2 nd International SAMSUN Scientific Research and Innovation Congress

23-24 September 2026 - SAMSUN

Editor: Prof. Dr. Gönül SAMEDOVA

www.isarcacademy.com

PROCEEDINGS BOOK

ISARC INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER

ISBN: 978-625-378-736-3

2nd INTERNATIONAL SAMSUN SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION CONGRESS PROCEEDINGS BOOK

2026© IKSAD PUBLISHING HOUSE

EDITOR

Prof. Dr. Gönül SAMEDOVA

Publication Date: 05 October 2026

All Rights Reserved.
All rights of this book belong IKSAD Publishing House
Authors are responsible both ethically and juridically
No part of this publication may be reproduced, distributed, transmitted, stored in a retrieval system, or translated into any language, in any form or by any means—electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise—without the prior written permission of both the copyright holder and the publisher.
Any unauthorized use, reproduction, or distribution of the material contained in this book is strictly prohibited and may result in civil and/ or criminal liability under applicable copyright laws.

Contact
www.isarcacademy.com/2026
info@isarcacademy.com

CONGRESS ID I
SCIENTIFIC & REVIEW COMMITTEE II
ACADEMIC INCENTIVE III
PHOTO GALLERY IV
PROGRAM V
CONTENT VI
ABSTRACTS & FULL TEXTS VII

CONGRESS ID

CONGRESS TITLE
2 nd INTERNATIONAL SAMSUN SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION CONGRESS

DATE and PLACE
September 23-24, 2026 / Samsun, Türkiye

ORGANIZATION
ISARC Academy, Türkiye

CONGRESS HONORARY PRESIDENT
Prof. Dr. Gönül SAMEDOVA

PARTICIPATION
Keynote & Invited

PARTICIPANTS COUNTRY
Türkiye, Azerbaijan, Brazil, Georgia, India, Jordan, Moldova, Morocco, Nigeria, Pakistan, Saudi Arabia, Serbia

CONGRESS COORDINATOR

Umida MAVLYANOVA
ISARC Academy, Türkiye

NUMBER of ACCEPTED PAPERS-53 (Türkiye- 26, Other Countries- 27)

NUMBER of REJECTED PAPERS- 7

ORGANIZING COMMITTEE:

Name	Country
Prof. Dr. Cenk YAVUZ	TR
Prof. Dr. Mahire HÜSEYNOVA	TR
Prof. Dr. İbrahim BAYRAMOV	TR
Prof. Dr. Hilmi YÜCEL	TR
Prof. Dr. Mehmet DEMİR	TR
Assoc. Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE	TR
Assoc. Prof. Dr. Başak Gül AKA	TR
Assoc. Prof. Dr. Caner YERLİ	TR
Assoc. Prof. Dr. Çiğdem BOGENÇ	TR
Assoc. Prof. Dr. Elif Feyza TOPDAŞ	TR
Assoc. Prof. Dr. Erhan ERDEL	TR
Assoc. Prof. Dr. Filiz RANDA ZELYÜT	TR
Assoc. Prof. Dr. Gamze Ebru ÇİFTÇİ	TR
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Murat IŞIK	TR
Assoc. Prof. Dr. Orhan TURAN	TR
Dr. Abdullah ATILGAN	TR
Dr. Canan TERCAN	TR
Dr. Elvan CAFEROV	AZ
Dr. Fatma AZİZOĞLU	TR
Dr. Gönül GÖKÇAY	TR

SCIENTIFIC AND ADVISORY BOARD:

Name	Institution	Country
Prof. Dr. Adil AKINCI	Bilecik Şeyh Edebali University	TR
Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE	Atatürk University	TR
Prof. Dr. Aparna SRIVASTA	Noida International University	IN
Prof. Dr. Ahmet Niyazi ÖZKER	Bandırma Onyedi Eylül University	TR
Prof. Dr. Ali AKİL	Saiyed Parul University	IN
Prof. Dr. Ali OKATAN	İstanbul Aydın University	TR
Prof. Dr. Anvar ABBASOV	Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti	AZ
Prof. Dr. Anwar Ali Shah G. SYED	University Of Sindh Jamshoro	PK
Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ	Inonu University	TR
Prof. Dr. Arif BABANLI	Süleyman Demirel University	AZ
Prof. Dr. Cengiz SARIKÜRKCÜ	Afyonkarahisar University	TR
Prof. Dr. Cenk YAVUZ	Sakarya University	TR
Prof. Dr. Ekrem Yaşar AKÇAY	Süleyman Demirel University	TR
Prof. Dr. Emrullah FATİŞ	Kırşehir Ahi Evran University	TR
Prof. Dr. Faiz Muhammad SHAİKH	Sindh Agriculture University Tando Jam	PK
Prof. Dr. Gülçin YAHYA KAÇAR	Ankara Hacı Bayram Veli University	TR
Prof. Dr. Hasan Hüseyin DOĞAN	Selçuk University	TR
Prof. Dr. Hazim Abd Mohammed ALJEWAREE	Alkıtab University	IQ
Prof. Dr. Halil BOLU	Dicle University	TR
Prof. Dr. Haluk ÖZPARLAK	Selçuk University	TR
Prof. Dr. Hülya ÇİÇEK	Gaziantep University	TR
Prof. Dr. Gülsen ASMAN	Gazi University	TR
Prof. Dr. Ivan PAVLOVİC	Scientific Institute of Veterinary Medicine of Serbia	RS
Prof. Dr. İbrahim BAYRAMOV	Azerbaycan Devlet Pedagoji University	AZ
Prof. Dr. İshak KESKİN	İstanbul University	TR
Prof. Dr. Manole COJOCARU	Carol Davila University	RO
Assoc. Prof. Dr. Eda ÖZ ÇELİKBAŞ	Karabük University	TR
Assoc. Prof. Dr. Erhan ERDEL	Iğdır University	TR
Assoc. Prof. Dr. Fariz AHMADOV	Azerbaycan Devlet İktisat University	AZ
Assoc. Prof. Dr. Fouzia BENOUDJIT	M'hamed Bougara University, Boumerdes	DZ
Assoc. Prof. Dr. Faruk KALAY	Yüzüncü Yıl University	TR
Assoc. Prof. Dr. Gönül SAMEDOVA	Azerbaycan Devlet Pedagoji University	AZ
Assoc. Prof. Dr. Kalsoom TARIQ	Khyber Girls Medical College	PK
Assoc. Prof. Dr. Naseem AKHTER	Shaheed Benazir Bhutto Women University	PK
Assoc. Prof. Dr. Nursen IŞIK	Dicle University	TR
Assoc. Prof. Dr. Orhan TURAN	Batman University	TR
Assoc. Prof. Dr. Özlem GÜNDOĞDU AYTAÇ	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi	TR
Assoc. Prof. Dr. Özlem KAYA	Uşak University	TR
Assoc. Prof. Dr. Reyhan DADAŞOVA	Azerbaijan Baku Business University	AZ
Assoc. Prof. Dr. Rozina KHATTAK	Shaheed Benazir Bhutto Women University	PK
Assoc. Prof. Dr. Seyfaddin JAFAROV	Nakhchivan State University	AZ
Assoc. Prof. Mulıkat Folashade USMAN	Usmanu Danfodiyo University	NG
Asst. Prof. Dr. Ferhat ATİK	Girne American University	CY
Dr. Ajay B. GADİCHA	Sant Gadge Baba Amravati University	IN
Dr. Andaç Kutay SAKA	Ordu University	TR
Dr. Aqil MEMMEDOV	Azerbaycan Devlet İktisat University	AZ
Dr. Aynure Eliyeva	Azerbaycan Devlet Pedaqoji Universiteti	AZ
Dr. Babak SAFAEI	Tsinghua University	CN
Dr. E. Vildan BURGAZ	Doğu Akdeniz Üniversitesi / KKTC	CY
Dr. Elşen MEMMEDLİ	Azerbaycan Devlet İktisat University	AZ

Dr. Faisal SULTAN	Hazara University	PK
Dr. Ghanshyam BARMAN	Uka Tarsadia University	IN
Dr. Gülnar MİRZEYEVA	Azerbaycan Devlet İktisat University	AZ
Dr. Gülşen MEHERREMOVA	Azerbaycan Diller University	AZ
Dr. Hassan ZARIOUH	Mohammed First University	MA
Dr. Iram Liaqat AWAN	Government College University	PK
Dr. Irina-Ana DROBOT	Technical University of Civil Engineering Bucharest	RO
Dr. Joanna HERNİK	West Pomeranian University of Technology	PL
Dr. Tasawar IQBAL	Riphah International University	PK
Dr. B. Mahadevan	Annamalai University	IN
Dr. Ramshin Rahiman	University Of Hyderabad	IN
Dr. S. Kalaiselvan	Rathinam Technical Campus, Coimbatore	IN
Dr. Tegegne Getachew Legass	Mekdela Amba University (MAU)	ET
Dr. Khadija Oumghar	Hassan II University	MA
Dr. Saimah Khan	Integral University	IN

2nd INTERNATIONAL SAMSUN SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION CONGRESS

September 23-24, 2026 / Samsun, Türkiye

Topic: Akademik Teşvik 05/10/2026

Ref: A.26

İlgili makama;

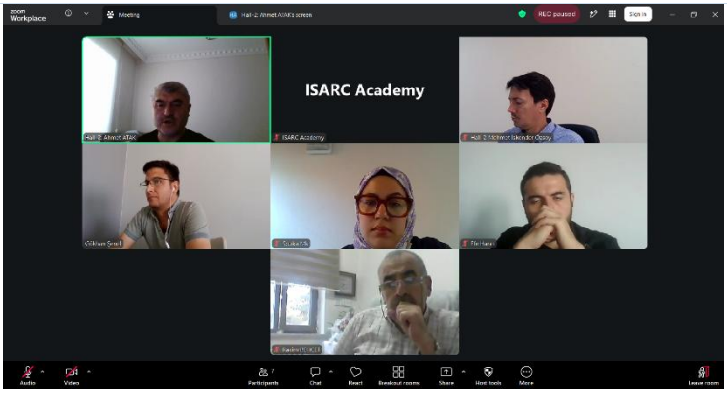
2.ULUSLARARASI SAMSUN BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR VE İNOVASYON KONGRESİ 23-24 Eylül 2026 tarihleri arasında Samsun'da 12 farklı ülkenin akademisyen/araştırmacılarının katılımıyla gerçekleşmiştir. Kongre kapsamında sunumu yapılan 53 bildirinin 26 adeti Türkiye'den katılımcılar tarafından; 27 bildiri ise 11 ülkeden katılımcılar tarafından sunulmuştur. Kongre 16 Ocak 2020 Akademik Teşvik Ödeneği Yönetmeliğine getirilen "Tebliğlerin sunulduğu yurt içinde veya yurt dışındaki etkinliğin uluslararası olarak nitelendirilebilmesi için Türkiye dışında en az beş farklı ülkeden sözlü tebliğ sunan konuşmacının katılım sağlaması ve tebliğlerin yarıdan fazlasının Türkiye dışından katılımcılar tarafından sunulması esastır." değişikliğine uygun düzenlenmiştir.

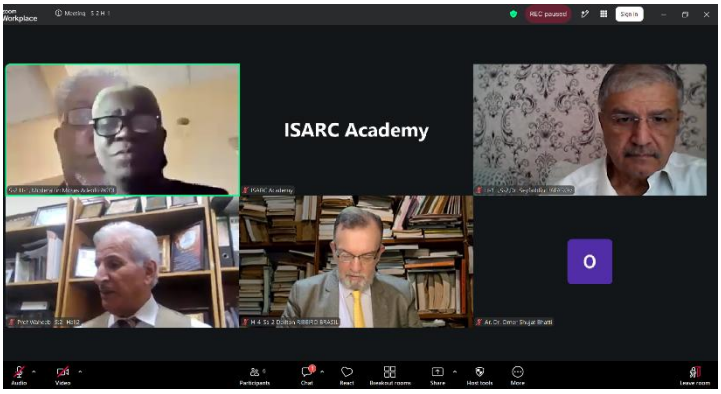
Bilgilerinize arz edilir,

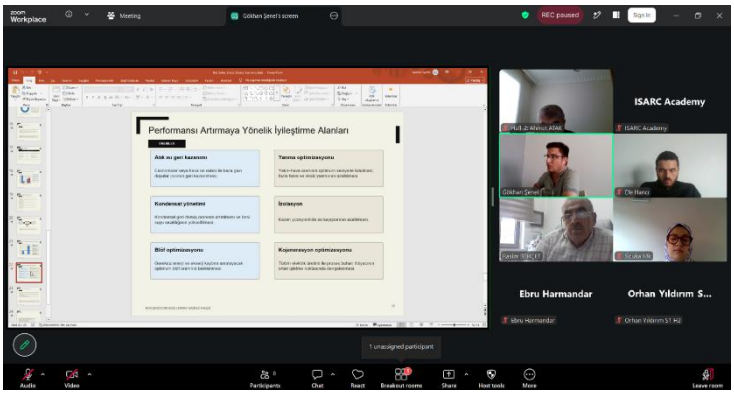
Saygılarımla,

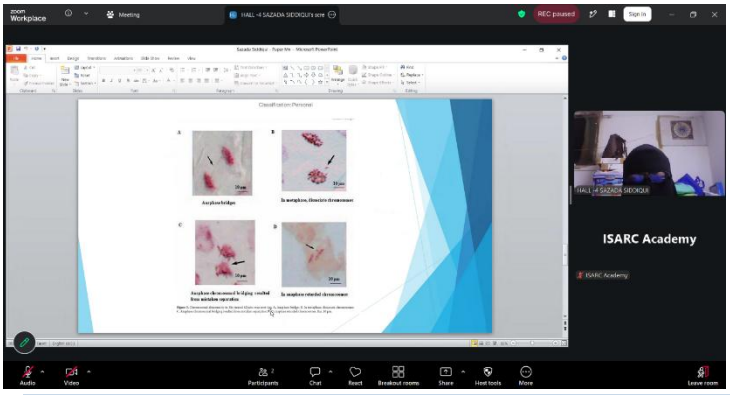
Sefa Salih BİLDİRİCİ
HEAD OF İSARC

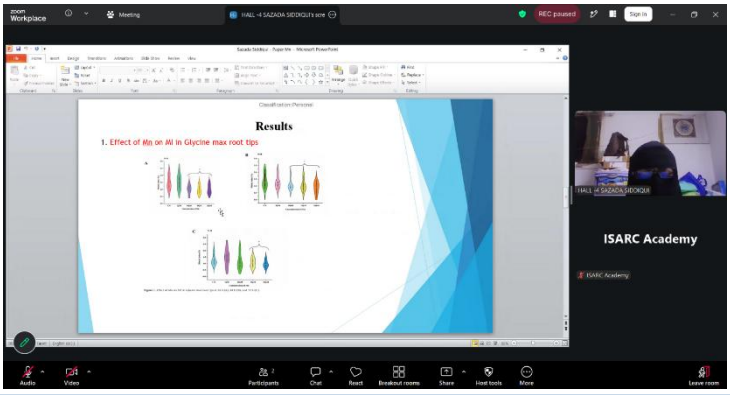
PHOTO GALLERY

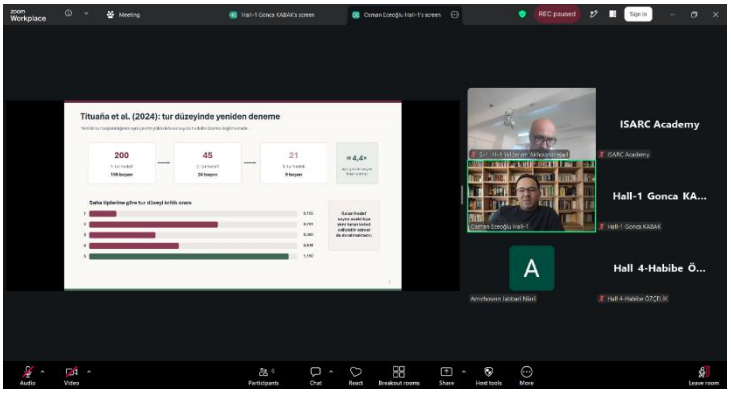


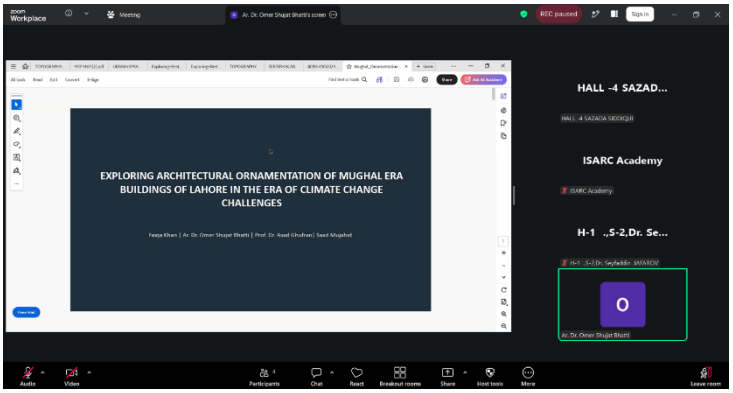


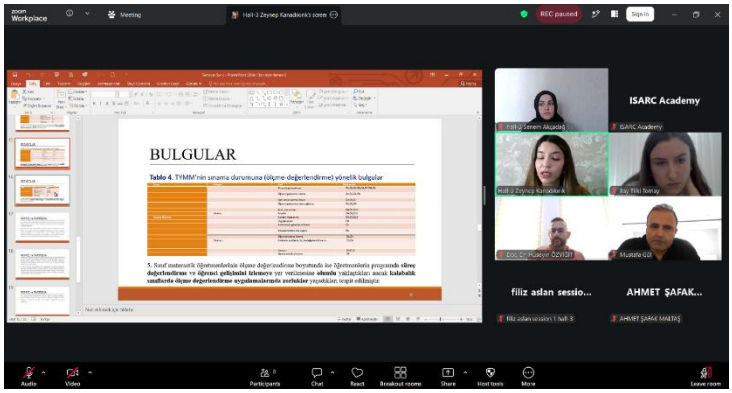


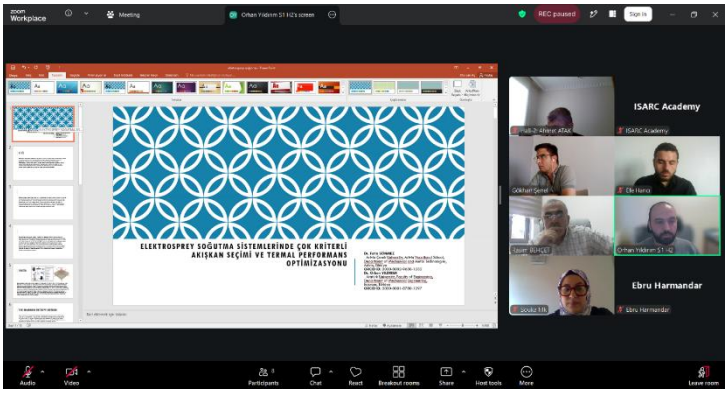


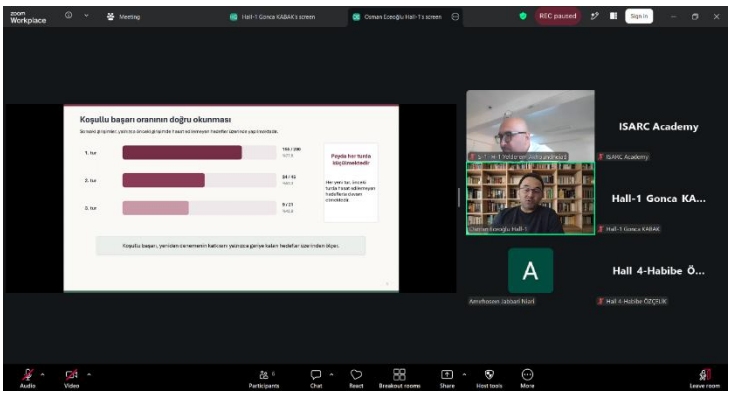



Tituaña et al. (2024): tur düzeyinde yeniden deneme
200
45
21
ISARC Academy
Hall-1 Gonca KA...
Hall 4-Habibe Ö...

