researcher
Belarusian State University,
Faculty of Biology, Minsk, Republic of Belarus
Victor KAZAKEVICH
PhD in Biology, Associate Professor
Belarusian State University,
Faculty of Biology, Human and Animal Physiology Department,
Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

In recent years, there has been growing interest in the physiological mechanisms regulating blood circulation in skeletal muscles and kidneys under various functional loads. Particular attention is paid to factors influencing hemodynamics in the lumbar region, which plays a key role in maintaining posture and enabling trunk movements. Furthermore, the widespread consumption of caffeine among young people makes the study of its effect on renal blood flow highly relevant.

The aim of this study was to assess changes in blood flow in the lumbar region and kidneys during lateral trunk bends, as well as after coffee consumption, in healthy male students using rheography. To achieve this aim, a literature review was conducted and an experimental study was performed involving 15 volunteers aged 18–22 years. The following parameters were recorded: rheographic index (RI), peripheral vascular resistance index (PVRI), maximum rate of rapid blood filling (MRRBF), and diastolic index (DI).

The results showed that during left and right trunk bends, RI and MRRBF decreased bilaterally, along with asymmetric changes in PVRI, indicating mechanical compression of blood vessels and activation of compensatory vasomotor reactions. After coffee consumption, a sharp increase in RI and MRRBF was observed within the first 5 minutes, followed by a gradual return to baseline values by 15–20 minutes, reflecting the biphasic nature of caffeine's action: initial vasoconstriction and subsequent stabilization of blood flow.

In conclusion, lateral trunk bends induce complex asymmetric hemodynamic changes in the lumbar region, while coffee exerts a dynamic biphasic effect on renal blood flow. These findings expand our understanding of muscle physiology and may be used to develop recommendations for the prevention of circulatory disorders.

Keywords: lumbar region, renal blood flow, muscle contraction, coffee, rheography, hemodynamics

RATIONAL DESIGN, SYNTHESIS AND BIOLOGICAL EVALUATION OF FUNCTIONALIZED COUMARIN-3-CARBOXAMIDE DERIVATIVES FOR POTENTIAL THERAPEUTIC APPLICATIONS

Ummy Rubab
Muhammad Ibrahim
Department of Applied Chemistry, Government College University Faisalabad, Faisalabad-38000, Pakistan

Abstract

The synthesis of amide bonds has been a pillar in organic synthesis specifically in the synthesis of pharmaceuticals and other biologically active molecules. A library of coumarin-3-carboxylic acid based amide synthesized by using one-pot reaction. In first synthesized the acid halide of coumarine-3-carboxylic acid confirmed by TLC. Next react the synthesized acid halide with appropriate amine to synthesize final product amide. The synthesized amide derivatives are screened for their biological activities like antibacterial and antioxidant. Compounds 3h and 3c demonstrated strong efficacy against *S. aureus*. However, compounds 3m and 3h exhibited comparable zones of inhibition, against *E.coli* respectively. Even though it is everywhere and has been in use for a long time, the existing techniques of forming amide bonds are nearing operational and environmental constraints. Issues of high cost, low atom economy and chemical waste production have been the subject of strong concern and more sustainable and efficient options are required. Herein, **3a-3o** have been synthesized by one pot synthesis using coumarin-3-carboxylic acid and amines/anilines at low temperature with unique biological activities and characterization. The compounds **3a–3o** were subjected to ADMET analysis which showed good drug-likeness and PK properties and all the derivatives conformed to Lipinski's Rule of Five, high gastrointestinal absorption and no PAINS alerts. Overall, the compounds exhibited appropriate physicochemical properties, good oral bioavailability potential and acceptable permeability profiles, indicating that they have the potential for being promising therapeutic agents for the development of orally administered drugs.

***Keywords*:** One pot synthesis, pharmaceutical development and Bioactive molecules.

MITIGATING URBAN FRAGMENTATION: A COMPARATIVE ASSESSMENT OF GREEN BRIDGING FOR PERI-URBAN LANDSCAPE RESILIENCE

Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti
Associate Professor & COD, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.
Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran, Professor, IIUI, Islamabad.
Ar. Rashid Ali Khan
Assistant Professor, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.
Ar. Naveed ur Rehman Anwar
Assistant Professor, Department of Architecture, Balochistan University of Information Technology, Engineering and Management Sciences, Quetta.
Ar. Alishpa Naveed
Practicing Architect & Interior Designer, Pakistan.

ABSTRACT

The development of Lahore Ring Road (LRR) has significantly improved the regional transportation logistics; however, it is also a long-lasting ‘grey barrier' which divides the peri-urban systems and breaks the micro-social fabric of adjoining residential clusters. Considering the dynamics of traffic throughput is the main approach to infrastructure assessment, this research uses a socio-ecological approach to assess the feasibility of “Green Bridging” as a restorative landscape intervention. This paper takes an infrastructural ‘barrier effect’ approach based on the secondary sources of systematic literature review and comparative case analysis to explore the infrastructural barrier effect, experienced through the urban fabric of Lahore. The study will map out key socio-ecological break points in the most affected areas of Lahore, such as Bahria Town, Lake City and Northern Loop, by comparing international precedents of vegetated overpass, namely successful models in Singapore and the Netherlands, with Lahore's micro-climatic and spatial variables. The evaluation is organized around three thematic headings: the mitigation of the Urban Heat Island (UHI) effect through the creation of local metabolic corridors; the reopening of the pedestrian permeability of fragmented communities; and the use of native plants for the bioremediation of vehicles exhaust. The results show that GIs are a multipurpose solution to conventional pedestrian overpasses that can serve as a social connective tissue as well as a biological conduit. The paper concludes with a vision and a strategy for introducing living architecture into the next stages of LRR development, and suggests a paradigm change to resilient and socially-engaged urban ecosystems.

KEYWORDS: Socio-ecological infrastructure, Barrier effect, Green bridging, Urban fragmentation, Lahore Ring Road (LRR).

GOVERNING ROAD SAFETY IN URBAN SOUTH ASIA: PUBLIC PERCEPTIONS AND POLICY STRATEGIES FOR ANIMAL–VEHICLE COLLISIONS IN LAHORE, PAKISTAN

Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti
Associate Professor & COD, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.
Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran, Professor, IIUI, Islamabad.
Meharunisa Butt
Urban Planner & Researcher, Lahore, Pakistan.
Ar. Fahad Khan
Lecturer, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.
Ar. Kabeer Ud Din Naseer
Assistant Professor, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.