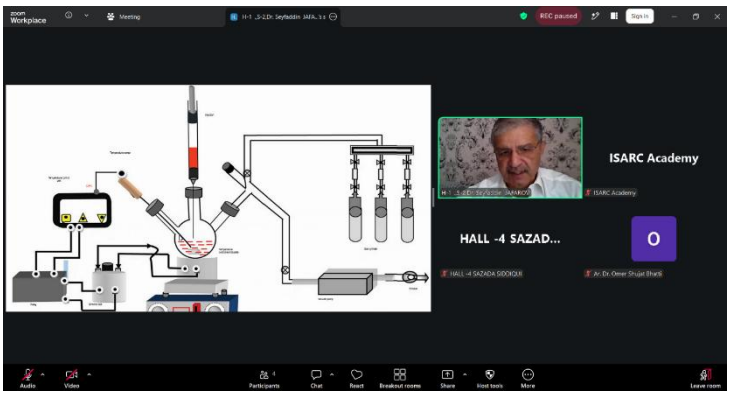

EXPLORING ARCHITECTURAL ORNAMENTATION OF MUGHAL ERA BUILDINGS OF LAHORE IN THE ERA OF CLIMATE CHANGE CHALLENGES
HALL -4 SAZAD...
ISARC Academy
H-1 ..S-2,Dr. Se...


BULGULAR
ISARC Academy
filiz aslan sessio...
AHMET ŞAFAK...

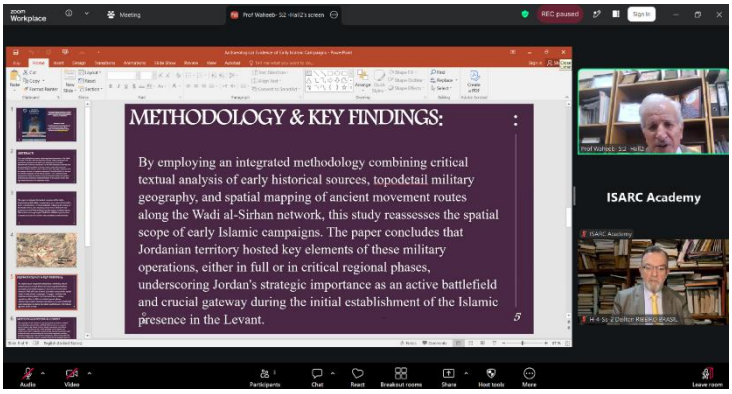

ELEKTROSPREY SOĞUTMA SİSTEMLERİNDE ÇOK KRİTERLİ AKIŞKAN SEÇİMİ VE TERMAL PERFORMANS OPTİMİZASYONU
ISARC Academy
Ebru Harmandar

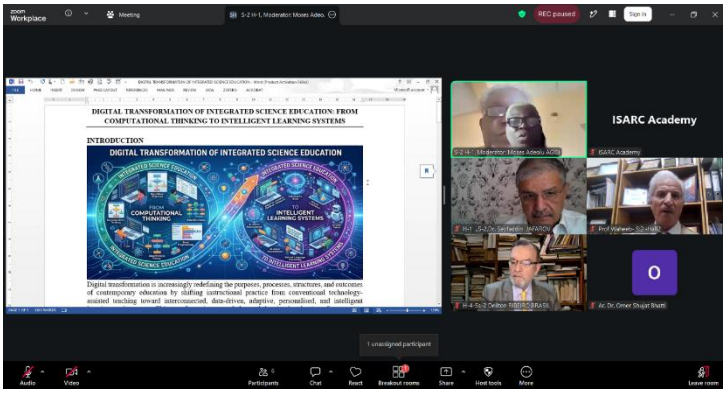

Koşullu başarı oranının doğru okunması
ISARC Academy
Hall-1 Gonca KA...
Hall 4-Habibe Ö...

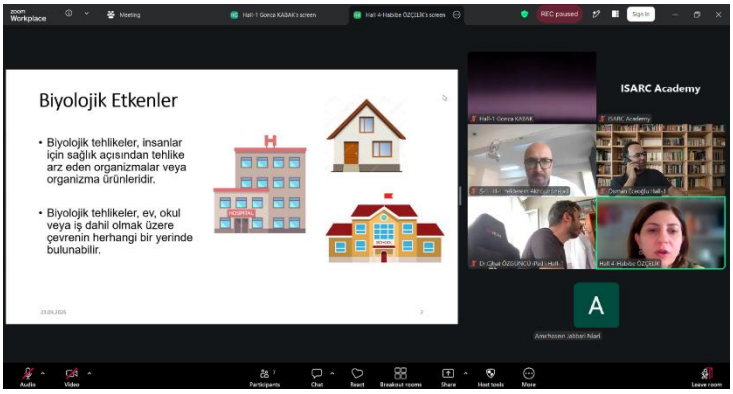
2nd INTERNATIONAL SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION CONGRESS
September 23-24, 2026, Samsun, Türkiye
TOPIC: Foreign Rural Land Acquisition in Brazil: Constitutional Sovereignty, Food Security, and Environmental Protection
PROF. DR. DEILTON RIBEIRO BRASIL
UNIVERSITY OF ITAÚNA, MINAS GERAIS, BRAZIL
ISARC Academy

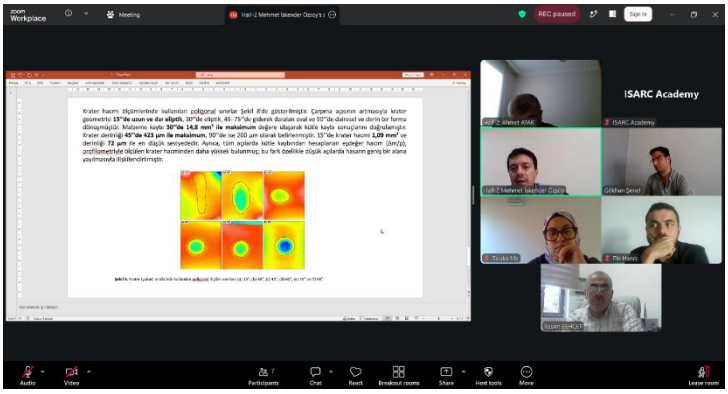

ISARC Academy
HALL -4 SAZAD...

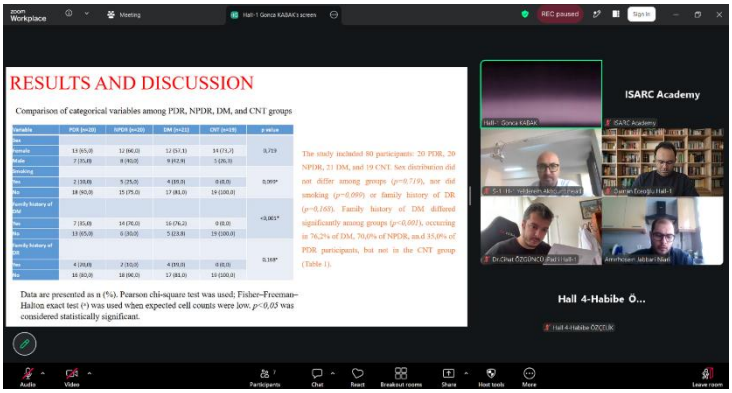
edilmişdir ki..
ISARC Academy
HALL -4 SAZAD...

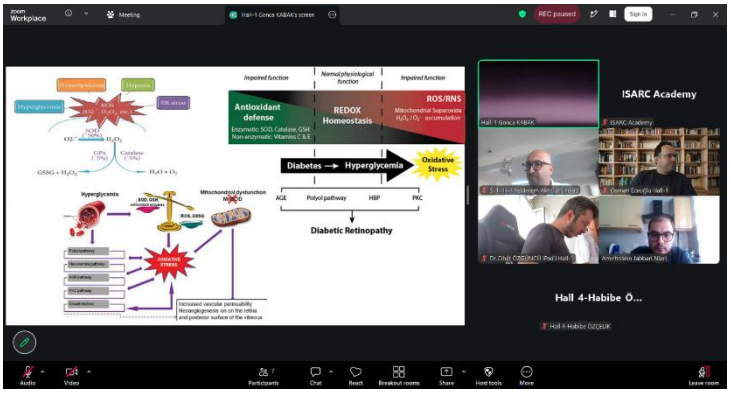

METHODOLOGY & KEY FINDINGS:
By employing an integrated methodology combining critical textual analysis of early historical sources, topodetail military geography, and spatial mapping of ancient movement routes along the Wadi al-Sirhan network, this study reassesses the spatial scope of early Islamic campaigns. The paper concludes that Jordanian territory hosted key elements of these military operations, either in full or in critical regional phases, underscoring Jordan's strategic importance as an active battlefield and crucial gateway during the initial establishment of the Islamic presence in the Levant.
ISARC Academy

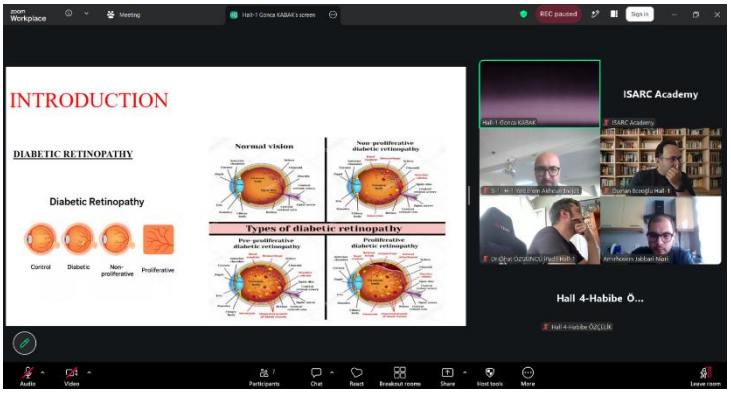

DIGITAL TRANSFORMATION OF INTEGRATED SCIENCE EDUCATION: FROM COMPUTATIONAL THINKING TO INTELLIGENT LEARNING SYSTEMS
INTRODUCTION
DIGITAL TRANSFORMATION OF INTEGRATED SCIENCE EDUCATION
ISARC Academy

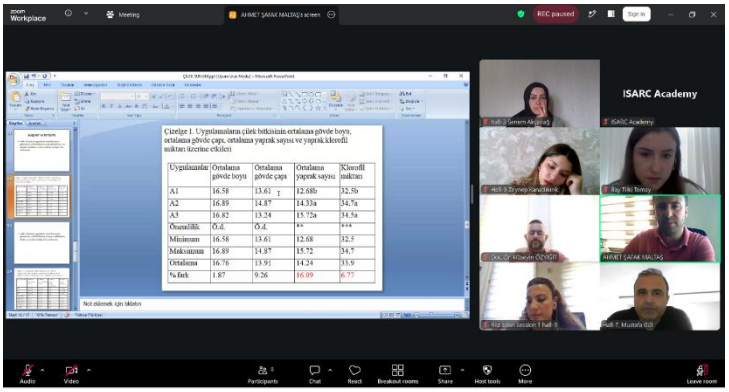

Biyolojik Etkenler
• Biyolojik tehlikeler, insanlar için sağlık açısından tehlike arz eden organizmalar veya organizma ürünleridir.
• Biyolojik tehlikeler, ev, okul veya iş dahil olmak üzere çevrenin herhangi bir yerinde bulunabilir.
ISARC Academy

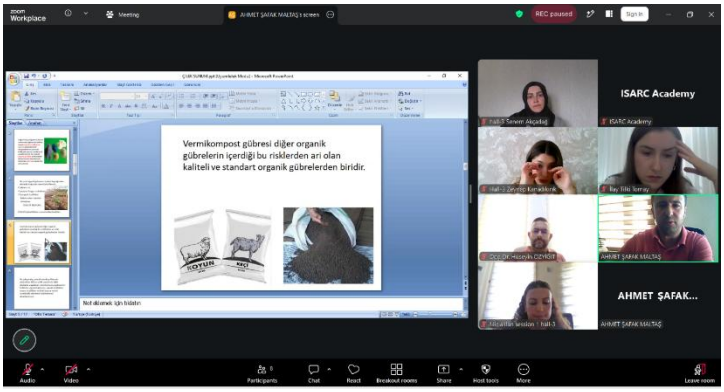

ISARC Academy

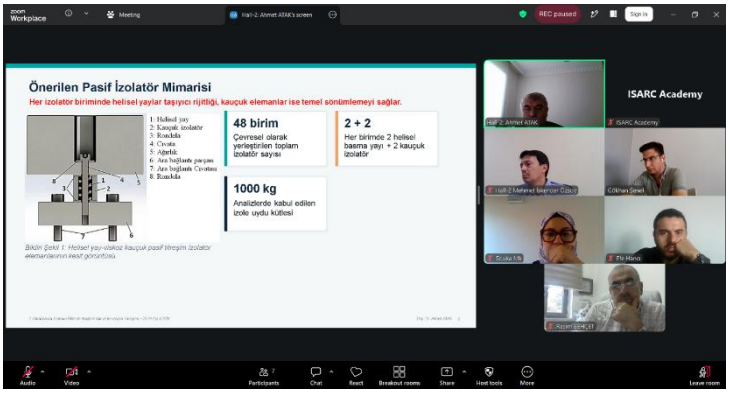

RESULTS AND DISCUSSION
Comparison of categorical variables among PDR, NPDR, DM, and CNT groups
Data are presented as n (%). Pearson chi-square test was used; Fisher–Freeman–Halton exact test (*) was used when expected cell counts were low. p<0,05 was considered statistically significant.
ISARC Academy
Hall 4-Habibe Ö...

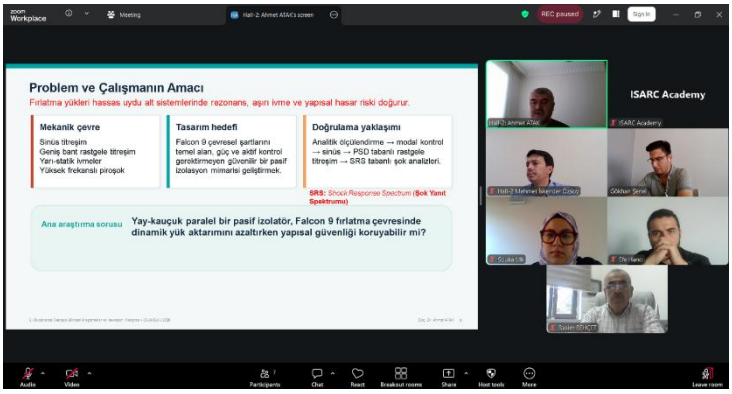

Antioxidant defense
REDOX Homeostasis
ROS/RNS
Diabetes → Hyperglycemia
Oxidative Stress
Diabetic Retinopathy
ISARC Academy
Hall 4-Habibe Ö...

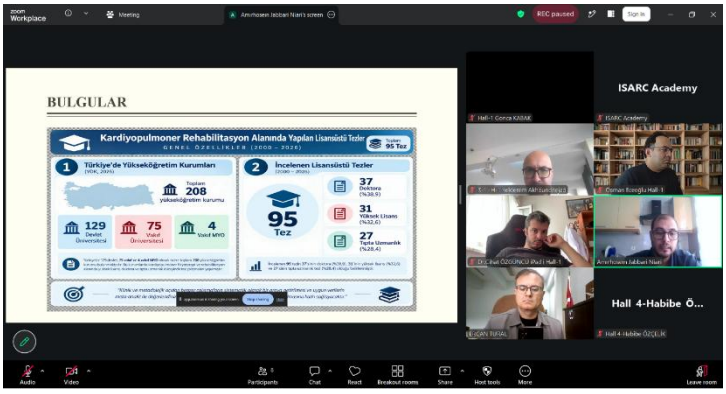

INTRODUCTION
DIABETIC RETINOPATHY
Diabetic Retinopathy
Control
Diabetic
Non-proliferative
Proliferative
Types of diabetic retinopathy
ISARC Academy
Hall 4-Habibe Ö...

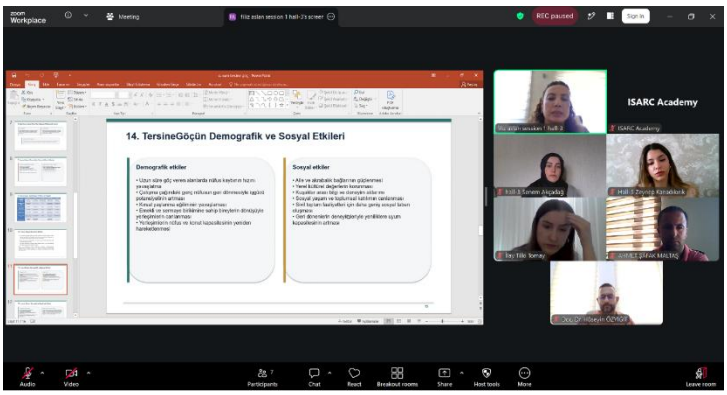

ISARC Academy

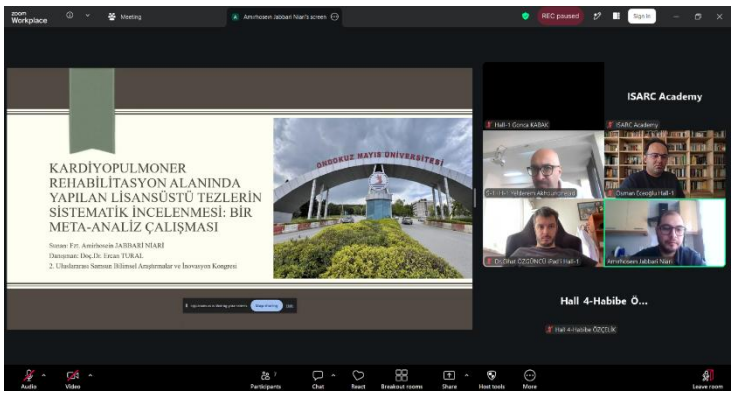

Vermikompost gübresi diğer organik gübrelerin içerdiği bu risklerden arı olan kaliteli ve standart organik gübrelerden biridir.
ISARC Academy
AHMET ŞAFAK...

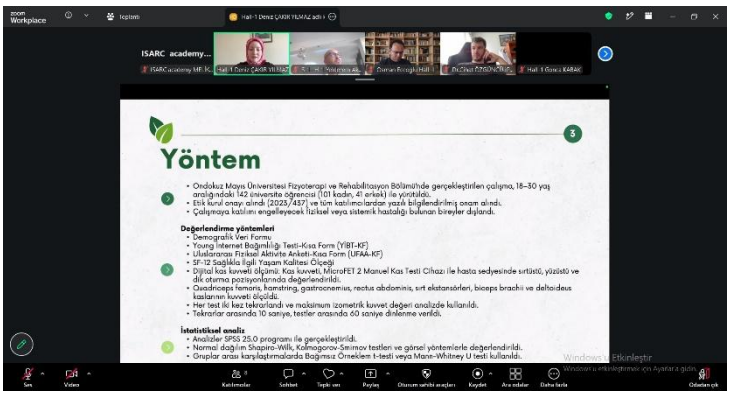

Önerilen Pasif İzolatör Mimarisi
Her izolatör biriminde helisel yaylar taşıyıcı rijitliği, kauçuk elemanlar ise temel sönümlemeyi sağlar.
48 birim
Çevresel olarak yerleştirilen toplam izolatör sayısı
2 + 2
Her birimde 2 helisel basma yayı + 2 kauçuk izolatör
1000 kg
Analizlerde kabul edilen izole uydu kütlesi
ISARC Academy

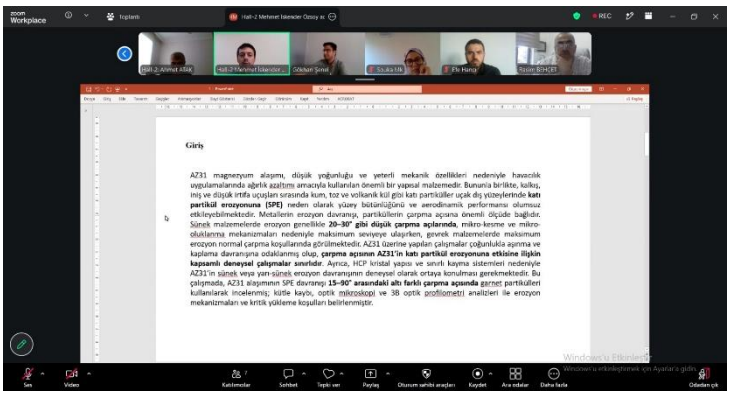

Problem ve Çalışmanın Amacı
Fırlatma yükleri hassas uydu alt sistemlerinde rezonans, aşırı ivme ve yapısal hasar riski doğurur.
Mekanik çevre
Sinüs titreşim
Geniş bant rastgele titreşim
Yarı-statik ivmeler
Yüksek frekanslı piroşok
Tasarım hedefi
Falcon 9 çevresel şartlarını temel alan, güç ve aktif kontrol gerektirmeyen güvenilir bir pasif izolasyon mimarisi geliştirmek.
Doğrulama yaklaşımı
Analitik ölçülendirme → modal kontrol → sinüs → PSD tabanlı rastgele titreşim → SRS tabanlı şok analizleri.
SRS: Shock Response Spectrum (Şok Yanıt Spektrumu)
Ana araştırma sorusu
Yay-kauçuk paralel bir pasif izolatör, Falcon 9 fırlatma çevresinde dinamik yük aktarımını azaltırken yapısal güvenliği koruyabilir mi?
ISARC Academy


BULGULAR
Kardiyopulmoner Rehabilitasyon Alanında Yapılan Lisansüstü Tezler
Türkiye'de Yükseköğretim Kurumları
İncelenen Lisansüstü Tezler
95 Tez
129
75
4
ISARC Academy
Hall 4-Habibe Ö...


14. TersineGöçün Demografik ve Sosyal Etkileri
Demografik etkiler
Sosyal etkiler
ISARC Academy


KARDİYOPULMONER REHABİLİTASYON ALANINDA YAPILAN LİSANSÜSTÜ TEZLERİN SİSTEMATİK İNCELENMESİ: BİR META-ANALİZ ÇALIŞMASI
ORDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
ISARC Academy
Hall 4-Habibe Ö...


Yöntem
Değerlendirme yöntemleri
İstatistiksel analiz
ISARC academy...


Giriş
AZ31 magnezyum alaşımı, düşük yoğunluğu ve yeterli mekanik özellikleri nedeniyle havacılık uygulamalarında ağırlık azaltımı amacıyla kullanılan önemli bir yapısal malzemedir.

Scientific Development and Innovative Approach

SAMSUN
2nd INTERNATIONAL SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION CONGRESS

September 23–24, 2026 · Samsun, Türkiye

CONGRESS PROGRAM

MEETING ID	PASSCODE	ZOOM LINK
828 5551 7985	066844	https://us06web.zoom.us/j/82855517985?pwd=D3a448VabyePr0XdQNsjquPrva9WID.1

PARTICIPANT COUNTRIES (12)

Türkiye, Azerbaijan, Brazil, Georgia, India, Jordan, Moldova, Morocco, Nigeria, Pakistan, Saudi Arabia, Serbia

IMPORTANT — PLEASE READ CAREFULLY

› To attend online: go to zoom.us/join, enter Meeting ID and join.
› Zoom is free and no account is required.
› Works on tablets, phones and PCs.
› Connect 5 minutes before your presentation time.
› All participants can connect live and listen to all sessions.
› The moderator is responsible for presentations and Q&A.

TECHNICAL INFORMATION

— Make sure your computer microphone is working.
— Enable the screen sharing feature in Zoom.
— Attendance certificates will be sent as PDF after congress.
— Requests for change of place and time will not be considered.

ONLINE PRESENTATIONS

23.09.2026

ONLINE · Hall-1 · 23 September 2026 · Session-1 · 10:00 – 12:00

DATE	TIME	SESSION
23 September 2026	10:00 – 12:00	Session-1 · Hall-1

Meeting ID: 828 5551 7985| **Passcode:** 066844 | **Link:** https://us06web.zoom.us/j/82855517985?pwd=D3a448VabyePr0XdQNsjquPrva9WID.1

HEAD OF SESSION: Assoc. Prof. Dr. Yelderem AKHOUNDNEJAD

AUTHOR(S)	ORGANISATION	TOPIC TITLE
Res. Asst. Deniz ÇAKIR YILMAZ Assoc. Prof. Dr. Ercan TURAL	Ondokuz Mayıs University, Türkiye	THE RELATIONSHIP BETWEEN INTERNET ADDICTION, PHYSICAL ACTIVITY, AND MUSCLE STRENGTH IN UNIVERSITY STUDENTS
Amirhosein JABBARİ NİARİ Assoc. Prof. Dr. Ercan TURAL	Ondokuz Mayıs University, Türkiye	SYSTEMATIC REVIEW OF GRADUATE EDUCATION THESES IN THE FIELD OF CARDIOPULMONARY REHABILITATION: A META-ANALYSIS STUDY
Asst. Prof. Dr. Cihat Özgüncü	Selcuk University, Türkiye	ALGORITHMIC SEMANTIC AUDITING OF INFORMED CONSENT IN NEUROLOGICAL EMERGENCIES: A MULTI_DIMENSIONAL EVALUATION WITH LARGE LANGUAGE MODELS AND THE UNIVERSAL HEALTH COMMUNICATION INDEX
Asst. Prof. Dr. Tugba AGBEKTAS Gonca KABAK Assoc. Prof. Dr. Duygu YALINBAS YETER	Sivas Cumhuriyet University, Türkiye	STAGE-SPECIFIC CHANGES IN SOD1 AND CAT GENE EXPRESSION DURING DIABETIC RETINOPATHY PROGRESSION
Lec. Dr. Habibe ÖZÇELİK	Akdeniz University, Türkiye	BIOLOGICAL RISK FACTORS AND PREVENTION OF NEEDLESTICK AND SHARPS INJURIES AMONG NURSES
Assoc. Prof. Dr. Yelderem AKHOUNDNEJAD Assoc. Prof. Dr. Yahya NAS	Şırnak University, Türkiye	EFFECTS OF DIFFERENT LED LIGHT SPECTRA ON GROWTH, YIELD, AND PHYTOCHEMICAL QUALITY OF VEGETABLES
Assoc. Prof. Dr. Yelderem AKHOUNDNEJAD Assoc. Prof. Dr. Yahya NAS	Şırnak University, Türkiye	EFFECTS OF FOLIAR MICRONUTRIENT APPLICATIONS ON YIELD, QUALITY, AND NUTRITIONAL VALUE OF VEGETABLE CROPS
Osman ECEOĞLU, PhD	Akdeniz University, Türkiye	RETRY THRESHOLDS IN ROBOTIC STRAWBERRY HARVESTING: A PARAMETRIC ANALYSIS BASED ON CONDITIONAL SUCCESS AND TIME COST

ONLINE PRESENTATIONS

23.09.2026

ONLINE · Hall-2 · 23 September 2026 · Session-1 · 10:00 – 12:00

DATE	TIME	SESSION
23 September 2026	10:00 – 12:00	Session-1 · Hall-2

Meeting ID: 828 5551 7985| **Passcode:** 066844 | **Link:** https://us06web.zoom.us/j/82855517985?pwd=D3a448VabyePr0XdQNsjquPrva9WID.1

HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Rasim BEHÇET

AUTHOR(S)	ORGANISATION	TOPIC TITLE
Assoc. Prof. Dr. Ahmet ATAK	Ostim Teknik University, Türkiye	ANALYTICAL DESIGN AND NUMERICAL VERIFICATION OF A HELICAL SPRING-BASED PASSIVE SATELLITE VIBRATION ISOLATOR UNDER LAUNCH VEHICLE ENVIROMENTAL CONDITIONS
Serkan IŞIK Sinan FİDAN Mustafa Özgür BORA Satılmış ÜRGÜN Mehmet İskender ÖZSOY	Kocaeli University, Türkiye; Sakarya University, Türkiye	EFFECT OF IMPINGEMENT ANGLE ON THE SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIOR AND SURFACE DAMAGE OF AZ31 MAGNESIUM ALLOY USED IN AIR VEHICLES
Özkan YILMAZ Cemile Nur ÖZDEMIR Mustafa Özgür BORA Sinan FİDAN Satılmış ÜRGÜN Mehmet İskender ÖZSOY	Kocaeli University, Türkiye; Sakarya University, Türkiye	INVESTIGATION OF SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIOR OF AA6061-T6 ALUMINUM ALLOY WITH DIFFERENT SURFACE TEXTURES USING FIBER LASER
Soukaina MELLOUK Assoc. Prof. Dr. Ebru HARMANDAR	Muğla Sıtkı Koçman University, Türkiye	DEVELOPING A GROUND-MOTION MODEL FOR THE AEGEAN REGION
Prof. Dr. Rasim BEHÇET	İnönü University, Türkiye	ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE FEBRUARY 6 EARTHQUAKES IN MALATYA PROVINCE
Prof. Dr. Rasim BEHÇET Gökhan ŞENEL	İnönü University, Türkiye	APPROXIMATE ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF THE BOR SUGAR FACTORY BOILER HOUSE UNDER CURRENT OPERATING CONDITIONSABSTRACT
Efe HANCI Mehmet Emre ÖZDEL Assist. Prof. Dr. Gürşah GÜRÜF	Karabük University, Türkiye	EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PASSIVE COOLING PERFORMANCE OF A HEAT SINK USING PARAFFIN–LAURIC ACID MIXTURES AS PHASE CHANGE MATERIAL
Assoc. Prof. Dr. Fatin SÖNMEZ Assist. Prof. Dr. Orhan YILDIRIM	Artvin Çoruh University, Türkiye; Atatürk University, Türkiye	MULTI-CRITERIA FLUID SELECTION AND THERMAL PERFORMANCE OPTIMISATION IN ELECTROSPREY COOLING SYSTEMS

ONLINE PRESENTATIONS

23.09.2026

ONLINE · Hall-3 · 23 September 2026 · Session-1 · 10:00 – 12:00

DATE	TIME	SESSION
23 September 2026	10:00 – 12:00	Session-1 · Hall-3

Meeting ID: 828 5551 7985| **Passcode:** 066844 | **Link:** https://us06web.zoom.us/j/82855517985?pwd=D3a448VabyePr0XdQNsjquPrva9WID.1

HEAD OF SESSION: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ÖZYİĞİT

AUTHOR(S)	ORGANISATION	TOPIC TITLE
Dr. Ahmet Safak MALTAS	Akdeniz University, Türkiye	EFFECTS OF VERMICOMPOST ON STRAWBERRY CULTIVATION
Dr. Ahmet Safak MALTAS	Akdeniz University, Türkiye	EFFECTS OF LEONARDITE APPLICATION ON LETTUCE GROWTH UNDER GREENHOUSE CONDITIONS
Res. Asst. İlay TİLKİ TOMAY	Muğla Sıtkı Koçman University, Türkiye	THE IMPACT OF TRANSITION INDICATORS TO CIRCULAR ECONOMY ON CARBON DIOXIDE EMISSIONS: PANEL DATA ANALYSIS FOR EU COUNTRIES
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ÖZYİĞİT	Erzincan Binali Yıldırım University, Türkiye	MACHINE LEARNING IN INDEPENDENT AUDITING: A STUDY ON KAP
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ÖZYİĞİT	Erzincan Binali Yıldırım University, Türkiye	FROM TRADITIONAL APPROACHES TO SMART PROCESSES: THE TRANSFORMATIVE ROLE OF AUTONOMOUS SYSTEMS IN COST ACCOUNTING AND MANAGEMENT
Zeynep KANADIKIRIK Mustafa GÜL	Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Türkiye	AN EXAMINATION OF TEACHER VIEWS ON THE "CENTURY OF TÜRKİYE" EDUCATION MODEL (TYMM) 5TH-GRADE MATHEMATICS CURRICULUM
Senem AKÇADAĞ Prof. Dr. Güldane GÜNDÜZÖZ	Kırıkkale University, Türkiye	THE CELESTIAL SPHERE TO NŪR: THE TRANSFORMATION OF THE COSMIC REALM INTO A SUFI MAP OF UNITY IN FEHÎM-İ KADÎM'S DÎVÂN
Assist. Prof. Dr. Filiz ASLAN Prof. Dr. Esra SİVEREKLİ	Mardin Artuklu University, Türkiye; Gaziantep University, Türkiye	DYNAMICS OF RETURN MIGRATION IN TURKEY AND ITS IMPACTS ON REGIONAL DEVELOPMENT
Dr. Yasemin ARI KOVANCI	Karamanoğlu Mehmetbey University, Türkiye	THE USE OF VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY IN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY TRAINING: A LITERATURE REVIEW
Dr. Yasemin ARI KOVANCI	Karamanoğlu Mehmetbey University, Türkiye	OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN HIGH-RISK SECTORS: AN ASSESSMENT WITH RESPECT TO OCCUPATIONAL ACCIDENTS AND DISEASES

ONLINE PRESENTATIONS

23.09.2026

ONLINE · Hall-1 · 23 September 2026 · Session-2 · 11:00 – 13:00

DATE	TIME	SESSION
23 September 2026	11:00 – 13:00	Session-2 · Hall-1

Meeting ID: 828 5551 7985| **Passcode:** 066844 | **Link:** https://us06web.zoom.us/j/82855517985?pwd=D3a448VabyePr0XdQNsjquPrva9WID.1

HEAD OF SESSION: Moses Adeolu AGOI

AUTHOR(S)	ORGANISATION	TOPIC TITLE
Dr. Seyfaddin JAFAROV	Nakhchivan State University, Azerbaijan	DOPED INS;0.5%HO NANOSTRUCTURES; SYNTHESIS,PROPERTIES AND APPLICATIONS
Ph.D. Gulbaniz Aliyeva Tofig	Lankaran State University, Azerbaijan	PROBLEMS OF ENHANCING THE COMPETITIVENESS OF INDUSTRY
Dr Irfan Bashir Ms. Fareeha Sherazi Dr Afshan Naseem Dr Yasira Waqar Dr Abdul Malik Dr Fariha Gul Dr Almas Shoiab Dr Aisha Sami Dr Aqila Rafiq Dr Farhat Munir	University of Management and Technology, Pakistan	STRENGTHENING FACULTY PROFESSIONAL DEVELOPMENT IN PAKISTANI HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS: EXAMINING THE ROLE OF LEADERSHIP
Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti Ar. Dr. Zulfiqar Ali Tariq Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran Prof. Dr. Syed Hamid Arshad	University of Management and Technology, Pakistan; NESPAK, Lahore, Pakistan; International Islamic University Islamabad, Pakistan; Government of Punjab, 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. Faiqa Khan Ar. Saad Mujahid Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran	University of Management and Technology, Pakistan; Lahore Leads University, Pakistan; International Islamic University Islamabad, Pakistan	EXPLORING ARCHITECTURAL ORNAMENTATION OF MUGHAL ERA BUILDINGS OF LAHORE IN THE ERA OF CLIMATE CHANGE CHALLENGES
Moses Adeolu AGOI Olawale Adejumo OSUNLOYE Faith Oghenewveta ALUKO Oluwanifemi Opeyemi AGOI	Lagos State University of Education, Lagos Nigeria; Obafemi Awolowo University, Osun Nigeria	DIGITAL TRANSFORMATION OF INTEGRATED SCIENCE EDUCATION: FROM COMPUTATIONAL THINKING TO INTELLIGENT LEARNING SYSTEMS
PhD Roxana Mihaela Moisoiu	Constantin Stere University (USPEE) Moldova	GLOBAL LEGISLATION FOR THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE: TOWARDS A UNIVERSAL LEGAL FRAMEWORK