ABSTRACT

Animal-vehicle collisions (AVCs) represent a significant yet understudied challenge in rapidly urbanizing cities of the Global South, where free-roaming domestic animals compound traffic safety risks. While extensive research exists on wildlife-vehicle collisions in developed nations, little attention has been given to urban AVC dynamics in South Asian contexts. Therefore, this study aims to explore public perceptions of AVCs and evaluate preferred prevention strategies in Lahore, Pakistan, where free-roaming livestock and stray animals significantly impact traffic safety. Using a structured questionnaire survey administered to 575 respondents, the research indicate that vehicle speed emerges as the most critical factor, particularly among respondents aged 31-40 years, while poor lighting and lack of signage are widely recognized as contributing elements to AVCs. Female participants indicated stronger support for regulatory measures such as speed enforcement, and male respondents supported infrastructural solutions, i.e., fencing to mitigate AVCs. To reduce AVCs, educational attainment significantly influences preferences, as highly educated respondents prioritize awareness campaigns while those with primary education emphasize practical roadside maintenance. These findings provide empirical evidence to guide the development of context-sensitive prevention strategies in South Asian cities, suggesting the need for integrated approaches that combine infrastructure improvements, public education initiatives, and policy reforms.

KEYWORDS: Animal-Vehicle Collisions (AVCs), Traffic Safety, Free-Roaming Animals, Urban Transportation, Road Infrastructure.

THE SPATIAL DYNAMICS OF SOCIAL CAPITAL: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW ON URBAN FORM, NEIGHBOURHOOD DESIGN, AND COMMUNITY COHESION

Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti
Associate Professor & CoD, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore. Corresponding Resource person)
Ar. Dr. Zulfiqar Ali Tariq
Chief Architect, NESPAK, Lahore, Pakistan.
Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran
Department of Environmental Science, IIUI, Islamabad, Pakistan.
Dr. Syed Hamid Arshad
Professional CRP expert, Government of Punjab, Pakistan.

ABSTRACT:
Social capital, defined through systems of social networks, mutual trust, norms of reciprocity, and shared civic engagement, serves as a vital catalyst for urban resilience, public health, and social cohesion. While classical sociological literature primarily conceptualizes social capital through interpersonal or institutional frameworks, modern spatial scholarship increasingly recognizes the built environment as an active structural determinant of human interaction. This review paper systematically synthesizes historical and contemporary theories linking social capital with urban form, neighborhood design, and spatial morphology. By critically evaluating diverse theoretical models—ranging from Bourdieu, Coleman, and Putnam to modern spatial syntax and complex urban modeling—this study demonstrates how spatial configuration directly conditions movement patterns, encounter probabilities, and localized community bonding. The analysis highlights how pedestrian-friendly, highly connected, mixed-use traditional layouts foster organic trust and informal surveillance, whereas automobile-centric, segregated suburban environments frequently fragment social networks and dilute civic attachment. Furthermore, the review identifies significant methodological and geographical gaps in current literature, which predominantly reflects Western, highly regulated urban landscapes while under-examining the dynamic socio-spatial realities of rapidly urbanizing contexts in the Global South. By bridging spatial mechanics with sociological theory, this paper establishes a comprehensive conceptual framework that integrates spatial syntax parameters with community resilience indicators. Ultimately, the synthesis provides urban designers, spatial planners, and social scientists with actionable insights into how physical space can be intentionally structured to cultivate sustainable, socially cohesive, and resilient urban communities.

KEYWORDS:
Social Capital, Urban Morphology, Space Syntax, Built Environment, Community Cohesion.

FROM TRANSIT CORRIDOR TO ECOLOGICAL CORRIDOR: DEVELOPING A GREEN URBAN SPINE FRAMEWORK FOR BIODIVERSITY CONSERVATION AND CLIMATE-RESPONSIVE URBANISM IN LAHORE

Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti
Associate Professor & COD, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.
Ar. Usman Raza Kazmi
Lecturer, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.
Ar. Ar. Naveed ur Rehman Anwar
Assistant Professor, BUITEMS, Quetta, Pakistan.
Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran
Professor, IIUI, Islamabad.
Ar. Rabia Shahbaz
Educationist & Architect, Quetta, Pakistan.

ABSTRACT

The alarming rate of urbanization has led to the disappearance of green spaces, fragmentation of the landscape, reduction in biodiversity and poor environmental conditions in Lahore. The Lahore Metro Bus Corridor is one of the important public transportation infrastructures in Lahore and has a potential of acting beyond mobility and can be used as a continuous green urban spine of Lahore. The potential of Lahore Metro Bus Corridor for the integration of green infrastructure to improve biodiversity connectivity, environmental quality and public health has been evaluated in this study, which covers the distance from Shahdara to Gajjumata. The following mixed-method research approach was used: site observations, GIS-based spatial analysis, vegetation assessment, and international best practices. The results indicate that while there is existing vegetation and landscape elements along the corridor, they are limited and fragmented to provide meaningful ecological connectivity. Spatial analysis revealed important green gaps, ecological barriers and opportunities for green enhancements, with a particular focus on the pedestrian areas, station and medians. International precedents like Curitiba's Green BRT Corridors and Seoul's Cheonggyecheon Restoration Project are explored, reflecting the benefits of embedding ecological services into transport infrastructure. A conceptual Green Urban Spine Framework is suggested based on the findings, focusing on the continuous green corridors, the greening of the stations, and connectivity between pedestrians and cyclists. Finally, the study recommends that Lahore Metro Bus Corridor can be developed as a multifunctional ecological corridor, that not only will conserve biodiversity, but also be resilient to climate change, promote sustainable mobility and improve the living standards of the city's inhabitants, and offer a replicable model for future transit-oriented green infrastructure projects across Pakistan.

KEYWORDS: Green Urban Spine, Biodiversity Connectivity, Green Infrastructure, Lahore Metro Bus Corridor.

MOBILITY TRANSITIONS, DIASPORA RETURN AND CIRCULATORY LIVING BETWEEN ALBANIA, GREECE AND NORTH MACEDONIA

MARCELA MELE
PhD in Human Geography
Department of Tourism, Business Faculty, University Aleksandër Moisiu of Durrës, Albania
ORCID: 0000-0003-2914-297X
HERMIS MELE
Msc Landscape Architecture
Faculty of Agricultural and Environment, Agricultural University of Tirana, Albania
ORCID: 0009-0009-8831-3231

Abstract
European mountain regions are changing because of complex forms of mobility that challenge conventional understandings of settlement, migration, and territorial decline. This paper examines the Korçë cross-border mountain region in southeastern Albania as a space of seasonal and translocal inhabitation structured by circular migration, diaspora return, tourism mobility, and cross-border living practices. Located between Albania, Greece, and North Macedonia, the Korçë region has historically functioned as one of the principal mobility corridors of the Western Balkans, characterized by labor migration, remittance economies, and fragmented family geographies. The paper introduces the concept of seasonal re-inhabitation, where people come back to their villages through temporary return migration, ritual gatherings, summer tourism, and multilocal dwelling practices. The study combines an innovative mixed-method combining longitudinal demographic analysis (1990–2025), mobility calendars documenting annual circulation patterns, GIS-based seasonal population mapping, semi-structured interviews, and participant observation during seasonal return events and tourism periods. The findings reveal that while permanent out-migration contributes to ageing and shrinking populations, temporary returns, diaspora investments, and tourism mobilities sustain local economies, preserve built heritage, and reactivate social life during summer and religious festivities. The Korçë case demonstrates that mountain regions should also be understood as dynamic territories increasingly sustained through cyclical and transnational forms of inhabitation. The paper contributes to current debates on mountain mobilities, multilocal dwelling, and territorial resilience by proposing “seasonal re-inhabitation” as a new framework for understanding demographic and socio-spatial transformations in European mountain areas.
Keywords: circular mountain territoriality, translocal living, cross-border mobility; seasonal re-inhabitation, diaspora return, mobility calendars.