ONLINE PRESENTATIONS

23.09.2026

ONLINE · Hall-2 · 23 September 2026 · Session-2 · 11:00 – 13:00

DATE	TIME	SESSION
23 September 2026	11:00 – 13:00	Session-2 · Hall-2

Meeting ID: 828 5551 7985| **Passcode:** 066844 | **Link:** https://us06web.zoom.us/j/82855517985?pwd=D3a448VabyePr0XdQNsjquPrva9WID.1

HEAD OF SESSION: Prof. Dr.Mohammed Waheeb

AUTHOR(S)	ORGANISATION	TOPIC TITLE
Marijana Zimonjic Aleksandra Čadjenović	Academy of Applied Studies Politehnika, Serbia; Megatrend university, Serbia	APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE DIGITAL ECONOMY
Aleksandra Čadjenović	Megatrend university, Serbia	APPLICATION OF CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES FOR SUSTAINABLE BUSINESS OPERATIONS AND ENTERPRISE DEVELOPMENT
PhD Roxana Mihaela Moisoiu	Constantin Stere University (USPEE) Moldova	THE LEGAL SYSTEM IN THE AGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE
Prof. Dr.Mohammed Waheeb	The Hashemite University, Jordan	ARCHAEOLOGICAL EVIDENCE OF EARLY ISLAMIC CAMPAIGNS: THE BATTLE OF DUMAT AL- JANDAL NEAR WADI AL-SIRHAN / JORDANIAN TERRITORY
Nodar Sulashvili Nato Alavidze Maka Javakhia Nino Abuladze Ketevan Gabunia Vira Kravchenko Olga Shapoval Igor Seniuk Nana Gorgaslidze Marika Sulashvili Lali Patsia Marina Giorgobiani	David Agmashenebeli University of Georgia, Georgia	THE SCIENTIFIC DISCOURSE ON THE ROLE OF CLINICAL PHARMACY SERVICES IN OPTIMIZING COMPLEX PHARMACOTHERAPY: ADVANCING PHARMACOVIGILANCE, DRUG TOXICITY MANAGEMENT, MEDICATION SAFETY, THERAPEUTIC OPTIMIZATION, TREATMENT EFFECTIVENESS, PRESCRIBING QUALITY, RISK REDUCTION, AND PUBLIC HEALTH OUTCOMES
KOLO SHESHI GANA MOHAMMED	NIGER STATE COLLEGE OF NURSING SCIECE SCHOOL OF NURSING AND MIDWIFERY BIDA, Nigeria	INFLUENCE OF STUDENTS' POOR CLINICAL PERFORMANCE ON PATIENT MORTALITY IN HOSPITALS: THE WAY FORWARD – A CASE STUDY OF NIGER STATE SCHOOL OF NURSING, BIDA
Assistant Professor, Shahjahan A. S.	Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University, India	CHARACTERIZATION OF BEE VENOM PROTEINS USING SDS-PAGE ELECTROPHORESIS

ONLINE PRESENTATIONS

23.09.2026

ONLINE · Hall-3 · 23 September 2026 · Session-2 · 11:00 – 13:00

DATE	TIME	SESSION
23 September 2026	11:00 – 13:00	Session-2 · Hall-3

Meeting ID: 828 5551 7985| **Passcode:** 066844 | **Link:** https://us06web.zoom.us/j/82855517985?pwd=D3a448VabyePr0XdQNsjquPrva9WID.1

HEAD OF SESSION: Academician Prof Dr Ivan PAVLOVIĆ

AUTHOR(S)	ORGANISATION	TOPIC TITLE
Salma MAKDOUF Karima El Bouqdaoui Abdelhakim El Makssoudi Mounia Cherki	Hassan II University of Casablanca, Morocco; Higher Institute of Nursing and Health Techniques, Morocco	COMPARATIVE STUDY OF THE PHYTOCHEMICAL COMPOSITION OF FUMARIA PARVIFLORA FROM CASABLANCA, EL JADIDA AND KHOURIBGA OF MOROCCO
Academician Prof Dr Ivan PAVLOVIĆ	Scientific Institute of Veterinary Medicine of Serbia	PRESENCE AND ROLE OF CHABERTIA OVINA IN PATHOLOGY OF SHEEP AND GOATS IN SERBIA
Assist. Prof. Jyoti Rani	Parul University, India	SUSTAINABLE AGRICULTURAL BIOMASS FOR NATURAL FIBRE, DYEING, AND CIRCULAR TEXTILE APPLICATIONS
Enobong Inwang Ekpo	Akwa Ibom State Polytechnic, Nigeria	PHYTOCHEMICAL AND ANTI-NUTRIENT COMPOSITION OF DRIED RHIZOME OF ALLIUM SATIVUM OBTAINED FROM AKWA IBOM STATE, NIGERIA.
Madhumitha P. Murugesan Kamaraj	SRM Institute of Science and Technology, India	WASTE TO RESOURCE APPROACH: VALORIZATION OF FISH PROCESSING WASTE FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL APPLICATION
Ijeoma Lawretta PRINCEWILL-OGBONNA Samuel Chimaobi AGWU	Michael Okpara University of Agriculture, Nigeria	EXTRACTION AND COLOUR STABILITY OF PIGMENT FROM TURMERIC AT VARYING TEMPERATURES AND PH AND ITS ACCEPTABILITY AS COOKIES COLORANT
Associate Prof. Dr. Rabia Ghaffar Hira Mehboob	University of Education, Pakistan	APPLICATION OF ORGANIC PLANT EXTRACTS FOR LETTUCE GROWTH AND YIELD IN ALKALINE SOIL

ONLINE PRESENTATIONS

23.09.2026

ONLINE · Hall-4 · 23 September 2026 · Session-2 · 11:00 – 13:00

DATE	TIME	SESSION
23 September 2026	11:00 – 13:00	Session-2 · Hall-4

Meeting ID: 828 5551 7985| **Passcode:** 066844 | **Link:** https://us06web.zoom.us/j/82855517985?pwd=D3a448VabyePr0XdQNsjquPrva9WID.1

HEAD OF SESSION: Evangeline Christina

AUTHOR(S)	ORGANISATION	TOPIC TITLE
Atsehe Iorlumun Innocent	Joseph Sarwuan Tarka University Makurdi, Nigeria	INFLUENCE OF DIFFERENT PLANT SPACING ON INSECT PESTS INFESTATION AND YIELD OF AMARANTHUS HABRIDUS IN MAKURDI, NIGERIA
Olubukola L. Ayanleye Victor N. Enujiugha	Federal University of Technology, Nigeria	POTENTIALS OF AGRO-INDUSTRIAL BY-PRODUCTS AS CLEAN LABEL FOOD INGREDIENTS FOR DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL FOODS
Deilton RIBEIRO BRASIL	University of Itaúna, Brazil	FOREIGN RURAL LAND ACQUISITION IN BRAZIL: CONSTITUTIONAL SOVEREIGNTY, FOOD SECURITY, AND ENVIRONMENTAL PROTECTION
Maryem Arraji Mohamed Khalis Mohamed Chahboune	Hassan First University of Settat, Morocco; Mohammed VI University of Health Sciences, Morocco; Mohamed V University in Rabat, Rabat, Morocco	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
Sazada Siddiqui	King Khalid University, Saudi Arabia	MANGANESE'S CYTOTOXICITY AND GENOTOXICITY IN GLYCINE MAX L. ROOT MERISTEMTIC CELLS
Azimul Hasan Evangeline Christina	VIT Bhopal University, India	AN INTEGRATED FRAMEWORK FOR SOIL HEALTH AND RISK ASSESSMENT OF THE INORGANIC POLLUTANT MONITORING OF SOIL OF THE CENTRAL ZONE OF INDIA: COMBINING ICP-MS, FTIR SPECTROSCOPY, AND 16S RRNA MICROBIAL PROFILING

CONTENT

AUTHOR(S)	TOPIC TITLE	P.No
Habibe ÖZÇELİK	BIOLOGICAL RISK FACTORS AND PREVENTION OF NEEDLESTICK AND SHARPS INJURIES AMONG NURSES	1
Zeynep KANADIKIRIK Mustafa GÜL	AN EXAMINATION OF TEACHER VIEWS ON THE "CENTURY OF TÜRKİYE" EDUCATION MODEL (TYMM) 5TH-GRADE MATHEMATICS CURRICULUM	3
Yasemin ARI KOVANCI	THE USE OF VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY IN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY TRAINING: A LITERATURE REVIEW	5
Yasemin ARI KOVANCI	OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN HIGH-RISK SECTORS: AN ASSESSMENT WITH RESPECT TO OCCUPATIONAL ACCIDENTS AND DISEASES	6
Gulbaniz Aliyeva Tofig	PROBLEMS OF ENHANCING THE COMPETITIVENESS OF INDUSTRY	7
Irfan Bashir Fareeha Sherazi Afshan Naseem Yasira Waqar Abdul Malik Fariha Gul Almas Shoiab Aisha Sami Aqila Rafiq Farhat Munir	STRENGTHENING FACULTY PROFESSIONAL DEVELOPMENT IN PAKISTANI HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS: EXAMINING THE ROLE OF LEADERSHIP	8
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	9
Omer Shujat Bhatti Faiqa Khan Saad Mujahid Muhammad Asad Ghufran	EXPLORING ARCHITECTURAL ORNAMENTATION OF MUGHAL ERA BUILDINGS OF LAHORE IN THE ERA OF CLIMATE CHANGE CHALLENGES	10
Roxana Mihaela Moisoiu	GLOBAL LEGISLATION FOR THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE: TOWARDS A UNIVERSAL LEGAL FRAMEWORK	11
Marijana Zimonjic Aleksandra Čadjenović	APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE DIGITAL ECONOMY	12
Aleksandra Čadjenović	APPLICATION OF CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES FOR SUSTAINABLE BUSINESS OPERATIONS AND ENTERPRISE DEVELOPMENT	13
Roxana Mihaela Moisoiu	THE LEGAL SYSTEM IN THE AGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE	14
Mohammed Waheeb	ARCHAEOLOGICAL EVIDENCE OF EARLY ISLAMIC CAMPAIGNS: THE BATTLE OF DUMAT AL- JANDAL NEAR WADI AL-SIRHAN / JORDANIAN TERRITORY	16
Shahjahan A. S.	CHARACTERIZATION OF BEE VENOM PROTEINS USING SDS-PAGE ELECTROPHORESIS	18
Salma MAKDOUF Karima El Bouqdaoui Abdelhakim El Makssoudi Mounia Cherki	COMPARATIVE STUDY OF THE PHYTOCHEMICAL COMPOSITION OF FUMARIA PARVIFLORA FROM CASABLANCA, EL JADIDA AND KHOURIBGA OF MOROCCO	19

Ivan PAVLOVIĆ	*PRESENCE AND ROLE OF CHABERTIA OVINA IN PATHOLOGY OF SHEEP AND GOATS IN SERBIA*	*20*
Jyoti Rani	*SUSTAINABLE AGRICULTURAL BIOMASS FOR NATURAL FIBRE, DYEING, AND CIRCULAR TEXTILE APPLICATIONS*	*21*
Enobong Inwang Ekpo	*PHYTOCHEMICAL AND ANTI-NUTRIENT COMPOSITION OF DRIED RHIZOME OF ALLIUM SATIVUM OBTAINED FROM AKWA IBOM STATE, NIGERIA.*	*22*
Madhumitha P. *Murugesan Kamaraj*	*WASTE TO RESOURCE APPROACH: VALORIZATION OF FISH PROCESSING WASTE FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL APPLICATION*	*23*
Ijeoma Lawretta PRINCEWILL-OGBONNA *Samuel Chimaobi AGWU*	*EXTRACTION AND COLOUR STABILITY OF PIGMENT FROM TURMERIC AT VARYING TEMPERATURES AND PH AND ITS ACCEPTABILITY AS COOKIES COLORANT*	*24*
Rabia Ghaffar *Hira Mehboob*	*APPLICATION OF ORGANIC PLANT EXTRACTS FOR LETTUCE GROWTH AND YIELD IN ALKALINE SOIL*	*25*
Atsehe Iorlumun Innocent	*INFLUENCE OF DIFFERENT PLANT SPACING ON INSECT PESTS INFESTATION AND YIELD OF AMARANTHUS HABRIDUS IN MAKURDI, NIGERIA*	*26*
Olubukola L. Ayanleye *Victor N. Enujiugha*	*POTENTIALS OF AGRO-INDUSTRIAL BY-PRODUCTS AS CLEAN LABEL FOOD INGREDIENTS FOR DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL FOODS*	*27*
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*	*28*
Sazada Siddiqui	*MANGANESE'S CYTOTOXICITY AND GENOTOXICITY IN GLYCINE MAX L. ROOT MERISTEMTIC CELLS*	*29*
Azimul Hasan *Evangeline Christina*	*AN INTEGRATED FRAMEWORK FOR SOIL HEALTH AND RISK ASSESSMENT OF THE INORGANIC POLLUTANT MONITORING OF SOIL OF THE CENTRAL ZONE OF INDIA: COMBINING ICP-MS, FTIR SPECTROSCOPY, AND 16S RRNA MICROBIAL PROFILING*	*30*
Deniz ÇAKIR YILMAZ *Ercan TURAL*	*THE RELATIONSHIP BETWEEN INTERNET ADDICTION, PHYSICAL ACTIVITY, AND MUSCLE STRENGTH IN UNIVERSITY STUDENTS*	*31*
Amirhosein JABBARİ NİARİ *Ercan TURAL*	*SYSTEMATIC REVIEW OF GRADUATE EDUCATION THESES IN THE FIELD OF CARDIOPULMONARY REHABILITATION:* *A META-ANALYSIS STUDY*	*43*
Cihat Özgüncü	*ALGORITHMIC SEMANTIC AUDITING OF INFORMED CONSENT IN NEUROLOGICAL EMERGENCIES: A MULTI_DIMENSIONAL EVALUATION WITH LARGE LANGUAGE MODELS AND THE UNIVERSAL HEALTH COMMUNICATION INDEX*	*55*
Tugba AGBEKTAS *Gonca KABAK* *Duygu YALINBAS YETER*	*STAGE-SPECIFIC CHANGES IN SOD1 AND CAT GENE EXPRESSION DURING DIABETIC RETINOPATHY PROGRESSION*	*63*
Yelderem AKHOUNDNEJAD *Yahya NAS*	*EFFECTS OF DIFFERENT LED LIGHT SPECTRA ON GROWTH, YIELD, AND PHYTOCHEMICAL QUALITY OF VEGETABLES*	*72*
Yelderem AKHOUNDNEJAD *Yahya NAS*	*EFFECTS OF FOLIAR MICRONUTRIENT APPLICATIONS ON YIELD, QUALITY, AND NUTRITIONAL VALUE OF VEGETABLE CROPS*	*81*

Osman ECEOĞLU	*RETRY THRESHOLDS IN ROBOTIC STRAWBERRY HARVESTING: A PARAMETRIC ANALYSIS BASED ON CONDITIONAL SUCCESS AND TIME COST*	*96*
Ahmet ATAK	*ANALYTICAL DESIGN AND NUMERICAL VERIFICATION OF A HELICAL SPRING-BASED PASSIVE SATELLITE VIBRATION ISOLATOR UNDER LAUNCH VEHICLE ENVIROMENTAL CONDITIONS*	*104*
Serkan IŞIK *Sinan FİDAN* *Mustafa Özgür BORA* *Satılmış ÜRGÜN* *Mehmet İskender ÖZSOY*	*EFFECT OF IMPINGEMENT ANGLE ON THE SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIOR AND SURFACE DAMAGE OF AZ31 MAGNESIUM ALLOY USED IN AIR VEHICLES*	*121*
Özkan YILMAZ *Cemile Nur ÖZDEMIR* *Mustafa Özgür BORA* *Sinan FİDAN* *Satılmış ÜRGÜN* *Mehmet İskender ÖZSOY*	*INVESTIGATION OF SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIOR OF AA6061-T6 ALUMINUM ALLOY WITH DIFFERENT SURFACE TEXTURES USING FIBER LASER*	*132*
Soukaina MELLOUK *Ebru HARMANDAR*	*DEVELOPING A GROUND-MOTION MODEL FOR THE AEGEAN REGION*	*148*
Rasim BEHÇET	*ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE FEBRUARY 6 EARTHQUAKES IN MALATYA PROVINCE*	*154*
Rasim BEHÇET *Gökhan ŞENEL*	*APPROXIMATE ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF THE BOR SUGAR FACTORY BOILER HOUSE UNDER CURRENT OPERATING CONDITIONSABSTRACT*	*168*
Efe HANCI *Mehmet Emre ÖZDEL* *Gürşah GÜRÜF*	*EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PASSIVE COOLING PERFORMANCE OF A HEAT SINK USING PARAFFIN–LAURIC ACID MIXTURES AS PHASE CHANGE MATERIAL*	*180*
Fatin SÖNMEZ *Orhan YILDIRIM*	*MULTI-CRITERIA FLUID SELECTION AND THERMAL PERFORMANCE OPTIMISATION IN ELECTROSPREY COOLING SYSTEMS*	*193*
Ahmet Safak MALTAS	*EFFECTS OF VERMICOMPOST ON STRAWBERRY CULTIVATION*	*202*
Ahmet Safak MALTAS	*EFFECTS OF LEONARDITE APPLICATION ON LETTUCE GROWTH UNDER GREENHOUSE CONDITIONS*	*208*
İlay TİLKİ TOMAY	*THE IMPACT OF TRANSITION INDICATORS TO CIRCULAR ECONOMY ON CARBON DIOXIDE EMISSIONS: PANEL DATA ANALYSIS FOR EU COUNTRIES*	*213*
Hüseyin ÖZYİĞİT	*MACHINE LEARNING IN INDEPENDENT AUDITING: A STUDY ON KAP*	*222*
Hüseyin ÖZYİĞİT	*FROM TRADITIONAL APPROACHES TO SMART PROCESSES: THE TRANSFORMATIVE ROLE OF AUTONOMOUS SYSTEMS IN COST ACCOUNTING AND MANAGEMENT*	*228*
Senem AKÇADAĞ *Güldane GÜNDÜZÖZ*	*THE CELESTIAL SPHERE TO NŪR: THE TRANSFORMATION OF THE COSMIC REALM INTO A SUFI MAP OF UNITY IN FEHÎM-İ KADÎM'S DÎVÂN*	*234*
Filiz ASLAN *Esra SİVEREKLİ*	*DYNAMICS OF RETURN MIGRATION IN TURKEY AND ITS IMPACTS ON REGIONAL DEVELOPMENT*	*242*
Seyfaddin JAFAROV	*DOPED INS;0.5%HO NANOSTRUCTURES; SYNTHESIS,PROPERTIES AND APPLICATIONS*	*257*

Moses Adeolu AGOI *Olawale Adejumo OSUNLOYE* *Faith Oghenewveta ALUKO* *Oluwanifemi Opeyemi AGOI*	*DIGITAL TRANSFORMATION OF INTEGRATED SCIENCE EDUCATION: FROM COMPUTATIONAL THINKING TO INTELLIGENT LEARNING SYSTEMS*	*283*
Nodar Sulashvili *Nato Alavidze* *Maka Javakhia* *Nino Abuladze* *Ketevan Gabunia* *Vira Kravchenko* *Olga Shapoval* *Igor Seniuk* *Nana Gorgaslidze* *Marika Sulashvili* *Lali Patsia* *Marina Giorgobiani*	*THE SCIENTIFIC DISCOURSE ON THE ROLE OF CLINICAL PHARMACY SERVICES IN OPTIMIZING COMPLEX PHARMACOTHERAPY: ADVANCING PHARMACOVIGILANCE, DRUG TOXICITY MANAGEMENT, MEDICATION SAFETY, THERAPEUTIC OPTIMIZATION, TREATMENT EFFECTIVENESS, PRESCRIBING QUALITY, RISK REDUCTION, AND PUBLIC HEALTH OUTCOMES*	*296*
KOLO SHESHI *GANA MOHAMMED*	*INFLUENCE OF STUDENTS' POOR CLINICAL PERFORMANCE ON PATIENT MORTALITY IN HOSPITALS: THE WAY FORWARD – A CASE STUDY OF NIGER STATE SCHOOL OF NURSING, BIDA*	*353*
Deilton RIBEIRO BRASIL	*FOREIGN RURAL LAND ACQUISITION IN BRAZIL: CONSTITUTIONAL SOVEREIGNTY, FOOD SECURITY, AND ENVIRONMENTAL PROTECTION*	*362*

HEMŞİRELERDE BİYOLOJİK RİSK ETMENLERİ VE KESİCİ-DELİCİ ALET YARALANMALARININ ÖNLENMESİ

Öğr. Gör. Dr. Habibe ÖZÇELİK

Akdeniz Üniversitesi, Hemşirelik Fakültesi, Halk Sağlığı Hemşireliği Anabilim Dalı, 07058, Konyaaltı, Antalya

ORCID ID: 0000-0003-2573-7925

ÖZET

Hemşireler, bakım uygulamaları sırasında kan ve vücut sıvılarıyla temas, perkütan yaralanma ve solunum yoluyla biyolojik etkenlere maruz kalabilmektedir. Kesici-delici alet yaralanmaları, hepatit B virüsü, hepatit C virüsü ve HIV gibi etkenlerin bulaşı açısından önemli bir mesleki risktir. Bu derlemenin amacı, hemşirelerde biyolojik risk etmenlerini kesici-delici alet yaralanmalarının önlenmesi ile maruziyet sonrası yönetim yaklaşımları odağında ele almaktır. Korunmada, risk değerlendirmesi, el hijyeni, uygun kişisel koruyucu donanım ve hepatit B bağışıklaması önemlidir ancak yeterli değildir. İnvaziv girişim öncesinde malzemeler hazırlanmalı, atıkların nereye atılacağı işlem öncesi planlanmalı ve işlem aceleye getirilmemelidir. Delinmeye dayanıklı atık kutuları işlem alanında, kolay ulaşılabilir konumda bulunmalıdır. İşlem sırasında uygun eldiven ve güvenlik mekanizmalı araçlar kullanılmalıdır. Parmak ucundan kan şekeri ölçümünde enjektör iğnesi yerine tek kullanımlık, güvenlik mekanizmalı lanset tercih edilmelidir. Kullanılmış iğnelerin kapakları yeniden takılmamalı; iğneler eğilmemeli veya bükülmemelidir. Kullanımı tamamlanan tek kullanımlık kesici-delici aletler elden ele aktarılmadan, elde bekletilmeden, odalar arasında taşınmadan veya ortamda bırakılmadan hemen kesici-delici atık kutusuna atılmalıdır. Bu atıklar doğrudan tıbbi veya evsel atık poşetlerine konulmamalıdır. Kesici-delici atık kutuları dörtte üç doluluğa ulaştığında kapatılarak değiştirilmeli; dolu kutulara atık eklenmemeli veya atıklar sıkıştırılmamalıdır. Yaralanma sonrasında bölge su ve sabunla yıkanmalıdır. Ayrıca, sıkma, kanatma ve emme gibi travmatize edici eylemlerden kaçınılmalıdır. Olay gecikmeden bildirilmeli ve tıbbi değerlendirme sağlanmalıdır. Maruziyetin özellikleri, kaynak kişinin enfeksiyon durumu ve çalışanın bağışıklığı doğrultusunda tetkikler, endikasyon varsa profilaksi ve izlem planlanmalıdır. Sonuç olarak, korunma; güvenli ekipman, uygun çalışma ortamı, sürekli eğitim, bağışıklama ve etkin bildirim sistemlerinin bütünleştirilmesini gerektirir. İşyeri sağlık ve güvenlik birimi, enfeksiyon kontrol ekibi ve hemşirelik yönetiminin iş birliği, koruyucu uygulamaların sürekliliğini destekler.

Anahtar kelimeler: Hemşirelik; biyolojik risk etmenleri; kesici-delici alet yaralanmaları; çalışan sağlığı; korunma.

BIOLOGICAL RISK FACTORS AND PREVENTION OF NEEDLESTICK AND SHARPS INJURIES AMONG NURSES

ABSTRACT

Nurses may be exposed to biological agents through contact with blood and body fluids, percutaneous injuries, and inhalation during care delivery. Sharps injuries pose a significant occupational risk for the transmission of pathogens such as hepatitis B virus, hepatitis C virus, and HIV. This review examines biological hazards among nurses, focusing on sharps injury prevention and post-exposure management. Risk assessment, hand hygiene, appropriate personal protective equipment, and hepatitis B immunization are important but insufficient on their own. Before invasive procedures, equipment should be prepared and waste disposal planned; procedures should not be rushed. Puncture-resistant sharps containers should be readily accessible at the point of use. During procedures, appropriate gloves and safety-engineered devices should be used. Single-use, safety-engineered lancets should be preferred to syringe needles for fingerstick blood glucose testing. Used needles should not be recapped, bent, or twisted. After use, disposable sharps should be discarded immediately into sharps containers without

being passed hand to hand, held unnecessarily, transported between rooms, or left in the clinical environment. Sharps must not be placed directly into medical or household waste bags. Containers should be closed and replaced when three-quarters full; additional waste should not be added or the contents compressed. Following injury, the affected area should be washed with soap and water; further trauma from squeezing, inducing bleeding, or sucking the wound should be avoided. Incidents should be reported promptly, and medical evaluation should be obtained. Testing, prophylaxis when indicated, and follow-up should be planned according to exposure characteristics, the source person's infection status, and the worker's immune status. In conclusion, prevention requires integrating safe equipment, an appropriate working environment, continuing education, immunization, and effective reporting systems. Collaboration among the occupational health and safety unit, infection control team, and nursing management supports sustained preventive practices.

Keywords: Nursing; biological hazards; needlestick and sharps injuries; occupational health; prevention.

TÜRKİYE YÜZYILI MAARİF MODELİ 5. SINIF MATEMATİK ÖĞRETİM PROGRAMINA İLİŞKİN ÖĞRETMEN GÖRÜŞLERİNİN İNCELENMESİ

Zeynep KANADIKIRIK

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eğitim Programları ve Öğretimi Programı, 46040 Onikişubat, Kahramanmaraş

ORCID ID: 0009-0007-7961-3377

Mustafa GÜL

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eğitim Programları ve Öğretimi Programı, 46040 Onikişubat, Kahramanmaraş

ORCID ID: 0000-0001-7641-3256

ÖZET

Bu çalışma, 2024 yılında hazırlanan ve 2024-2025 eğitim-öğretim uygulanmaya başlanan Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli (TYMM) Ortaokul Matematik Dersi Öğretim Programı hakkında 5. sınıf ilköğretim matematik öğretmenlerinin görüşlerinin incelemesini amaçlamaktadır. Araştırma, fenomenoloji deseniyle yürütülen nitel bir araştırmadır. Araştırmanın çalışma grubunu 2025-2026 yılında Kahramanmaraş ilindeki 3 farklı okulda görev yapan, 5. Sınıf düzeyinde TYMM matematik dersi öğretim programını uygulayan 10 ilköğretim matematik öğretmeni oluşturmaktadır. Veriler, yarı yapılandırılmış görüşme formu aracılığıyla toplanmış ve verilerin analizinde içerik analizi tekniği kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, 5. Sınıf matematik öğretmenlerinin programın temel felsefesi olan erdemli bireylerin yetiştirilmesi hedefini olumlu buldukları belirlenmiştir. Öğretmenlerin programın öğrenme çıktılarında yer alan dijital okuryazarlığı geliştirme, keşfederek öğrenme ve düşünme becerilerini geliştirme gibi amaçlara olumlu yaklaştıkları sonucuna ulaşılmıştır. Öğretmenler programın içerik boyutunda programı detaylı ve kapsayıcı buldukları ve bu duruma olumlu yaklaştıkları saptanmıştır. Öğretmenlerin ders kitaplarının içeriklerini ise yetersiz ve zor buldukları tespit edilmiştir. Öğrenme- öğretme yaşantıları boyutunda, öğrenme-öğretme süreci için zamanın yetersiz olduğunu ve etkinliklerin fazla soyut kaldığını düşündükleri belirlenmiştir. Ölçme değerlendirme boyutunda ise öğretmenlerin programda süreç değerlendirme ve öğrenci gelişimini izlemeye yer verilmesine olumlu yaklaştıkları ancak kalabalık sınıflarda ölçme değerlendirme uygulamalarında zorluklar yaşadıkları tespit edilmiştir. Öğretmenler programın etkili bir şekilde uygulanabilmesi içim zamanın doğru bir şekilde planlanması ve sınıf mevcutlarının azaltılması gibi öneriler sunmuşlardır.

Anahtar kelimeler: Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli (TYMM), Ortaokul Matematik Dersi Öğretim Programı, 5. Sınıf Matematik, Öğretmen Görüşleri, Program Değerlendirme.

AN EXAMINATION OF TEACHER VIEWS ON THE "CENTURY OF TÜRKİYE" EDUCATION MODEL (TYMM) 5TH-GRADE MATHEMATICS CURRICULUM

ABSTRACT

This study aims to examine the views of 5th-grade primary mathematics teachers regarding the "Century of Türkiye" Education Model (TYMM) Secondary School Mathematics Curriculum, which was prepared in 2024 and implemented starting in the 2024-2025 academic year. The research is a qualitative study conducted using a phenomenological design. The study group consists of 10 primary mathematics teachers working in three different schools in Kahramanmaraş during the 2025-2026 academic year who implemented the TYMM mathematics curriculum at the 5th-grade level. Data were collected via a semi-structured interview form, and content analysis was used to analyze the data. The

results revealed that 5th-grade mathematics teachers viewed the program's fundamental philosophy of raising virtuous individuals positively. It was concluded that teachers held a positive attitude toward objectives included in the program's learning outcomes, such as developing digital literacy, discovery-based learning, and thinking skills. Teachers were found to view the program as detailed and comprehensive regarding its content dimension and to regard this aspect positively. However, it was determined that teachers found the content of the textbooks to be inadequate and difficult. Regarding the learning-teaching experiences dimension, it was found that they considered the time allocated for the learning-teaching process insufficient and felt that the activities remained too abstract. Regarding the assessment and evaluation aspect, it was found that teachers view the inclusion of process-based assessment and the monitoring of student development in the curriculum positively; however, they experience difficulties in implementing these assessment practices in overcrowded classrooms. Teachers offered suggestions such as proper time management and reducing class sizes to ensure the effective implementation of the curriculum.

Keywords: Century of Türkiye Education Model (TYMM), Secondary School Mathematics Curriculum, 5th Grade Mathematics, Teacher Views, Curriculum Evaluation.

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNDE SANAL GERÇEKLİK TEKNOLOJİSİNİN KULLANIMI: BİR LİTERATÜR İNCELEMESİ

Dr. Yasemin ARI KOVANCI

Karamanoğlu Mehmetbey University, Faculty of Health Sciences, Department of Social Work, Karaman, Türkiye. **ORCID ID:** 0000-0002-2730-6216

ÖZET

İşyerlerinde meydana gelen iş kazaları ve yaralanmaların önemli bir bölümü çalışanların güvensiz davranışlarıyla ilişkilendirilmektedir. İş sağlığı ve güvenliği (İSG) eğitimi, çalışanların çalışma ortamında karşılaşabilecekleri sağlık ve güvenlik risklerini tanımaları, güvenli davranışlar sergilemeleri ve iş kazalarının önlenmesi açısından önemli bir role sahiptir. Günümüzde teknolojik gelişmelerle birlikte geleneksel eğitim yöntemlerinin yanı sıra, sanal gerçeklik teknolojisinin de İSG eğitimlerinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmanın amacı, sanal gerçeklik teknolojisinin İSG eğitimlerinde kullanımının sağladığı katkıları incelemektir. Araştırma, konuya ilişkin kuramsal ve ampirik çalışmaların değerlendirilmesine dayanan bir literatür incelemesi niteliğindedir. Literatür bulguları, sanal gerçeklik tabanlı İSG eğitimlerinin, çalışanların gerçek çalışma ortamlarında karşılaşabilecekleri tehlikeli durumları simüle edilmiş ortamlarda risk almadan deneyimlemelerine olanak sağladığını göstermektedir. Çalışanlara gerçekçi bir deneyim sunan bu eğitimlerin, risk farkındalığının geliştirilmesine ve güvenli davranışların pekiştirilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Sanal gerçeklik teknolojisinin sunduğu öğrenme ortamının, İSG eğitimlerinde daha etkili ve kalıcı öğrenmenin sağlanmasına da katkıda bulunduğu görülmektedir. Bu bağlamda, sanal gerçeklik teknolojisinin İSG eğitimlerinin etkinliğini artırabilecek bir eğitim aracı olduğu, sanal gerçeklik tabanlı İSG eğitimlerinin geleneksel eğitim yöntemlerini destekleyici ve tamamlayıcı nitelik taşıdığı ve bu eğitimlerin çalışanların sağlık ve güvenliğinin korunmasına katkı sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, sanal gerçeklik, iş sağlığı ve güvenliği eğitimi, güvenli davranış, risk farkındalığı

THE USE OF VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY IN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY TRAINING: A LITERATURE REVIEW

ABSTRACT

A substantial proportion of occupational accidents and injuries in workplaces are associated with unsafe worker behaviors. Occupational health and safety (OHS) training plays an important role in enabling workers to recognize health and safety risks in the workplace, adopt safety behaviors, and prevent occupational accidents. Alongside traditional training methods, the use of virtual reality (VR) technology in OHS training has become increasingly widespread with technological advances. This study aims to examine the contributions of VR technology to OHS training. The study is a literature review of relevant theoretical and empirical research. The literature findings show that VR-based OHS training enables workers to experience hazardous situations they may encounter in real work environments within simulated settings without being exposed to actual risks. By providing realistic experiences, such training contributes to developing risk awareness and reinforcing safety behaviors. The learning environment provided by VR technology has also been found to contribute to more effective and sustained learning in OHS training. In this context, it was concluded that VR technology may enhance the effectiveness of OHS training, that VR-based OHS training can support and complement traditional training methods, and that such training may contribute to protecting workers' health and safety.

Keywords: Occupational health and safety, virtual reality, occupational health and safety training, safety behavior, risk awareness

YÜKSEK RİSKLİ SEKTÖRLERDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ: İŞ KAZALARI VE MESLEK HASTALIKLARI AÇISINDAN BİR DEĞERLENDİRME

Dr. Yasemin ARI KOVANCI

Karamanoğlu Mehmetbey University, Faculty of Health Sciences, Department of Social Work, Karaman, Türkiye. **ORCID ID:** 0000-0002-2730-6216

ÖZET

İş sağlığı ve güvenliği, çalışanların sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamına sahip olmalarını ve iş kazaları ve meslek hastalıklarına karşı korunmalarını amaçlamaktadır. İş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenebilmesi için bunlara yol açan risk faktörlerinin belirlenmesi, özellikle iş kazaları ve meslek hastalıklarının yüksek oranlarda görüldüğü madencilik, inşaat ve metal gibi sektörlerde büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda çalışma, yüksek riskli sektörler arasında yer alan madencilik, inşaat ve metal sektörlerinde iş kazaları ve meslek hastalıkları açısından öne çıkan risk faktörlerini ulusal ve uluslararası literatür üzerinden incelemeyi amaçlamaktadır. Literatür bulguları, söz konusu sektörlerde iş kazaları ve yaralanmalarla ilişkili risk faktörleri arasında çalışanların güvensiz davranışları, makine ve ekipman kullanımıyla ilişkili tehlikeler, kişisel koruyucu donanımın kullanılmaması veya yetersiz kullanımı, iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin yetersizliği, çalışma ortamından kaynaklanan tehlikeler ve yetersiz güvenlik önlemlerinin öne çıktığını göstermektedir. Ayrıca, meslek hastalıkları açısından toz, duman ve kimyasal maddelere maruziyet, gürültü ve titreşim gibi fiziksel etkenler ile ağır fiziksel iş yükü, tekrarlayıcı hareketler ve uygunsuz çalışma duruşları gibi ergonomik risklerin önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, yüksek riskli sektörlerde emek yoğun ve tehlikeli çalışma ortamlarının iş kazaları ve meslek hastalıkları açısından kendine özgü önemli riskler barındırdığı ve bu risklerin ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesine yönelik sektöre özgü ve etkili iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının geliştirilmesinin elzem olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, iş kazaları, meslek hastalıkları, yüksek riskli sektörler

OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN HIGH-RISK SECTORS: AN ASSESSMENT WITH RESPECT TO OCCUPATIONAL ACCIDENTS AND DISEASES

ABSTRACT

Occupational health and safety aims to ensure healthy and safe working environments and to protect workers from occupational accidents and diseases. Identifying the risk factors that contribute to occupational accidents and diseases is particularly important in sectors such as mining, construction, and metal, where these outcomes occur at relatively high rates. In this context, the study aims to examine, through the national and international literature, the major risk factors for occupational accidents and diseases in the mining, construction, and metal sectors, which are among the high-risk sectors. The literature findings show that, among the risk factors associated with occupational accidents and injuries in these sectors, unsafe worker behaviors, hazards associated with the use of machinery and equipment, non-use or inadequate use of personal protective equipment, inadequate occupational health and safety training, hazards arising from the working environment, and inadequate safety measures stand out. The literature further indicates that, with regard to occupational diseases, exposure to dust, fumes, and chemicals, physical factors such as noise and vibration, and ergonomic risks such as heavy physical workloads, repetitive movements, and awkward postures are important. In conclusion, labor-intensive and hazardous working environments in high-risk sectors pose distinct and significant risks in terms of occupational accidents and diseases, and it is essential to develop effective, sector-specific occupational health and safety practices aimed at eliminating or minimizing these risks.