OPTIMIZING NITROGEN FERTILIZATION TO BALANCE AGRICULTURAL PRODUCTIVITY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

ELABBARI Chaimaa
Pr. Labjar Najoua
Pr.EL Hajjaji souad
LS3MN2E-CERNE2D, Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat

Abstract

In agriculture, soil and water pollution by nitrates is significantly exacerbated by the excessive use of nitrogen fertilizers, which can lead to major environmental impacts such as eutrophication, groundwater contamination, and health risks.

Several strategies have been developed to address these issues by reducing nitrogen inputs while improving nitrogen use efficiency and maintaining agricultural productivity.

These strategies include adjusting fertilizer application rates, using slow-release fertilizers, applying precision fertilization tailored to crop needs, introducing nitrogen-fixing crops such as legumes, practicing crop rotation, and improving agricultural techniques.

These approaches not only help limit nitrogen losses to the environment but also enhance the quality of agricultural products and reduce costs for farmers. They form part of a broader effort to ensure the sustainability of agricultural systems in the face of climate change, balancing productivity, environmental protection, and resilience.

Keywords

Nitrate pollution, Nitrogen fertilizers, Groundwater contamination, Eutrophication, Precision fertilization, Sustainable agricultura, Environmental protection, Climate change resilience

THE ROLE OF INTERNATIONAL FUNDING SOURCES IN PRESERVING HUMAN HERITAGE: JORDAN AS A CASE STUDY

Faisal Hussein
Hashemite University – Department of Financial Technology
Amani Kamal Kanani
The Hashemite University – Queen Rania Faculty for Archaeology and Heritage Researcher,

Abstract
International funding sources play a vital role in restoring and maintaining cultural heritage worldwide. According to United Nations organizations in this domain, funding varies between technical support, financial assistance, and training and capacity building. However, direct financial funding is considered the most critical component in the Arab world, particularly in Jordan.
This research addresses the role of funding sources in preserving human heritage using Jordan as a case study. Cultural and civilization heritage constitutes the reservoir of human memory and the pillar of community identity; however, its sustainable conservation requires financial investments and technical capabilities that often exceed the immediate capacities of local government budgets. In this context, international and regional funding sources emerge as a pivotal element in the heritage preservation equation. While UN organizations and international agencies diversify their roles between offering technical support, specialized training, and capacity building, direct financial funding remains the essential lifeline for reviving archaeological and historical sites—especially in the Middle East and the Arab region, which are characterized by a rich legacy alongside growing economic and environmental challenges.
Jordan presents an exceptional model and a live case study in utilizing and managing international funding to preserve and develop world heritage. Jordan possesses deep-rooted civilization history extending from the Stone Ages through the Classical and Islamic periods, making it a focal point for donors and specialized international funds.

Dimensions and Types of International Support in the Field of Heritage

The philosophy of international organizations—led by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (**UNESCO**), the International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (**ICCROM**), and the International Council on Monuments and Sites (**ICOMOS**)—is rooted in protecting heritage as a shared property of all humanity. Forms of support provided to developing countries are distributed across four main tracks:

1. **Direct Financial Funding:** Represented by financial grants and governmental donations allocated for implementing restoration, excavation, and emergency rescue projects for sites at risk of destruction.
2. **Technical and Technological Support:** Providing modern technologies such as 3D laser scanning (**LiDAR**), chemical analysis of archaeological materials, and building digital documentation databases (**GIS**).
3. **Training and Programmatic Qualification:** Organizing training workshops to transfer expertise and qualify national cadres in preventive restoration and site management.
4. **Sustainable Development and Visitor Management:** Developing the infrastructure of tourist sites and museums to ensure heritage protection while generating economic returns for local communities.

Despite the strategic importance of all these forms, field realities in the Arab world indicate that financial funding serves as the primary engine and essential prerequisite for activating all other

tracks; technical surveys, advanced technology, and field training programs cannot be executed without sustainable financial coverage.

Jordan as a Case Study: Investing International Funding in Heritage Preservation

Jordan represents an ideal environment for studying the impact of international funding on human heritage protection. Despite the Kingdom's limited economic resources, the archaeology and tourism sectors—in coordination with academic and local entities—have successfully attracted multilateral funding that contributed to rescuing and developing dozens of historical landmarks.

- **United States Agency for International Development (USAID):** One of the largest donors funding heritage conservation and archaeological environment preservation in Jordan through programs aimed at sustainable site management and development, such as the *Sustainable Cultural Heritage Through Engagement of Local Communities Project* (**SCHEP**).
- **UNESCO:** Provided targeted funding to protect, reconstruct, and restore World Heritage sites, such as the ancient city of Petra, desert castles (e.g., Quseir 'Amra), and Um er-Rasas.
- **German Corporation for International Cooperation (GIZ):** Contributed to supporting urban development projects in historic cities such as As-Salt and Um Qais, along with technical support for mosaic and fresco conservation.
- **U.S. Ambassadors Fund for Cultural Preservation (AFCP):** Provided significant financial grants to restore unique archaeological sites, including the Byzantine Church in Um er-Rasas, as well as wall paintings in Ma'an and Quseir 'Amra.
- **Japan International Cooperation Agency (JICA):** Funded the establishment and modernization of major museums, such as **The Jordan Museum** and the As-Salt Historical Museum, alongside upgrading museum display infrastructure.

Field Impact of Financial Funding in Jordan

Direct financial funding and assistance in Jordan have yielded tangible results that highlight the importance of international support:

- **Site Protection and Stabilization:** Rescuing numerous archaeological tombs and structures built from sandstone or mudbrick from collapse caused by climate change and erosion.
- **Local Community Engagement and Empowerment:** Transforming financial funding into job opportunities and micro-enterprises for residents of villages adjacent to archaeological sites (e.g., in Wadi Musa), who were trained in restoration work and employed as guides and heritage custodians.
- **Enabling Digital Documentation:** Supporting the Department of Antiquities (**DoA**) in establishing integrated archaeological information systems (**JADIS** and **MEGA-Jordan**) with U.S. financial support, representing an advanced system for inventorying and registering sites across the Kingdom.

Challenges and Governance of International Funding

Despite the significant benefits of international funding in protecting Jordanian and human heritage, several challenges must be addressed to maximize outcomes:

1. **Dependence of Sustainability on External Funding:** The stall or halt of certain projects once grant funding ends requires formulating financial sustainability plans backed by local tourism revenues.
2. **Donor Conditions and Priorities:** Research interests of international institutions may occasionally conflict with national excavation and restoration priorities, necessitating the alignment of funding with a unified national vision.

3. **Balancing Conservation and Commercial Investment:** The challenge of safeguarding an archaeological site's intrinsic value against pressures to turn it into a commercial tourist attraction.

The Jordan case study proves that international financial funding remains the backbone for sustaining and protecting human heritage in the Arab world. It transcends numerical values and financial aid to become a tool for development, memory revival, and building cultural partnerships between nations. To optimize the utilization of these sources, the following measures are recommended:

- **Establish a Joint National Arab Fund:** To finance emergency heritage crises in cooperation with international organizations.
- **Link Funding to Local Sustainability:** Mandate that a portion of international funding be directed toward training national cadres and raising local labor wages.
- **Unify Donor Databases:** To prevent redundant funding at the same sites and redirect resources toward high-need areas, such as intangible heritage or neglected secondary sites.

Keywords: Funding Sources, Heritage Conservation, Jordan, UNESCO, USAID, Human Heritage, Archaeological Site Management.

TEACHING AND LEARNING OF WRITTEN PRODUCTION IN GRADE 10 IN GUINEA: PRACTICES AND CHALLENGES

Mahuton Géoffroy DJESSOU
Institut Supérieur des Sciences de l'Education de Guinée (ISSEG), Guinée Conakry
ORCID: https ://ORCID.org/0009-0008-1332-6460
Saba ZOUMANIGUI
Institut Supérieur des Sciences de l'Education de Guinée (ISSEG), Guinée Conakry

ABSTRACT
Since independence, French has been the official language and the main language of instruction in Guinea. Mastery of French is essential for academic success, particularly in written production, which requires skills in vocabulary, grammar, verb conjugation, spelling, and syntax. This activity also enables learners to organize their ideas and express their thoughts clearly. However, the teaching and learning of writing remain challenging in secondary schools. This study examines the practices and difficulties related to written production in Grade 10 classes in two secondary schools in Conakry: Almamy Samory Touré Secondary School in Sangoyah and Banque mondiale Secondary School in Lambanyi. It aims to identify the difficulties experienced by learners as well as those encountered by teachers. The study is based on questionnaires administered to learners and teachers, classroom observations, and an analysis of students' written work. The findings reveal significant difficulties and highlight the need to strengthen and diversify teaching practices.
Keywords : *Written production - Teaching - Learning - Difficulties - Guinea.*

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

NUMERICAL SOLVER IMPACT ON THE ACCURACY OF FIVE-PARAMETER PHOTOVOLTAIC SINGLE-DIODE MODEL IDENTIFICATION

Ayoub LAHBOUB
Laboratory of Materials, Signals, Systems and Physical Modeling, Faculty of Sciences, Ibn Zohr University, Agadir, Morocco
ORCID ID: 0009-0006-5361-7022
Fatima Ezzahrae SOUAIDI
Laboratory of Materials, Signals, Systems and Physical Modeling, Faculty of Sciences, Ibn Zohr University, Agadir, Morocco
ORCID ID: 0009-0007-9042-9925
Imade CHOULLI
Laboratory of Materials, Signals, Systems and Physical Modeling, Faculty of Sciences, Ibn Zohr University, Agadir, Morocco
ORCID ID: 0000-0002-8396-0204
Abdelfattah ELHAMMOUDY
Laboratory of Materials, Signals, Systems and Physical Modeling, Faculty of Sciences, Ibn Zohr University, Agadir, Morocco
ORCID ID: 0000-0001-6818-9143
Ismail ABAZINE
Laboratory of Materials, Signals, Systems and Physical Modeling, Faculty of Sciences, Ibn Zohr University, Agadir, Morocco
ORCID ID: 0000-0002-7475-1355
Brahim El FAHMI
Laboratory of Materials, Signals, Systems and Physical Modeling, Faculty of Sciences, Ibn Zohr University, Agadir, Morocco
ORCID ID: 0009-0008-2856-5675

ABSTRACT

To accurately simulate the electrical behavior of photovoltaic (PV) devices, the current-voltage (I-V) equation of the Single-Diode Model (SDM) must be solved correctly. This equation is inherently nonlinear because of the exponential diode term and the effects of the series and shunt resistances. Therefore, the accuracy and stability of the numerical solution are essential for reproducing the I-V characteristic and, consequently, the power-voltage (P-V) behavior of the PV device. The reliability of the extracted electrical parameters is thus strongly influenced by the numerical method used to solve the nonlinear equation.

In this work, the impact of different nonlinear numerical solvers on a newly proposed iterative semi-analytical method for extracting the five SDM parameters is investigated. The main objective is to evaluate how the choice of solver affects parameter-identification accuracy and the ability of the model to reproduce experimental measurements. The results show clear differences in performance among the investigated techniques. The Steffensen method produces the highest RMSE, equal to 7.8678E-04 A, indicating the lowest accuracy among the tested methods. In contrast, the Halley method achieves the most significant improvement, reducing the RMSE by approximately 3.38 %, followed by the Ostrowski method with an improvement of 3.15 %. The bisection method also provides a notable improvement of 2.10 %, while Regula Falsi and Newton-Raphson yield more moderate improvements of 0.90 % and 0.85 %, respectively. These findings confirm that the nonlinear solver significantly influences the accuracy of PV parameter extraction and the overall fidelity of the SDM.

Keywords: Photovoltaic devices, Single-Diode Model, Model accuracy, Numerical solver

SYNCHRONIZING HUMAN FACTORS IN DIGITAL TRANSFORMATION AT UNIVERSITIES IN VIETNAM: PERSPECTIVES FROM LECTURERS AND STUDENTS

MA. Tran Thi Thanh Hang
Thu Dau Mot University, Vietnam

Abstract: Digital transformation in higher education has become an objective and inevitable trend in the new era. It does not purely stop at investing in and upgrading technological infrastructure or digitizing source learning materials to serve research and learning activities, but mainly depends on the readiness level and adaptive capacity of the subjects participating in the digital transformation system, in which lecturers and students are the key and core human resources. This article focuses on analyzing the digital competency framework of lecturers and the shift in students' learning mindset in the digital environment, thereby proposing synchronized solutions for human factors in digital transformation at universities in Vietnam in the coming time.