Keywords: Occupational health and safety, occupational accidents, occupational diseases, high-risk sectors

PROBLEMS OF ENHANCING THE COMPETITIVENESS OF INDUSTRY

Ph.D. in Economics Gulbaniz Aliyeva Tofig

Lankaran State University, Baku, Azerbaijan

ORCID ID: 0000-0002-1539-8926

ABSTRACT

The reconfiguration of global value chains, the acceleration of technological transformation and the tightening of environmental regulatio

n have renewed the salience of industrial competitiveness. In contemporary economic development theory the concept is treated as a multidimensional category measured not merely by price advantage but by the aggregate of productivity, technological sophistication, institutional quality and sustainability indicators. The purpose of this study is to systematise the structural, technological and institutional problems that constrain the enhancement of industrial competitiveness in resource-based economies, with particular reference to Azerbaijan, and to substantiate policy directions for addressing them. The study employs a comparative-analytical approach, statistical analysis and assessment methods based on revealed comparative advantage and economic complexity indicators, drawing on national statistics and the databases of the United Nations Industrial Development Organization and the World Bank. The analysis classifies the binding constraints into seven groups: the predominance of the extractive sector in industrial output, the negligible share of research and development expenditure in gross domestic product, the skills mismatch between the education system and the labour market, the high energy intensity of production, limited access to long-term finance, weak cluster and subcontracting linkages, and gaps in the international recognition of the national quality infrastructure. New regulatory regimes such as the carbon border adjustment mechanism place additional pressure on traditional export advantages. The paper substantiates as priority directions the formation of a productivity-oriented industrial policy in manufacturing, the financing of the innovation ecosystem, the introduction of a dual vocational training model, the alignment of the quality infrastructure with international standards, the institutionalisation of cluster initiatives and the integration of the decarbonisation agenda into industrial policy.

Keywords: Perlite, rare earth element, enrichment factor, EDXRF

STRENGTHENING FACULTY PROFESSIONAL DEVELOPMENT IN PAKISTANI HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS: EXAMINING THE ROLE OF LEADERSHIP

Dr Irfan Bashir

Ms. Fareeha Sherazi

Dr Afshan Naseem

Dr Yasira Waqar

Dr Abdul Malik

Dr Fariha Gul

Dr Almas Shoiab

Dr Aisha Sami

Dr Aqila Rafiq

Dr Farhat Munir

Dept of Education, University of Management and Technology, Pakistan

Abstract

In order to fully understand the all domains of Instructional Leadership, Professional Development plays a pivotal role. This quantitative survey research aimed to investigate the role of University COD in promoting professional development of faculty. The Research questions: What is the role of CODs in promoting teaching and learning in universities? What are the opinions of faculty about the role of their CODs to promote their professional development? The researchers used close-ended set of questions and used Likert Scale. Population consisted of CODs and Faculty members of two universities of Lahore. Using convenient sampling technique, the researcher selected 10 CODs and 20 Faculty members of Private University and 10 CODs and 20 Faculty members of Private University as sample. To analyze the data SPSS was used to apply t-tests. The findings show that there is no statistical differences in the opinion between CODs and faculty members. It is concluded that University CODs role as leader is very important to promote professional development and enhancing teaching and learning of faculty and students.

Keywords: leadership, professional development, faculty development, higher education,

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.

EXPLORING ARCHITECTURAL ORNAMENTATION OF MUGHAL ERA BUILDINGS OF LAHORE IN THE ERA OF CLIMATE CHANGE CHALLENGES.

1) **Ar. Dr. Omer Shujat Bhatti**, Associate Professor & COD, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.

2) **Ar. Faiqa Khan,** Associate Professor, Lahore Leads University, Lahore, Pakistan.

3) **Ar. Saad Mujahid,** Associate Professor, Dept. of Architecture, School of Architecture & Planning, UMT, Lahore, Pakistan.

4) **Prof. Dr. Muhammad Asad Ghufran**, Professor, IIUI, Islamabad.

ABSTRACT

The adornment of the structures serves a central purpose of making the unforgettable image more pronounced. To identify and analyze the architectural embellishments of the Mughal Era and their present context, development and position. Cultural imagery during the Mughal Era in Lahore (16th-18th century) was flourishing illuminating modern architectural styles that accentuated beauty in structures. This ornamentation is a combination of Islamic Persian and Indian art, which specializes the Mughal architecture. This research centres on Mughal ornamentation techniques, structure and decorative materials in particular used for the Buildings of Lahore. This particular study used the qualitative research design, incorporating archival research, site observation and visual material evaluation to assess the architectural decoration of the Mughal Era buildings found in Lahore. For this study, 3 building samples were picked out for study. The researcher used photographs, sketches and field notes to collect data and thematic analysis was conducted to analyze that data. The findings of the study highlighted the unique and beautiful features of the buildings in Lahore that belong in the Mughal Era, from detailed marble inlay, profusely carved sandstone and marble, decorative tileworks to gaudy gold works. Further, the findings brought out the implied meanings and relevance of these decorative elements which showcase the artistic and cultural level of the Mughal Empire. Further, this study has focused on the preservation as well as restoration of the Mughal Era buildings in Lahore, mostly concentrating on enhancing and recovering the decorative elements of the structures. Additionally, it can be deduced from the findings that there is a need to formulate and implement culture-based tourism programs that seek to create awareness and appreciation of Mughal architecture and its relevance to the historical narrative of the city of Lahore. Lastly, the study also proposes additional investigations on how Mughal ornamentation can be utilized in detail, particularly with regard to the built environment, and what its cultural and artistic values are.

Keywords: Mughal Architecture, Lahore, Architectural Ornamentation, Wazir Khan Mosque, Lahore Tomb.

GLOBAL LEGISLATION FOR THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE: TOWARDS A UNIVERSAL LEGAL FRAMEWORK

PhD Roxana Mihaela Moisoiu

U.S.P.E.E. „C. Stere" Chișinău, Moldova

ID orcid 0009-0005-0515-0432

Prof Colegiul German Goethe

București, România

UDC - 004.8:343.98:34

JEL 14

Abstract

The rapid development and widespread use of Artificial Intelligence (AI) have created unprecedented opportunities for technological, economic and social progress, while simultaneously generating complex legal, ethical and security challenges. The global nature of AI technologies increasingly exceeds the capacity of purely national legal systems to regulate their development and use effectively. Differences between national regulatory frameworks may create legal fragmentation, uncertainty regarding responsibility and significant disparities in the protection of fundamental rights. Consequently, the need for a coherent and internationally coordinated legal framework for Artificial Intelligence has become one of the major challenges of contemporary law.

This article examines the necessity and feasibility of developing a global legal framework governing the design, development, deployment and use of Artificial Intelligence. The study analyses the principal legal challenges associated with AI, including the protection of fundamental rights, privacy and personal data, algorithmic discrimination, transparency, accountability, intellectual property, human oversight and liability for AI-related decisions and harm. Particular attention is given to the difficulties created by the cross-border nature of AI systems and the growing differences between national and regional regulatory approaches.

The research argues that the existing international legal architecture remains fragmented and insufficiently adapted to the rapid evolution of AI technologies. Although significant initiatives have emerged at international and regional levels, including the OECD AI Principles, the United Nations' efforts towards global AI governance and the Council of Europe's legally binding framework on AI and human rights, the current regulatory landscape does not yet constitute a universal legal regime.

The article proposes the development of a Universal Framework for Artificial Intelligence, based on common minimum legal standards applicable across jurisdictions. Such a framework should establish fundamental principles concerning human dignity, human rights, transparency, accountability, safety, non-discrimination, human oversight and responsibility, while allowing states sufficient flexibility to adapt these principles to their specific legal and institutional systems.

The study concludes that global AI legislation should not seek to eliminate national regulatory differences, but rather establish a common legal foundation capable of ensuring interoperability between legal systems. International cooperation is essential to prevent regulatory fragmentation, protect individuals and societies, and ensure that technological innovation remains compatible with the principles of democracy, human rights and the rule of law. The emergence of global AI governance represents not merely a technological necessity, but a fundamental challenge for the future development of international law.

Keywords: Artificial Intelligence; global legislation; AI governance; international law; legal harmonisation; human rights; accountability; AI regulation; technological governance; rule of law.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE DIGITAL ECONOMY

Marijana Zimonjic[1]

Aleksandra Čadjenović[2]

Abstract

The rapid development of the digital economy and the increasingly intensive application of artificial intelligence (AI) are transforming business processes, decision-making, and resource management, creating new opportunities for achieving sustainable development goals. Through the processing of large volumes of data, business process automation, predictive analytics, and resource optimization, artificial intelligence can contribute significantly to improving economic efficiency, environmental protection, and the development of innovative business models. The aim of this paper is to analyze the potential applications of artificial intelligence in support of sustainable development within the digital economy, with particular emphasis on its contribution to sustainable business practices and enterprise competitiveness. The paper examines key areas of AI application, including resource optimization, process automation, reduction of operational costs, energy management, predictive maintenance, and support for business decision-making. Particular attention is devoted to the potential economic, environmental, and social effects of AI adoption, as well as the challenges that may limit its wider implementation, including high implementation costs, energy consumption, data protection, cybersecurity, shortage of qualified personnel, and ethical considerations. The analysis indicates that the responsible and strategically oriented application of artificial intelligence can represent an important instrument for improving the sustainability and resilience of business systems. It is concluded that the further development of the digital economy requires the alignment of technological innovation with the economic, environmental, and social principles of sustainable development.

Keywords: artificial intelligence, digital economy, sustainable development, digital transformation, sustainable business, innovation, competitiven

[1]Marijana Zimonjić, Academy of Applied Studies Politehnika, Belgrade, Serbia, orcid.org/0009-0005-6323-0393
[2] Aleksandra Cadjenovic, Megatrend university, orcid.org/0009-0002-5595-6299

APPLICATION OF CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES FOR SUSTAINABLE BUSINESS OPERATIONS AND ENTERPRISE DEVELOPMENT

Aleksandra Čadjenović[3]

Abstract

The circular economy represents a contemporary approach to economic development aimed at reducing the consumption of natural resources, minimizing waste generation, and extending the life cycle of products, materials, and resources. In contrast to the traditional linear business model based on the principle of "take–make–dispose," the circular model promotes more efficient resource utilization, reuse, recycling, repair, and the development of innovative business models. The aim of this paper is to analyze the significance and potential of applying circular economy principles to improve sustainable business operations and the long-term development of enterprises. Particular attention is devoted to the relationship between circular business practices and economic efficiency, environmental protection, innovation, and enterprise competitiveness. The paper examines the key principles and models of the circular economy, as well as the main benefits and challenges that enterprises face when implementing them. The analysis indicates that the application of circular principles can contribute to more rational resource utilization, cost reduction, waste minimization, improved innovation capabilities, and the creation of long-term sustainable competitive advantages. At the same time, a successful transition toward circular business requires appropriate institutional and regulatory support, investment in technology and infrastructure, the development of new business models, as well as changes in organizational culture and consumer behavior. It is concluded that the circular economy represents significant potential for aligning the economic objectives of enterprises with the principles of sustainable development and for creating more resilient and long-term sustainable business systems.

Keywords: circular economy, sustainable business, sustainable development, enterprises, resource efficiency, innovation, competitiveness.

[3] Aleksandra Cadjenovic, Megatrend university, orcid.org/0009-0002-5595-6299

THE LEGAL SYSTEM IN THE AGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

PhD Roxana Mihaela Moisoiu

U.S.P.E.E. „C. Stere" Chișinău, Moldova

ID orcid 0009-0005-0515-0432

Prof Colegiul German Goethe

București, România

UDC - 004.8:343.98:34

DOI: to be assigned

JEL 14

Abstract

The rapid development of Artificial Intelligence (AI) is transforming contemporary society and generating profound changes in the functioning of legal systems. AI technologies are increasingly used in judicial administration, legal research, decision-support systems, law enforcement, public administration, and the management of large volumes of legal information. At the same time, their rapid expansion raises complex questions concerning legality, accountability, transparency, fundamental rights, privacy, non-discrimination, and the protection of human autonomy.

This paper examines the relationship between Artificial Intelligence and the legal system, focusing on the challenges generated by the increasing integration of algorithmic technologies into legal and institutional processes.

Particular attention is given to the capacity of traditional legal principles to respond to decisions influenced or generated by AI systems, especially where automated or semi-automated processes may affect individuals' rights and legitimate interests.

The analysis also addresses the emergence of new forms of legal responsibility associated with AI, including questions concerning liability for algorithmic errors, discriminatory outcomes, inadequate data, and decisions produced without sufficient human oversight. Furthermore, the paper explores the importance of transparency and explainability as essential requirements for maintaining public trust in AI-assisted legal processes.

The research employs an interdisciplinary and comparative methodology, combining legal, doctrinal, conceptual, and analytical approaches.

First, a documentary and doctrinal analysis is conducted in order to examine relevant legislation, regulatory instruments, judicial principles, academic literature, and institutional documents concerning Artificial Intelligence and its relationship with law.

Second, a comparative legal analysis is used to identify similarities and differences between national, European, and international approaches to AI regulation. Particular consideration is given to emerging European regulatory frameworks and to international principles concerning trustworthy, human-centred, and responsible AI.

Third, the study applies a normative-analytical method to assess whether existing legal principles and liability mechanisms are capable of addressing AI-related risks. The analysis focuses on transparency, explainability, human oversight, accountability, data protection, non-discrimination, and access to effective legal remedies.

A case-study approach is also employed to examine representative situations in which AI systems may influence legal or administrative decisions. These cases are analysed in order to identify potential conflicts between technological efficiency and procedural guarantees.

Finally, the research adopts an interdisciplinary perspective, bringing together elements of law, technology, ethics, human rights, criminology, and public policy. This approach enables the identification of both opportunities and vulnerabilities associated with the integration of AI into contemporary legal systems.

From a comparative and interdisciplinary perspective, the study considers the interaction between national legislation, European regulatory developments, and broader international efforts to establish common principles for the responsible use of AI.

The paper argues that the digital transformation of the legal system requires not merely technological adaptation, but a fundamental reconsideration of the relationship between law, technology, human rights, and institutional responsibility.

The study concludes that Artificial Intelligence should function as an instrument supporting the legal system rather than replacing the fundamental role of human judgment. A future-oriented legal framework must therefore combine technological innovation with effective safeguards for fundamental rights, democratic values, transparency, and the rule of law.

Keywords: Artificial Intelligence, legal system, law, fundamental rights, algorithmic decision-making, liability, transparency, rule of law, digital transformation.

ARCHAEOLOGICAL EVIDENCE OF EARLY ISLAMIC CAMPAIGNS: THE BATTLE OF DUMAT AL-JANDAL NEAR WADI AL-SIRHAN / JORDANIAN TERRITORY

Mohammed Waheeb

of Archaeology, The Hashemite University, Department of Sustainable Tourism, Queen Rania Faculty Heritage, Tourism

Abstract:

This study highlights the spatial and geographical dimensions of the Battle of Dumat al-Jandal within the trajectory of early Islamic campaigns and expeditions directed toward the Levant during the era of Prophet Muhammad ﷺ. It focuses specifically on the field operations extending into the geographical boundaries of eastern Jordan, particularly along the corridors of Wadi al-Sirhan and its adjacent areas. The paper originates from the strategic decision to dispatch commander Khalid ibn al-Walid at the head of a military campaign toward Dumat al-Jandal a vital commercial and transport hub linking the northern Hijaz with eastern Jordan and southern Syria aimed at securing the northern frontiers of the nascent Islamic state and safeguarding trade and diplomatic routes.

The paper investigates the tactical execution of the battle, demonstrating that military engagements were not confined solely to the central fortress of Dumat al-Jandal. Following the victory of the Muslim forces, the retreating enemy forces fled north and northwest toward Wadi al-Sirhan and the eastern Jordanian desert. This tactical retreat prompted Khalid ibn al-Walid to pursue these remnants deep into the territory that constitutes modern Jordan.

By employing an integrated methodology combining critical textual analysis of early historical sources, topodetail military geography, and spatial mapping of ancient movement routes along the Wadi al-Sirhan network, this study reassesses the spatial scope of early Islamic campaigns. The paper concludes that Jordanian territory hosted key elements of these military operations, either in full or in critical regional phases, underscoring Jordan's strategic importance as an active battlefield and crucial gateway during the initial establishment of the Islamic presence in the Levant.

The geography of the southern Levant particularly the arid and semi-arid zones spanning eastern Jordan and Wadi al-Sirhan served as a crucial tactical region in the history of early Islamic movements and military campaigns. From the early days of the prophetic era in Medina, the political and military leadership recognized that securing the nascent state's northern frontiers and expanding the call of Islam required controlling strategic corridors and land route hubs linking the Arabian Peninsula with the Levant. Within this context, extending from the late prophetic period to the dawn of the Rashidun Caliphate, Dumat al-Jandal and Wadi al-Sirhan emerged as pivotal geopolitical and military axes. Prophet Muhammad ﷺ dispatched commander Khalid ibn al-Walid to this region to subdue local forces and Byzantine-aligned tribes, thereby securing the northern frontier corridor.

This introduction highlights the central research problem regarding the actual spatial scope of early Islamic battles. The Battle of Dumat al-Jandal is often confined to narrow regional boundaries based solely on the site's primary name; however, topographical data and military movement corridors indicate that the battle was not an isolated, static event, but rather a dynamic, wide-ranging operation. Following Khalid ibn al-Walid's victory over enemy forces and the breach of their fortifications, the defeated remnants retreated along the natural geographical corridor of Wadi al-Sirhan toward the north and northwest areas that fall directly within the historical and geographical boundaries of modern-day Jordan.