Keywords: Digital transformation, University, lecturers, students

1. Introduction

The digital revolution has been directly impacting and influencing all areas of social life, including education, particularly higher education. In recent times, under the close attention and direction of the Party and State, higher education has consistently been identified as a decisive factor in the country's sustainable development. At the same time, it is emphasized as a high-quality human resource serving the cause of national industrialization and modernization during the integration process. Resolution No. 29-NQ/TW dated November 4, 2013, on fundamental and comprehensive reform of education and training, set forth guiding views requiring a "strong shift of the educational process from mainly equipping knowledge to comprehensively developing learners' qualities and capacities," affirming that the application of information technology is a breakthrough solution in modern educational orientation. To concrete this direction, the Politburo issued Resolution No. 52-NQ/TW dated September 27, 2019, on a number of guidelines and policies to actively participate in the Fourth Industrial Revolution, creating a legal corridor for Prime Minister's Decision No. 749/QĐ-TTg dated June 3, 2020, approving the "National Digital Transformation Program to 2025, with orientations to 2030," in which education is one of the top priority sectors for digital transformation. In particular, Resolution No. 57-NQ/TW of the Politburo dated December 22, 2024, on breakthroughs in science, technology, innovation, and national digital transformation, set the target of taking digital transformation, high technology, and innovation as three (03) breakthrough spearheads to make the country a strong and prosperous developed nation in the new era. Most recently, Resolution No. 71-NQ/TW of the Politburo dated August 22, 2025, on breakthroughs in education and training development, continues the spirit of "education as the top national policy," while setting more specific targets regarding institutions, models, investment, and integration capacity.

For the higher education level, the goals of modernizing governance and building digital university models have been institutionalized through strategic documents such as Prime Minister's Decision No. 1705/QĐ-TTg dated December 31, 2024, on the Strategy for Vietnam's Educational Development to 2030, Vision to 2045, and Decision No. 452/QĐ-TTg dated February 27, 2025, approving the Network Planning of Higher Education and Pedagogical Institutions for the 2021–2030 Period, Vision to 2050. This is considered a strategic step by the

Government toward modernizing the higher education system, meeting the demand for developing high-quality human resources to serve the country in the new era. To achieve the set objectives, key legal frameworks primarily emphasize requirements for restructuring management systems and applying technology to serve university-level training.

Digital transformation in higher education is a systematic, strategic process that views the integration of digital technology as key to governance, training, and scientific research activities. Theoretically, the core objective of this process is to optimize training quality, improve operational performance, and expand equitable access to education (UNESCO, 2021). However, it is also necessary to shape and properly understand the essence of digital transformation in higher education—not merely as the digitization of data or the deployment of learning platforms in digital environments, but as a comprehensive and profound change that directly impacts governance models, pedagogical innovation, reform of student assessment procedures, and embraces teaching and learning culture (Do, Le, & Nguyen, 2023).

The practical implementation of these directive documents at higher education institutions reveals that the operational efficiency of the digital university model is not yet compatible with the pace of technology infrastructure investment. The transformation of operational methods in the new context is currently limited to a certain extent by the capacity of actors participating in the educational system. The clearest manifestation is the imbalance between lecturers' digital teaching capacity and students' practical learning mindsets in digital space. On the lecturers' side, the pressure of digital transformation forces them to change, shifting from traditional lecture methods and pure knowledge transmission to designing and facilitating learning experiences in digital environments. However, the digital transformation gap presents numerous issues, requiring lecturers to establish roadmaps and time to accumulate professional competence. Meanwhile, accessing digital technology has become an advantage for students, yet their self-directed learning mindset and self-study time management capacity on digital platforms remain limited. This leads to several consequences: (i) When lecturers make efforts to innovate teaching methods to align with digital transformation requirements, students react inversely, showing clear passivity by continuing to rely on reminders, lectures, and knowledge provision from lecturers; (ii) Amid the boom of artificial intelligence, most students choose and utilize technology as assistants for learning, research, and answering queries, yet lecturers' evaluation criteria/assessment frameworks sometimes operate under old mindsets—slow or yet to be updated according to metrics for measuring students' capacity to respond and apply knowledge.

It is precisely this "gap" between lecturers' digital teaching capacity and students' learning mindsets that reduces the efficiency of utilizing invested technological resources. Therefore, continuing to research issues related to digital transformation in higher education and proposing systematic solutions to establish balance in this area is both necessary and essential to meet the sustainable development of higher education in Vietnam in line with the spirit of the Party's Resolutions.

2. Research Results

2.1. Digital competency framework for lecturers in the digital environment

Currently, there are various understandings of digital competency, typically including: (i) Digital competency is the ability to access, manage, understand, integrate, communicate, evaluate, and create information safely and appropriately through digital technologies for employment, decent jobs, and entrepreneurship. It is a synthesis of computer literacy, ICT literacy, information literacy, and media literacy (UNESCO, 2018); (ii) Digital competency is the ability to effectively use digital technology, including searching for, evaluating, using, and creating information through digital tools and platforms, to meet learning, working, and

personal life needs (European Commission, 2021). These are two common perspectives representing the UNESCO Digital Competency Framework and the European Union Framework for the Digital Competence of Educators. These two perspectives are similar in that they both agree that digital competency does not stop at knowing how to use computers, but also encompasses the ability to search for, evaluate, use, and create information. However, UNESCO's approach provides a detailed analysis of the components constituting digital competency, whereas the European Union's approach is more practical.

In this section, the article approaches the topic based on the European Digital Competence Framework for Educators. Accordingly, the digital competency framework of lecturers in the digital era is no longer confined to traditional specialized knowledge and pedagogical skills, but is expanded into three main groups:

Digital Professional Competency Group: The digital professional competency of lecturers in the new era no longer stops at knowing how to use basic technological tools, but has become a complex combination of skills and mindsets to shape the modern higher education environment, demonstrated in the following aspects: First, the ability to communicate and collaborate in the digital environment: Manifested in the fact that lecturers do not merely interact traditionally, but must master digital communication channels to connect effectively with students, colleagues, and the global research community. This aspect includes selecting and flexibly coordinating digital platforms to manage classrooms and share learning materials, while guiding students on how to interact safely and respectfully in cyberspace. Accompanying this is the capacity for cross-border research collaboration, sharing open educational resources, and participating in building online academic communities to enhance lecture quality. Second, the spirit of autonomy in continuous professional development: Educational technology changes constantly, requiring lecturers to continuously update, self-access, and experiment with digital pedagogical methods. Actively participating in online training courses, conducting in-depth research on new technology trends, and self-evaluating one's own digital competency are the keys for lecturers to avoid falling behind, thereby maintaining initiative and practical value in every class session.

Digital Pedagogical Competency Group: This is no longer a supplementary skill but has become a set of core professional knowledge structures, practical skills, and professional attitudes aimed at effectively integrating technology into educational activities. This competency is clearly defined and operates synchronously across three systematic functional domains, including: First, designing and compiling digital learning materials: This is the stage of structuring teaching content, requiring educators to master technology tools to select, convert, construct, and optimize digital resource systems (interactive lectures, simulation videos, multimedia learning materials). This activity ensures compatibility between scientific content, pedagogical objectives, and learners' cognitive characteristics in the digital environment. Second, organizing digital teaching and learning: This is the process of realizing pedagogical intentions, where lecturers use the designed learning materials to coordinate and operate online or blended learning spaces. This phase focuses on activating initiative, promoting multi-dimensional interaction, establishing collaborative spaces, and developing flexible self-study capacities for learners through learning management systems. Third, digital assessment: This is the component that closes the pedagogical cycle, applying technological tools and algorithms to continuously monitor and measure learning progress. This activity not only optimizes the collection of evidence data but also provides a timely, highly personalized feedback mechanism, helping learners recognize knowledge gaps for self-adjustment.

The analytical aspects mentioned above do not exist independently, but establish a closed, mutually supportive, and continuously optimized operating cycle. Among them, digital

learning material design plays the role of creating the foundation of content and activity organization methods for the teaching and learning phase. Conversely, the actual interaction process within the digital teaching and learning space generates a system of real behavioral data—an objective input source for digital assessment activities. Finally, the test results and analysis from the digital assessment phase serve as a reverse feedback mechanism, providing a scientific basis for lecturers to improve learning material structures and reshape teaching strategies in subsequent semesters.

Learner-Empowering Competency Group: Creating conditions for students to develop their personal digital competencies and guiding students to safely search, evaluate, and manage information in cyberspace. For this competency group, lecturers do not stop at merely imparting skills; the core lies in awakening intrinsic motivation, helping learners become deeply aware of their self-directed learning responsibility in the digital environment.

2.2. The shift in students' Learning mindset in the digital environment

The digital environment not only alters learning methods but also reshapes the entire learning mindset of learners. In a digital university environment, students shift from a position of "passive reception" to "active construction," with critical thinking elements being clearly demonstrated. This shift in mindset is clearly evident through:

(i) From learning for exams to lifelong learning: Students recognize that technological knowledge changes on a monthly or yearly cycle. Students learn not merely to obtain a degree, but to cultivate a mindset of continuously improving research skills and applying them into practice to meet the needs and development of society, as well as other objective demands within the dynamics and development of society. The survey results of a group of students at Thu Dau Mot University, Vietnam, show that when asked: "During the process of using artificial intelligence tools such as ChatGPT, Claude, Gemini... to assist with assignments, do you recheck the accuracy of the information source before using the result?", 35 out of 61 respondents (57.4%) stated that they read the content and cross-checked AI's results with documents or lectures provided by the lecturer. The remaining choices were: reading the content and citations provided by AI, then reverse-searching for the source documents (14/61 respondents, accounting for 23%); reading the content and editing it to fit the proper writing style without checking the correctness/falsity of the knowledge (8/61 respondents, accounting for 13.1%); in some cases, actively debating with AI (3/61 respondents, accounting for 4.9%); and copying the AI's results directly into their work (1/61 respondents, accounting for 1.6%) (survey results in Table 2.1).

Table 2.1. Students' Attitudes When Using Artificial Intelligence Tools

	Option	Percentage
Question 3. When using artificial intelligence tools such as ChatGPT, Claude, Gemini... to assist with coursework, do you check the accuracy of the information source before using those results?	I directly copy AI results into my work.	**1,6%**
	I read the content and adjust it to fit the right tone/style without checking for accuracy...	13.1%
	I read the content and cross-check AI results with documents or lectures from the instructor...	57.4%
	I read the content and the citations provided by AI, then perform a reverse search for the source material.	23.0%
	In some cases, I actively debate/argue with AI.	4.9%

The above survey data demonstrates a fairly clear differentiation in learners' knowledge acquisition behaviors when facing artificial intelligence tools. It is easy to notice that the most positive signal lies in the figure of 57.4% of learners choosing to cross-check AI answers with

standard lectures or documents provided by lecturers. The dominance of this group, combined with the 23% of learners who actively reverse-search for source documents from AI citations, creates a combined group representing over 80% of surveyed subjects who are conscious of verifying information. From a learning capacity research perspective, this can be considered an important transition zone: learners have escaped the passive receiving mindset that was common in short-term coping learning models to enter the stage of developing knowledge evaluation skills.

(ii) Autonomous and self-directed mindset: No longer completely dependent on class schedules or lecturer reminders, students self-manage their time and choose learning pathways suitable for their personal pace on Learning Management Systems. When asked about their proactiveness in constructing learning pathways, managing time, and completing course content on the E-learning system without frequent reminders from the course lecturer, 44 out of 61 respondents (accounting for 72.1%) answered completely proactive; 14 out of 61 respondents (accounting for 24.6%) answered that they only do so when requested by the lecturer; while the remaining 2 out of 61 respondents (accounting for 3.3%) answered that they do not perform even if requested by the course lecturer (Table 2.2).

Table 2.2. Students' Level of Proactiveness Regarding Courses Allocated on the E-learning System

	Option	Percentage
Question 1. Do you proactively build learning pathways, manage time, and complete course content on the Elearning system without frequent reminders from the instructor in charge?	I am completely proactive	72.1%
	I only do so when required by the instructor	24.6%
	I read the content and cI do not do so, even when requested by the instructor	3.3%

Critical thinking toward artificial intelligence (AI): Students do not view AI as a copying tool, but rather consider it a learning assistant. They shift from an answer-seeking mindset to a mindset of asking the right questions and evaluating information sources. Among the choices when encountering difficulties during online learning, when asked if they independently search for answers through library resource repositories, open materials on academic forums, or supporting technologies like Google, DuckDuckGo, Brave Search, the results were as follows: self-resolving by using search engines and libraries (32/61 respondents, accounting for 52.5%); similarly, regarding the purpose of using AI, the choice of searching for reference materials for content/assignments received 29 out of 61 responses (accounting for 47.5%) (Table 2.3).

Table 2.3. Choices When Encountering Difficulties During Online Learning

	Option	Percentage
Question 2. When facing difficulties during online learning, you look for answers yourself using library repositories, open resources on forums, or search engines such as Google, DuckDuckGo, Brave Search.	I will contact the course instructor for assistance	45,9%
	I solve it myself by searching for information on search engines, libraries, etc	52,4%
	I solve it myself by searching for information on search engines and libraries.	1,6%

Similarly to the question about the purpose of using AI, the option for searching for reference materials for content/assignments received 29 out of 61 votes, accounting for 47.5%; searching for ideas for points and arguments received 25 out of 61 votes, accounting for 41%; while needing answers or copying answers to complete tasks assigned by lecturers accounted for the remaining 11.5%. When lecturers organize classes under blended models such as E-

learning or Microsoft Teams, students prepare necessary content at home prior to the session based on materials provided by the lecturer (reaching 46 out of 61 responses, accounting for 75.4%) (Table 2.4).