Accordingly, this study provides a spatial analysis and scholarly re-examination of the Battle of Dumat al-Jandal and the subsequent pursuit of retreating forces. It demonstrates that Jordanian territory was not merely a passive transit corridor for army movements, but an active battlefield hosting core field operation of early Islamic campaigns. The significance of this research lies in its integration of early

textual narratives with spatial analysis of ancient movement corridors, enriching the academic historiography of early Islamic military history on Jordanian soil.

Conclusion: In conclusion, this study demonstrates that the Battle of Dumat al-Jandal and its subsequent military operations extended beyond a localized engagement, reaching deep into the geographical boundaries of modern-day Jordan via the natural corridor of Wadi al-Sirhan. The tactical retreat of the opposing forces toward the north and northwest, followed by Khalid ibn al-Walid's swift pursuit, confirms that Jordanian territory served as an active and integral battlefield during the early Islamic campaigns authorized from Medina. By integrating early narrative sources with spatial analysis of ancient movement routes, the paper proves that the early Islamic state's military footprint in the Levant was broadly embedded across the Jordanian landscape, either in full or in critical regional phases. Ultimately, the study underscores the necessity of adopting an integrated geo-archaeological and spatial framework to re-evaluate early Islamic battlefields, recommending further field surveys and spatial mapping along the Jordanian borderlands of Wadi al-Sirhan to uncover additional physical context regarding these pivotal military movements.

Keywords: Battle of Dumat al-Jandal; Wadi al-Sirhan; Khalid ibn al-Walid; Early Islamic Campaigns; Jordanian Military Geography; Levant Frontier.

CHARACTERIZATION OF BEE VENOM PROTEINS USING SDS-PAGE ELECTROPHORESIS

Assistant Professor, Shahjahan A. S.

Gopinathrao Munde National Institute of Rural Development and Research,

Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University,

Chhatrapati Sambhajinagar (Aurangabad), Maharashtra, India.

ABSTRACT

From ancient time honey and honey bee products, including royal jelly and bee venom, has emerged as a promising complementary approach in the treatment of various human diseases, including cancer. Among its components, bee venom particularly the peptide melittin has demonstrated potent anticancer properties in preclinical studies. Melittin has been shown to induce apoptosis, inhibit tumor cell proliferation, and suppress metastasis in a range of cancer cell types, including breast, lung, ovarian, and leukemia. Additionally, bee venom has been shown to modulate gut microbiota treatments and enhance gut barrier function, suggesting it's potential in treating gastrointestinal disorder. In this study, used SDS-PAGE to identify and characterize the protein components of bee venom. Different bands were analyzed to determine the protein types present in the venom. Findings provide insights into the protein composition of bee venom and its potential therapeutic applications.

Keywords: Bee venom, SDS-PAGE, melittin, Gut microbiota, protein characterization.

COMPARATIVE STUDY OF THE PHYTOCHEMICAL COMPOSITION OF *FUMARIA PARVIFLORA* FROM CASABLANCA, EL JADIDA AND KHOURIBGA OF MOROCCO

Salma MAKDOUF[1], Karima El Bouqdaoui[12], Abdelhakim El Makssoudi[3], Mounia Cherki[1]

[1]. Laboratory of Health and Environment, Faculty of Sciences Ain Chok, Hassan II University of Casablanca (Morocco)

[2]. Laboratory of Care, Health and Sustainable Development, Higher Institute of Nursing and Health Techniques, Casablanca (Morocco)

[3]. Laboratory of Organic Synthesis, Extraction and Valorization (LSOEV), Ain Chok, Hassan II University of Casablanca (Morocco)

Abstract

Species of the *Fumaria* genus are medicinal plants known for their anti-inflammatory, antioxidant, and antidiabetic effects. Our species, *Fumaria parviflora*, locally known under different names, is a green, herbaceous, annual plant that grows in wheat fields, plains, and low hills. It is a ubiquitous species that can be found in Europe, Africa, America, Australia, and especially in high prevalence in India, Pakistan, and Iran.

In traditional medicine, this species has been used to treat numerous diseases and infections such as diabetes, digestive disorders, eczema, burns, fever, flu, headaches and toothaches, poisoning, hepatobiliary dysfunction, blood disorders, urinary diseases, and male infertility.

Despite these remarkable therapeutic potentials, few scientific studies have aimed to evaluate its biological activities. Hence, the objective of our research is to carry out a comparative study of the phytochemical composition of *F. parviflora* harvested from three different Moroccan regions (Casablanca, El Jadida, and Khouribga).

Lipids, carbohydrates, proteins, minerals, and pigments were determined using standard methods. Secondary metabolites were assessed through screening techniques. Our results showed that the chemical composition varies depending on the harvesting region, with the Casablanca sample being particularly rich in polyphenols.

Thus, we can conclude that the environmental conditions of each region influence the chemical composition of this plant.

Keywords: *Fumaria*; chemical composition; harvesting region; comparative study.

PRESENCE AND ROLE OF CHABERTIA OVINA IN PATHOLOGY OF SHEEP AND GOATS IN SERBIA

Academician Prof Dr Ivan PAVLOVIĆ

Scientific Institute of Veterinary Medicine of Serbia, Belgrade, Serbia

ORCID ID: 0000-0003-4751-6760

ABSTRACT

Chabertia ovina, known as the large-mouthed bowel worm, is parasitic nematode that infects the colon of sheep, goats, and occasionally cattle. It is found worldwide but is more frequent in temperate regions. During fifteen years of research the parasitic fauna of small ruminants in Serbia *C.ovina* was established in all regions of the country. The average prevalence of infection in sheep ranged from 16.72%-39.76% and 29.57-44.14% in goats. The life cycles of *C.ovina* are direct. Adult female parasites in the GI tract produce eggs that are passed out with the faeces of the animal. The development, survival and transmission of the free-living stages of nematode parasites are influenced by micro-climatic factors within the faecal pellets and herbage. These include sunlight, temperature, rainfall, humidity and soil moisture. At climate condition which are present in examined areas, parasites eggs hatching within 17 h at 36°C or 24 h at 26°C. The L_1 feeds in the feces and molts to the L_2 in ~36 h.[4] The L_2 molts to the infective, ensheathed L_3 in 5–7 days. The first occurrence of *C.ovina* in our climate condition are usually in May. The infective larvae are ingested by grazing animals, and either attach to the mucosa of the colon or penetrate the mucosa causing petechial hemorrhages. They remain in the mucosa for only a short period of time and being found in the lumen. They molt to the L_4 in and to immature adults. The major pathological effect of infection is due to the L_3 and adults ingesting plugs of mucosa and causing local bleeding and protein loss. Infected small ruminants are unthrifty, and their feces are soft, contain mucus, and may be streaked with blood. Immunity develops quickly, and outbreaks occur only in young animals or under conditions of severe stress.

Keywords: small ruminant, *Chabertia ovina*, pathology

SUSTAINABLE AGRICULTURAL BIOMASS FOR NATURAL FIBRE, DYEING, AND CIRCULAR TEXTILE APPLICATIONS

Jyoti Rani [1*]

[1] Assistant Professor, Parul Institute of Design, Parul University, vadodara, Gujarat, India; ORCID ID https://org/0000-0002-5577-7808

Abstract

The growing demand for sustainable materials has created new opportunities to transform agricultural biomass and agro-residues into value-added resources for the textile and fashion industries. Agricultural activities generate substantial quantities of residues such as leaves, stems, husks, fruit peels, seeds, and other plant-based materials, which are often underutilized or disposed of through environmentally harmful practices. This paper explores the potential of agricultural biomass as a sustainable source of natural fibres, bio-based colourants, functional agents, and other textile-related materials within a circular economy framework. Plant-based residues can provide renewable alternatives to conventional synthetic resources while simultaneously creating additional value for agricultural communities.

The study discusses the application of selected agricultural and plant-derived resources for natural dyeing, textile coloration, antimicrobial functionality, and sustainable surface development. Particular attention is given to the extraction of bioactive and colour-producing compounds through environmentally responsible techniques, including aqueous and other low-impact extraction approaches. The role of natural mordants and bio-based finishing agents in improving colour performance and functional properties is also considered. Furthermore, the study highlights opportunities for integrating agricultural waste valorization with textile production to reduce resource consumption, minimize waste, and promote closed-loop material systems.

The proposed approach demonstrates how collaboration between agriculture, textile science, design, and emerging technologies can contribute to sustainable innovation. Valorization of agricultural residues can potentially generate new livelihood opportunities, support rural entrepreneurship, reduce waste-management challenges, and encourage the development of biodegradable and renewable textile materials. The paper also identifies challenges related to raw-material consistency, extraction efficiency, colour fastness, scalability, standardization, and commercialization. Overall, the research emphasizes the importance of interdisciplinary approaches for converting agricultural resources into sustainable textile solutions and strengthening the connection between agricultural production and circular industrial development.

Keywords: Agricultural biomass, agro-waste valorization, natural dyes, natural fibres, sustainable textiles, circular economy, textile innovation, bio-based materials

PHYTOCHEMICAL AND ANTI-NUTRIENT COMPOSITION OF DRIED RHIZOME OF ALLIUM SATIVUM OBTAINED FROM AKWA IBOM STATE, NIGERIA.

By

Enobong Inwang Ekpo

Akwa Ibom State Polytechnic, Nigeria

ABSTRACT

This study investigated the phytochemical and anti-nutrient composition of the dried rhizome of *Allium sativum* (garlic) obtained from Akwa Ibom State, Nigeria. The study was carried out to determine the bioactive phytochemicals and selected anti-nutritional factors present in the plant material. Fresh *Allium sativum* rhizomes were obtained from a local market in Akwa Ibom State, washed, air-dried, pulverized, and subjected to standard laboratory procedures for phytochemical and anti-nutrient analyses. Qualitative phytochemical screening was carried out to determine the presence of major secondary metabolites, while quantitative analyses were conducted to estimate the concentrations of the identified phytochemicals and anti-nutrients. The phytochemical screening revealed the presence of bioactive compounds including alkaloids, flavonoids, tannins, saponins, phenols, terpenoids and glycosides, although their concentrations varied among the compounds analysed. Selected anti-nutrients, including phytate, oxalate, tannin and cyanogenic compounds, were also detected at varying concentrations. The presence of these phytochemicals suggests that *Allium sativum* may possess considerable antioxidant, antimicrobial and other pharmacological properties, while the relatively low levels of anti-nutrients may have limited effects on nutrient utilization when consumed in appropriate quantities. The findings provide useful information on the phytochemical constituents and anti-nutritional profile of *Allium sativum* obtained from Akwa Ibom State and further support its potential nutritional and medicinal importance.

Keywords: *Allium sativum*, garlic, phytochemicals, anti-nutrients, bioactive compounds, Akwa Ibom State, Nigeria.

WASTE TO RESOURCE APPROACH: VALORIZATION OF FISH PROCESSING WASTE FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL APPLICATION

Madhumitha P[1]

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Liberal Arts and Business Studies (FLABS), SRM Institute of Science and Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu,India.

Murugesan Kamaraj[2]

[2]Department of Biotechnology, Faculty of Liberal Arts and Business Studies (FLABS), SRM Institute of Science and Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu,India.

[2]ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0111-8524

ABSTRACT

Fish processing generates significant quantities of organic by-products, particularly viscera, skin, bones, scales and other processing residues. Their improper disposal can cause environmental pollution, nutrient loss and waste-management challenges. These residues contain valuable organic matter, proteins, minerals and other nutrients that can be recovered and transformed into useful agricultural resources. Biochar produced from fish-processing residues possesses a porous carbonaceous structure and functional groups that may support nutrient retention, soil conditioning and could be applied as soil amendments or functional materials for managing contaminants in agricultural water and soil systems. This review summarizes waste management, resource recovery and agricultural sustainability within a circular bio-economy framework. Converting fish-processing residues into agricultural resources can reduce the environmental burden associated with disposal while recovering valuable nutrients and carbon. It may also provide an alternative source of locally available, low-cost materials for improving soil quality and supporting sustainable agricultural practices.

Keywords: Fish processing waste; circular bio-economy; sustainable agriculture; soil amendment; resource recovery.

EXTRACTION AND COLOUR STABILITY OF PIGMENT FROM TURMERIC AT VARYING TEMPERATURES AND pH AND ITS ACCEPTABILITY AS COOKIES COLORANT

1 PRINCEWILL-OGBONNA, Ijeoma Lawretta

1Michael Okpara University of Agriculture, Umudike, Abia State, Nigeria

ORCID ID:https://orcid.org 0000-0002-6226-5966

2 AGWU, Samuel Chimaobi

Michael Okpara University of Agriculture, Umudike, Abia State, Nigeria

ORCID ID:https://orcid.org 0009-0006-6070-7018

Abstract

This research examined turmeric (*Curcuma longa*) as a natural replacement for synthetic food colourants. Two solvents, water and ethanol were used to extract pigments from turmeric rhizome powder. The pigments extracted were tested for colour stability across different temperatures (25°C 40°C, 60°C and 80°C) and pH levels (3,5,7). Both extraction methods successfully recovered yellow pigments from turmeric. Ethanolic extraction produced higher concentrations of curcumin, the primary colour compound in tumeric. The pH stability testing revealed that both extracts maintained strong colour intensity under acidic conditions, 100% and 80% stability at pH 3 and 5 respectively. The aqueous extracts showed higher colour retention when heated to 60°C, whereas the ethanolic extracts retained more colour at higher temperatures. Both extacts were used as colourants for the production of cookies. Sensory evaluation demonstrated that all cookie samples produced with turmeric colourant were accepted by the panlist, with samples containing 3% ethanol extract having overall acceptability rating of 7.14. These results indicate that turmeric extracts represent viable alternatives to artificial yellow dyes in bakery products for manufacturers targeting consumers seeking clean-label foods with natural ingredients

Keywords: turmeric. Colour, stability. pH. Temperature, cookies

APPLICATION OF ORGANIC PLANT EXTRACTS FOR LETTUCE GROWTH AND YIELD IN ALKALINE SOIL

Associate Prof. Dr. Rabia Ghaffar[1],

[1]University of Education, Division of Science & Technology, Department of Botany, Lahore, Pakistan.

[1]ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5991-8893

Hira Mehboob[2]

[2]University of Education, Division of Science & Technology, Department of Botany, Lahore, Pakistan.

Abstract

Fruit peel wastes are known to contain nutrients, phenolic compounds, antioxidants, and other biologically active substances that may stimulate plant growth. Therefore, conversion of fruit-peel waste into plant-based biostimulants represents a potentially low-cost and environmentally friendly strategy that can address organic waste management, improve crop productivity under stress conditions, and reduce dependence on synthetic fertilizers, simultaneously. The present study aims to evaluate the agricultural valorization of commonly available fruit waste in promoting lettuce growth under alkaline conditions through foliar application. Banana, lemon and pomegranate peel extracts were selected and applied individually and in combination of 25%, 50% and 75% each. They may contribute to the lettuce growth and accumulation of nutritionally valuable secondary metabolites. A completely randomized pot experiment was conducted with 12 experimental groups in replicates. About 12 g of limestone powder per 6 kg of soil added to each pot with a pH 8. The main objective of this study was to utilize this organic waste as an organic fertilizer for lettuce production in alkaline soil. Selected fruit peel extracts, banana, lemon, pomegranate peel extracts, and their combinations, were utilized as a foliar spray. The growth parameters (plant height, fresh/dry weight, leaf area) and biochemical content (chlorophyll, protein, and flavonoid) were estimated after 60-65 days of transplanting. The results of this study show that 25% pomegranate peel extract significantly enhanced lettuce growth by increasing the plant height (45.527 cm), shoot fresh weight (15.857 g) and dry weight (3.126 g), and leaf area (146.5 cm^2). Also, the same concentration shows enhanced biochemical parameters, including chlorophyll content (1.41 mg/g), flavonoids (0.85 mg/g), and total phenolic acids (9.01 mg/g). When applied in combination the three peel extracts the trend shown was P1>CM2>L3>CM1>L2 represented by the increased growth and biochemical content of lettuce under alkaline conditions. The application of fruit peel extracts acts as a beneficial and environmentally responsible substitute for artificial fertilizers.

Keywords: Lettuce, plant-based biostimulants, alkaline soil, organic waste valorization

INFLUENCE OF DIFFERENT PLANT SPACING ON INSECT PESTS INFESTATION AND YIELD OF AMARANTHUS HABRIDUS IN MAKURDI, NIGERIA.

By

Atsehe Iorlumun Innocent.

DEPARTMENT OF CROP AND ENVIRONMENTAL PROTECTION, JOSEPH SARWUAN TARKA UNIVERSITY MAKURDI, BENUE STATE, NIGERIA.

Abstract

Amaranthus species are important vegetable crops cultivated and consumed daily in Nigeria and many countries of the world. Unfortunately, insect pests are a major setback for commercial production and for the purpose of food security in Nigeria. A field experiment was conducted at the Teaching and Research farm, Joseph Sarwuan Tarka University, Makurdi, Nigeria in 2023 cropping season to determine the influence of plant spacing on insect pests infestation and yield of *Amaranthus hybridus* L. The experiment was carried out in a Randomized complete block design with seven treatment, 10 × 10 cm, 20 × 20 cm, 30 × 30 cm, 40 × 40 cm, 50 × 50 cm, 60 × 60 cm and 70 × 70 cm (Spacing cm) and four replicates. Data collected on insect identification, insect category, number of damaged plant per plot, number of leaves per plant and damaged leaf area per plant, plant height, number of branches were subjected to analysis of variance and means values were separated using Duncan's New Multiple Range test at 5% level of probability. The results showed that *Amaranthus hybridus* with narrow spacing was attacked more than at wider spacing and 70 × 70 cm plant spacing was also found to be the most effective in reducing insect pest infestations. Spacing of 50 × 50 cm and above were also found to perform better compared with the lower spacing. Therefore, the use of minimum plant spacing of 50 × 50 cm was recommended for insect pest reduction, good growth and yield performance of *Amaranthus hybridus* L. in Makurdi, Benue State, Nigeria.

Keywords: *Amaranthus hybridus*, Spacing, Pests, Infestation, Yield .