Table 2.4. Students' Preparation Awareness Before Online Sessions

	Option	Percentage
Question 6. When lecturers organize blended learning classes using platforms such as E-learning or Microsoft Teams, do you prepare the assigned contents at home in advance based on the lectures/materials provided?	I prepare the necessary contents for the class at home in advance based on the materials provided by the lecturer	75,4%
	I do not prepare at home in advance because I do not have time and I need to listen to the lecturer's presentation.	24.6%

During online sessions, regarding whether students actively interact with lecturers (turning on cameras, raising hands to speak, participating in online group activities as assigned, specifically interacting regularly in the chat box, using the hand-raise icon to speak, discuss, and ask questions), this reached 26 out of 61 responses (accounting for 42.6%) (Table 2.5).

Table 2.5. Students' Level of Interaction During Online Learning

	Option	Percentage
Question 7. During online classes, do you actively interact with the lecturer (turning on the camera, participating in speaking, or joining online group activities according to assigned tasks)?	I only log in to the system to take attendance, turn off the camera, and do not interact with the lecturer during the class	8,2%
	I listen to the lecture, but rarely speak up, taking notes on what the lecturer presents and projects on the slides.	32,8%
	I frequently interact in the chat box, use the raise-hand icon to speak up, participate in discussions, and ask questions.	42,6%
	I only interact and turn on the camera when the lecturer calls my name or when group work is mandatory for process grading.	16,4%

Overall, the collected information outlined above paints a fairly clear picture of the shift in students' autonomous capacity and knowledge acquisition methods in digital learning environments, while opening up deeper insights into learners' readiness before the demands of modern education. However, a careful analysis of the actual picture reveals that the transformation from autonomous awareness into in-depth interactive behavior still exhibits certain gaps. The proportion of students who maintain regular interaction with lecturers during online classes through turning on cameras, speaking, or participating in group discussions remains at only 42.6%. Furthermore, the fact that 24.6% of students perform tasks only when required and 3.3% remain completely passive despite reminders indicates a relatively clear differentiation in self-study capacity. These results point out that although the majority of students have adapted well to managing progress and searching for information independently, encouraging them to overcome psychological barriers to actively exchange, critique, and interact directly in cyberspace remains a challenge that requires continued guidance.

2.3. Solutions for synchronizing human factors in digital transformation at Universities in Vietnam

For Universities: Standardize the digital competency framework for staff tied to remuneration policies. Build a learner-centered digital ecosystem. In the reality of digital

transformation at universities today, standardizing the digital competency framework for both lecturers and administrative managers is perhaps the prerequisite step if technological infrastructure is to truly exert its effect. This competency framework should not merely stop on paper as a strict evaluation standard, but must be tied to clear remuneration policies, rewards, and promotion opportunities to generate internal motivation for change within each individual. Along with this, universities need to shift strongly from traditional management models to building a learner-centered digital ecosystem. There, everything from data and E-learning platforms to student support services must be designed around the learning experience, helping learners easily access knowledge, self-personalize their pathways, and develop skills anytime, anywhere. The synchronous combination between a digitally competent staff with dedicated motivation and a flexible digital learning environment serves as the core foundation to help universities break through, avoiding the trap of formalistic digital transformation that is quite common today.

For lecturers: Actively update digital pedagogical methods and shift roles from knowledge transmission to coordination and orientation. Regarding the role of lecturers in the digital transformation picture, changes in mindset and teaching methods are the decisive links determining the success or failure of the entire process. Lecturers actively updating digital pedagogical methods is not simply knowing how to use software or present slides more flexibly, but represents a mindset shift in how lessons are designed in cyberspace. At this point, lecturers need to shift strongly from the role of a mere knowledge transmitter to that of a coordinator and mindset director, enhancing student autonomy in the learning process. In other words, lecturers act as guides, designing learning scenarios, posing open questions, and leading students to know how to question, analyze, and evaluate information. This process requires lecturers to accept leaving their traditional comfort zones, continuously self-cultivate technology skills, and accept learning alongside students. Only when educators truly master digital methods and actively lead can the learning space escape dryness, helping students fully develop critical thinking in modern university environments.

For students: Change learning material access methods. Enhance self-study skills and accountability for personal training results. Alongside the roles of universities and lecturers, students are the core factor determining the effectiveness of digital transformation, requiring a fundamental shift in learning material access methods. Instead of passively waiting for lectures or relying entirely on available resource sources, students need to actively exploit open knowledge repositories, knowing how to categorize, cross-check, and evaluate the reliability of information in cyberspace. This places an urgent demand on enhancing self-study skills, ranging from self-managing time and setting personal plans on E-learning systems to proactively seeking solutions when facing knowledge barriers. Most importantly is the shift in mindset: students must take responsibility for their own training results, stopping the view of learning as an obligation to cope with exams, and shifting toward a process of true self-accumulation of competencies. When learners truly master their personal pathways and take responsibility for the knowledge they receive, technology will escape its role as a mere tool to become a launchpad for lifelong learning capacity.

CONCLUSION: The synchronization of human factors in the digital transformation of higher education is essentially a matter of mindset shift, rather than lying in technology or infrastructure. The success or failure of this process depends entirely on the readiness to transform of all three entities: universities must proactively construct ecosystems and incentive policies; lecturers need to step out of their comfort zones to become mindset guides; and students are required to bear responsibility for their own learning pathways. Only when these three links move in the same direction can digital transformation escape its formalistic shell to

truly become the driving force for elevating training quality and cultivating lifelong learning capacity for learners.

REFERENCES

1. Nguyen, H. T., et al. (2022). Digital competency framework for university lecturers in the context of educational digital transformation in Vietnam. Journal of Vietnamese Educational Sciences.
2. Tran, T., et al. (2023). Digital competency of university lecturers: Current status and enhancement solutions in the new era. Journal of Education.
3. Le, T. M. H. (2021). The impact of digital transformation on Vietnamese students' self-study activities and proactive thinking. Journal of Educational Research.
4. Vu, T. T. H. (2024). University students' perception and mindset in using AI (ChatGPT) as a learning assistant: A case study in economics majors. Journal of Science & Technology Development.
5. Ministry of Information and Communications of Vietnam. (2022). Digital Transformation Handbook (Education and Digital University Section). Information and Communications Publishing House.
6. Nguyen, T. D., & Nguyen, V. G. (2023). Functional structural model of digital universities and application orientations at Vietnamese technical universities. Journal of Educational Management.
7. UNESCO. (2021). Reimagining our futures together: A new social contract for education.
8. UNESCO. (2018). ICT competence framework for teachers (ICT-CFT) (Version 3). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
9. Do, T. T. T., Le, T. T., & Nguyen, T. T. L. (2023). ICT transformation in Vietnam’s higher education sector: From policy to reality. Critical Reflections on ICT and Education: Selected Papers from the HKAECT 2023 International Conference.
10. European Commission. (2021). Digital Competence Framework for Educators (DigCompEdu). Publications Office of the European Union.

ISARC

INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR MEDICATION ADHERENCE ASSESSMENT IN PATIENTS WITH TYPE 2 DIABETES: AN EXPLORATORY STUDY IN MOROCCO USING CHATGPT AND THE VALIDATED GENERAL MEDICATION ADHERENCE SCALE

Maryem Arraji
Laboratory of Health Sciences and Technologies, Higher Institute of Health Sciences, Hassan First University of Settat, Settat, Morocco
Mohamed Khalis
Laboratory of Health Sciences and Technologies, Higher Institute of Health Sciences, Hassan First University of Settat, Settat, Morocco
Mohammed VI Center of Research and Innovation, Rabat, Morocco
International School of Public Health, Mohammed VI University of Health Sciences, Casablanca, Morocco
Higher Institute of Nursing Professions and Technical Health, Rabat, Morocco
Laboratory of Biostatistics, Clinical, and Epidemiological Research, Department of Public Health, Faculty of Medicine and Pharmacy, Mohamed V University in Rabat, Rabat, Morocco
Mohamed Chahboune
Laboratory of Health Sciences and Technologies, Higher Institute of Health Sciences, Hassan First University of Settat, Settat, Morocco

ABSTRACT

Objectives: Medication adherence remains a major challenge in the management of type 2 diabetes (T2D), especially in middle-income countries such as Morocco. With the rapid development of artificial intelligence, large language models, including ChatGPT, may offer new opportunities for clinical research through simulated patient profiles. This study examined the feasibility of using ChatGPT to generate culturally contextualized virtual profiles of Moroccan patients with T2D and to apply the validated Moroccan Arabic dialect version of the general medication adherence scale (GMAS).

Methods: This exploratory pilot simulation study used ChatGPT-4 to generate 11 virtual profiles based on representative sociodemographic and clinical characteristics of Moroccan patients with T2D. Each profile was administered the validated Moroccan Arabic dialect version of the GMAS.

Results: Four profiles (36.4%) showed high adherence, 6 (54.5%) displayed moderate adherence, and 1 (9.1%) exhibited low adherence. Expert evaluations were consistent, with all ratings ≥3 on a 4-point scale, supporting the credibility and cultural appropriateness of the profiles. The simulated patterns reflected real-world trends, with higher adherence among profiles treated with oral antidiabetic drugs, covered by health insurance, and having shorter disease duration, and lower adherence among profiles using insulin, lacking insurance, and having longer disease duration.

Conclusion: ChatGPT generated credible, culturally adapted patient profiles that enabled application of a validated psychometric tool in a simulated environment. This rapid, low-cost approach may support exploratory research, healthcare training, and intervention design. Comparative studies using real patient data are needed to confirm validity.

Keywords: Artificial intelligence; Diabetes mellitus, type 2; Feasibility studies; Medication adherence; Morocco; Psychometrics

THE ROLE OF OFFICIAL AND PRIVATE GOVERNMENTAL INSTITUTIONS IN THE ARAB AND ISLAMIC WORLDS IN SUPPORTING AZERBAIJAN'S EFFORTS TO PROTECT THE HERITAGE OF THE WESTERN AZERBAIJAN COMMUNITY

Mohammed Waheeb
Professor in Archaeology; Department of Sustainable Tourism, Queen Rania Faculty of Archaeology Heritage, & Tourism
(QRFTH), The Hashemite University.

Abstract
The cultural and historical heritage of the "Western Azerbaijan" community constitutes an authentic component of the civilizational memory of Islam and the Caucasus, as well as a vivid testament to human diversity in the region. In light of the decades of destruction and neglect this legacy has suffered, Arab and Islamic solidarity with Azerbaijan transcends mere routine political empathy; it rises to a civilizational duty and a strategic imperative executed through the frameworks of official and private institutions.

Areas of Arab and Islamic Support for Heritage Protection in Western Azerbaijan
Legal and Diplomatic Support (Moral and Political Backing):
Adopting the Issue in International Fora: Active engagement by the Islamic World Educational, Scientific and Cultural Organization (ICESCO) and the Organization of Islamic Cooperation (OIC) through issuing resolutions and recommendations recognizing the violations against Islamic monuments in Western Azerbaijan. **Advocacy within UN Bodies:** Mobilizing Arab and Islamic voting blocs within UNESCO to list endangered Azerbaijani monuments on protection rosters and pressing for the dispatch of international fact-finding missions.
Technical and Scientific Support (Consultancy and Documentation):
Academic and Field Expertise: Engaging specialized Arab and Islamic heritage conservation authorities (such as heritage boards in the Gulf and the Levant) to support digital documentation projects (GIS) and 3D aerial surveys of historical sites and cemeteries.
Capacity Building and Training: Organizing joint workshops to train young researchers and personnel involved in heritage documentation on the latest archival and architectural restoration techniques.
Financial and Logistical Support (Funding and Sponsorship):
Endowment and Islamic Financing Funds: Financial contributions from the Islamic Development Bank (IsDB), charitable trusts, and private sector entities to fund international exhibitions, conferences (such as the Amman Conference), and the publication of the Digital Heritage Atlas.**Supporting Publishing and Translation Projects:** Funding the translation of scholarly research related to Western Azerbaijan's heritage into Arabic, English, and French to disseminate the authentic historical narrative globally.

Media and Academic Support (Investing in Awareness):
Joint Knowledge Production: Encouraging Arab universities and research centers to dedicate academic space and peer-reviewed journals for publishing studies on the history and heritage of Western Azerbaijan. **Media and Cultural Coverage:** Highlighting the civilizational significance of Azerbaijani mosques, monasteries, and cemeteries across Arab media outlets and digital platforms to expose the risks of cultural erasure.
The synergy between official and private institutions in the Arab and Islamic worlds significantly reinforces Azerbaijan's position; it elevates the cause from a narrow regional

dispute to a broader Islamic and humanistic context, granting field and technical documentation projects an international shield that safeguards collective memory and fosters a fair environment for reconciliation and peace.

Keywords: Arab World, Islamic World, Azerbaijan, Heritage, Maintenance and Restoration, Development.