POTENTIALS OF AGRO-INDUSTRIAL BY-PRODUCTS AS CLEAN LABEL FOOD INGREDIENTS FOR DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL FOODS

Olubukola L. Ayanleye and Victor N. Enujiugha*
Department of Food Science and Technology, Federal University of Technology, P.M.B. 704, Akure 340252, Ondo State, Nigeria
*Correspondence: V.N. Enujiugha

Absract
Agro-industrial by-products (AIBP) are mostly produced by companies that process agricultural products, including milling cereal grains, removing oil from seeds, brewing, malting, and processing fruits and vegetables. The current global practices for disposing of and managing food agro-industrial by-products poorly have been shown to have detrimental effects on the environment, as well as the social and economic spheres. Given the consumer's demand for "clean label" products and the environmental constraints that reinforce the need to change the traditional industrial raw materials with renewable sources, agro-food byproducts have appeared as one of the most relevant potential solutions. In fact, some of the additives currently in use (like anthocyanins and carotenes) can be found in these materials, which makes their extracts interesting from a consumer's perspective, particularly when considering the possibilities opened up by green, safe, new extraction methodologies like high pressure extraction, ohmic extraction, pulsed electric field, or supercritical extraction. This paper highlights the potential of agro-industrial by-products as clean label food ingredients for development of functional foods. The concentrations of certain functional compounds may change from batch to batch and their chemical, physical, or enzymatic instability provide a barrier to their widespread application. There are still many technological factors that need to be evaluated in addition to the organoleptic properties. As a result, further research needs to be done to address these issues. The agri-food industry may be encouraged to comply by appropriate laws, multi-stakeholder forums, and perhaps even other types of incentives in order to evolve appropriate policies.
Key words: Agro-industrial by-products; clean label ingredients; functional foods; bioactive components

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[1] , Mohamed Khalis[2,3,4,5] , Mohamed Chahboune[1]

[1]Laboratory of Health Sciences and Technologies, Higher Institute of Health Sciences, Hassan First University of Settat, Settat, Morocco

[2]Mohammed VI Center of Research and Innovation, Rabat, Morocco

[3]International School of Public Health, Mohammed VI University of Health Sciences, Casablanca, Morocco

[4]Higher Institute of Nursing Professions and Technical Health, Rabat, Morocco

[5]Laboratory of Biostatistics, Clinical, and Epidemiological Research, Department of Public Health, Faculty of Medicine and Pharmacy, Mohamed V University in Rabat, Rabat, 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

MANGANESE'S CYTOTOXICITY AND GENOTOXICITY IN *GLYCINE MAX* L. ROOT MERISTEMTIC CELLS

Sazada Siddiqui

Department of Biology, College of Science, King Khalid University, Abha 61413, Saudi Arabia

Abstract.

The chromosomal plant assay is an essential technique for assessing the possible damage to the genome caused by pollutants at levels over the ideal threshold. This study looked at how different manganese (Mn) concentrations affected the mitotic index (MI), cell kinetics index (CKI), and abnormal ity index (AI) in root tip cells of Glycine max L. The percentage of mitotic index, abnormality index, and cell kinetics index in Glycine max L. root meristems at control and different Mn concentrations were assessed. The results indicated that the Mn doses used for seed treatment led to noticeable variations in the chromosomal activity of Glycine max L. root tip cells, resulting in a reduced mitotic index and cell kinetics, alongside a higher abnormality index. Treatment was performed at room temperature for 24, 48, and 72 hours at four varying concentrations of Mn: CN (Control), 5µM, 10µM, 15µM, and 20µM. The control group received distilled water as treatment. The results showed that Mn exhibits cytotoxic and genotoxic impacts on the root tip cells of Glycine max L.

Keywords: Manganese (Mn), Glycine max L, mitotic index, abnormality index, cell kinetics

AN INTEGRATED FRAMEWORK FOR SOIL HEALTH AND RISK ASSESSMENT OF THE INORGANIC POLLUTANT MONITORING OF SOIL OF THE CENTRAL ZONE OF INDIA: COMBINING ICP-MS, FTIR SPECTROSCOPY, AND 16S rRNA MICROBIAL PROFILING

Azimul Hasan[1] and Evangeline Christina[2]

[1,2]School of Biosciences Engineering and Technology, VIT Bhopal University, Kothri Kalan, Sehore, Madhya Pradesh, 466114, India.

Abstract

Industrialisation, mining, and intensive agricultural activities have led to the deterioration of soil health in central Madhya Pradesh, India, characterised by nutrient depletion, disruption of microbial communities, and heavy metals (HMs) pollution. In the present study, soil samples from Bhopal (AABU), Hoshangabad (AAHP), and Indore (AAIS) were analysed using a combination of physicochemical, microbiological, molecular, and spectroscopic approaches. Nutrient analysis revealed widespread, critical deficiencies of nitrogen, potassium, zinc, boron, and copper at all sites, limiting crop productivity and microbial activity. The Dehydrogenase Activity increased with higher TTC concentrations, with AABU showing the highest oxidative metabolism. Negligible negative controls confirmed specificity. Dehydrogenase Activity (DHA) proved to be a sensitive indicator of microbial viability and functional metabolic capacity. Strains were identified by biochemical tests and 16S rRNA sequencing, confirming the emergence of metabolically diverse, metal-tolerant genera, including *Pseudomonas, Stenotrophomonas, Bacillus,* and *Rhodococcus spp*. In the Antibiotic Susceptibility Test (AST), the AAIS site was identified as the most responsive, with high sensitivity demonstrated by certain bacteria toward ciprofloxacin and aminoglycosides. Conversely, a concerning level of resistance was revealed at the AABU site, particularly in *Rhodococcus ruber*, which was found to be unaffected by several major drugs. Overall, while some modern antibiotics were observed to remain effective, widespread benzylpenicillin resistance was noted among these soil-dwelling microbes, likely induced by environmental exposure. ICP-MS results indicated elevated Ni levels at AABU (57.023 mg kg^{-1}) and AAIS (70.553 mg kg^{-1}), exceeding WHO guidelines, while Cd was slightly above permissible limits at AABU (1.053 mg kg^{-1}). ATR-FTIR spectra detected functional groups (O–H, N–H, C=O, and Si–O) associated with organic substances, clay minerals, and residual pollutants. Results highlight heavy metal contamination in Bhopal and Indore, persistent nutrient deficiencies at all sites, and shifts in microbial communities, which could impair soil functions and agricultural resilience. The findings indicate severe heavy metal contamination in Bhopal and Indore, coupled with persistent nutrient deficiencies and microbial shifts, potentially compromising soil function and agricultural sustainability. The integrated analytical approach provides a robust framework for soil monitoring and targeted remediation in industrially impacted regions.

Keywords- Antibiotic Susceptibility Test, biochemical test, FTIR, heavy metals, ICP-MS, soil health assessment, 16s sequencing (microbial profiling)

ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİNDE İNTERNET BAĞIMLILIĞI, FİZİKSEL AKTİVİTE VE KAS KUVVETİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Arş. Gör. Deniz ÇAKIR YILMAZ

Ondokuz Mayıs University, Faculty of Health, Department of Physiotherapy and Rehabilitation, 55200 Atakum, Samsun

ORCID ID: 0000-0002-0626-7465

Doç. Dr. Ercan TURAL

Ondokuz Mayıs University, Faculty of Health, Department of Physiotherapy and Rehabilitation, 55200 Atakum, Samsun

ORCID ID: 0000-0003-3894-7761

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, üniversite öğrencilerinde internet bağımlılığı düzeyine göre dijital olarak ölçülen kas kuvvetini ve fiziksel aktivite düzeyini değerlendirmek ve bu değişkenler arasındaki ilişkileri incelemektir. Bu kesitsel çalışmaya 142 üniversite öğrencisi dahil edildi. Öğrencilerin fiziksel ve demografik özellikleri kaydedildikten sonra M. quadriceps femoris, M. hamstring, M. gastrocnemius, M. rectus abdominis, sırt ekstansörleri, M. biceps brachii ve M. deltoideus kaslarının kuvvetleri dijital olarak ölçüldü. Katılımcılara Young İnternet Bağımlılığı Testi-Kısa Form (YİBT-KF), Uluslararası Fiziksel Aktivite Anketi-Kısa Form (UFAA-KF) ve SF-12 uygulandı. Riskli internet kullanımı olan öğrenciler ile ortalama internet kullanımı olan öğrenciler arasında kas kuvveti ölçümleri açısından anlamlı bir fark bulunmazken, riskli internet kullanımı olan öğrencilerin SF-12 anketinin mental bileşen alt skoru (MCS12) skorlarının daha yüksek olduğu bulundu (p=0,036). Sonuç olarak, riskli internet kullanımı ile kas kuvveti arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Riskli internet kullanımı olan öğrencilerin MCS-12 skorları ise ortalama internet kullanıcılarına göre anlamlı düzeyde daha yüksek bulunmuştur. İnternet kullanımı, fiziksel aktivite ve kas kuvveti arasındaki ilişkinin ortaya konulması için daha geniş örneklemli ve uzunlamasına çalışmalara ihtiyaç vardır.

Anahtar kelimeler: Kas Kuvveti, Fiziksel Aktivite, İnternet Bağımlılığı

THE RELATIONSHIP BETWEEN INTERNET ADDICTION, PHYSICAL ACTIVITY, AND MUSCLE STRENGTH IN UNIVERSITY STUDENTS

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate digitally measured muscle strength and physical activity levels according to the level of internet addiction among university students and to investigate the relationships between these variables. A total of 142 university students were included in this cross-sectional study. After recording the participants' physical and demographic characteristics, the muscle strength of the quadriceps femoris, hamstrings, gastrocnemius, rectus abdominis, back extensors, biceps brachii, and deltoid muscles was digitally measured. The participants completed the Young Internet Addiction Test-Short Form (YIAT-SF), the International Physical Activity Questionnaire-Short Form (IPAQ-SF), and the 12-Item Short Form Health Survey (SF-12). No significant differences were found in muscle strength measurements between students with risky internet use and those with average internet use, whereas students with risky internet use had significantly higher scores on the Mental Component Summary (MCS-12) of the SF-12 (p=0.036). In conclusion, no significant association was found between risky internet use and muscle strength. The MCS-12 scores of students with risky internet use

were significantly higher than those of students with average internet use. Further longitudinal studies with larger sample sizes are needed to clarify the relationships among internet use, physical activity, and muscle strength.

Keywords: Muscle Strength, Physical Activity, Internet Addiction

1. GİRİŞ

İnternet kullanımının beklenenden hızlı yaygınlaşması ve günlük yaşamı kolaylaştırması beraberinde aşırı internet kullanımına bağlı problemlerin oluşmasına sebep olmuştur. Günümüzde bağımlılık sadece uyuşturucu madde kullanımı veya ilaç anlamına gelmemektedir. Bunlarla birlikte kumar oynama, oyunlar, hatta akıllı telefonlara olan düşkünlük anlamına da gelmektedir (1). Bireylerin sosyal hayattan uzaklaşması, kişisel gelişim sorunları, karşılıklı iletişimde aksaklıklar yaşanması, akademik başarısızlık, kronik yorgunluk, uykusuzluk ve uzun süreli bilgisayar kullanımının beraberinde getirdiği hareketsiz yaşamın sebep olduğu fiziksel problemler internet kullanımının olumsuz yönleridir (2). Fiziksel hareketleri engelleyen internet kullanımı, bireylerde düşük enerji harcamasına yol açtığı için kardiyorespiratuar kapasitede azalma ve obezite gibi çeşitli problemlerin meydana gelmesine sebep olmaktadır (3).

Dong ve ekibi, araştırmaları sonucunda COVID-19 döneminde Çinli gençlerin internet bağımlılığına yönelik duyarlılığının kayda değer biçimde arttığını ve bunun hem davranışsal hem de psikolojik sonuçlar açısından kritik etkiler doğurduğunu ortaya koymuştur (4). Ayrıca ampirik araştırmalar, internet bağımlılığı ile fiziksel aktivite arasında ters yönlü bir ilişki olduğunu göstermekte; aşırı internet kullanımının gençlerin fiziksel aktivitelere katılımını belirgin biçimde azaltabileceğini ifade etmektedir (5). Fiziksel aktivitedeki yetersizlik, obezite ile kardiyovasküler bozukluklar gibi sağlık komplikasyonlarıyla anlamlı biçimde ilişkili olup gençlerin yaşam kalitesini düşüren bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır (6).

Kas gücünün fiziksel aktivite seviyesi ile doğrudan ilişkili olduğu bildirilmektedir (7,8). Gençlerde de kas gücünü etkileyen, değiştirilebilir sağlık davranışlarından biri olarak düşük düzeyde fiziksel aktivite giderek daha fazla önem kazanmaktadır (9,10,11,12). Fiziksel aktivite düzeyindeki azalma dolaylı olarak bireylerin kas kuvvetinde azalmaya sebep olduğu bilinmektedir (13). Bu nedenle, kas gücünün kaybı bir halk sağlığı sorunudur ve nüfusun belirli kesimlerinde bu durumun değerlendirilmesi çok önemlidir. Ancak fiziksel aktivitenin kas gücü ve sağlık arasındaki ilişkide oynadığı rolü inceleyen çok az sayıda çalışma bulunmaktadır (14).

Kliniklere başvuran çeşitli postüral ya da iskelet kas sistemine ait problemleri bulunan kişilerin azalmış kas gücünü değerlendirmek için manuel yöntemler klinisyenler tarafından kullanılmaktadır. Manuel kas testleri, kas gücünün klinik değerlendirmesi için en yaygın kullanılan fizik muayene yöntemidir (15). Ancak manuel kas testlerinin, muayeneyi yapanın deneyimine, gücüne ve muhakemesine bağlı olarak gücün öznel bir ölçümü olduğu da kabul edilmektedir (15,16,17,18,19,20,21,22).

Fizyoterapide yaygın kullanılan kas kuvveti değerlendirme yöntemleri, değerlendiricinin gücüne bağlı olması nedeniyle objektiflikten uzak kalabilmektedir. Dijital kas kuvvet ölçüm cihazları ise dirence karşı üretilen kuvveti sayısal verilerle kaydederek daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Günümüzde üniversite öğrencilerinde artan internet kullanımı ve buna bağlı gelişen fiziksel inaktivite kas kuvvet kaybına yol açmaktadır. Tüm bunlardan yola çıkarak çalışmada dijital kas kuvvet ölçümü ile teknolojik bağımlılığı olan öğrencilerde fiziksel aktivite düzeyi ve kas kuvvet ilişkisini ortaya koymayı ve elde edilen bulguların bireye özgü egzersiz programlarının oluşturulmasına katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

2. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Anabilim Dalında gerçekleştirilmiştir. Çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Klinik Araştırma Etik Kurulu (2023/437) tarafından onaylanmıştır. Her katılımcıdan yazılı bilgilendirilmiş onam alınmıştır.

Katılımcılar

18-30 yaş aralığındaki 41 erkek 101 kadın olmak üzere toplam 142 Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü öğrencisi çalışmaya dahil edildi. Dahil edilme kriterleri: 18-30 yaş aralığında olmak, üniversite öğrencisi olmak, çalışmayı engelleyecek fiziksel ve sistemik hastalığı olmamak. Dışlanma kriterleri: 18-30 yaş aralığında olmamak, üniversite öğrencisi olmamak, çalışmayı engelleyecek fiziksel ve sistemik hastalığı olmak.

Değerlendirmeler

Araştırma grubunda yer alan bireylere demografik veri formunda yer alan bilgiler soruldu, Young İnternet Bağımlılığı Testi-Kısa Form, Uluslararası Fiziksel Aktivite Anketi ve SF-12 uygulandı. Kas kuvveti ölçümü MicroFET 2 Manuel Kas Testi Cihazı isimli cihazla hasta sedyesi üzerinde gerçekleştirildi.

Demografik Veri Formu: Bireylerin ad-soyad bilgisi, yaşı, cinsiyet, boy, kilo, sigara-alkol kullanımı, dominant ekstremiteleri, cerrahi öykü varlığı, barındığı yer, medeni durum, günlük kullanılan teknolojik cihaz sayısı ve süresi sorgulandı.

Dijital Kas Kuvveti Ölçümü: Bireylerin sırtüstü yatış, yüzüstü yatış ve dik oturma pozisyonlarında belirli kas gruplarının (M. Quadriceps Femoris, M. Hamstring, M. Gastrocinemius, M. Rectus Abdominus, Sırt Ekstansörleri, M. Biceps Brachii ve M. Deltoideus) kas kuvveti ölçüldü. Her test için değerlendirici, direncin vücut segmentine dik olarak uygun eklem açısında uygulandığından ve kompansasyona yönelik kas hareketini önlemek için yeterli manuel stabilizasyonun sağlandığından emin oldu. Ölçümleri alınacak kişilerden 1 ila 2 saniyelik bir süre içinde maksimum kasılmayı oluşturması ve uygulanan dirence karşı maksimum eforu 4 ila 5 saniye daha tutması istendi. Kaydedilen ölçüm, bireyin ulaştığı maksimum izometrik değeri yansıtır (23). Tüm testlerde her tekrar arasında 10 saniye ve her kuvvet testi arasında 60 saniye dinlenme süresi vardı. Tüm kuvvet üretimi süresi boyunca test görevlisi katılımcıları sözlü olarak motive etti. Her test seansının iki tekrarından kaydedilen maksimum değer analiz için kullanıldı.

Young İnternet Bağımlılığı Testi-Kısa Form (YİBT-KF): Young ve arkadaşları tarafından çocuk ve ergenlerin internet bağımlılık düzeylerini ölçmek için 1996 yılında Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders-IV'ün (DSM-IV) patolojik kumar oynama ölçütlerinden uyarlanarak geliştirilen Young İnternet Bağımlılığı Testi (YİBT) internet bağımlılığını ölçen ilk testin maddelerinden oluşmakta olup sıklıkla kullanılmaktadır (24). Bayraktar ve arkadaşları tarafından İngilizceden Türkçeye çevrilerek anlam bütünlüğü bozulmayacak şekilde hedef grubun anlayabileceği şekilde uyarlanmıştır. Kutlu ve ark. tarafından Young İnternet Bağımlılığı Testi-Kısa Form'unun YİBT-KF'nin hem üniversite öğrencileri hem de ergenler için geçerli ve güvenilir bir ölçek olduğu belirtmiştir (25).

Uluslararası Fiziksel Aktivite Anketi-Kısa Form (UFAA-KF): Fiziksel aktivite düzeyinin değerlendirilmesinde UFAA'nın 7 sorudan oluşan kısa formu kullanılacaktır. Bu formda son 7 gün içindeki fiziksel aktiviteler değerlendirilecektir. UFAA kısa formu Dünya Sağlık Örgütü ve Amerika Birleşik Devletleri Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezi'nin desteğiyle geliştirilmiş ve geçerlilik güvenirlilik çalışması Türkiye'de Sağlam ve ark. tarafından yapılmıştır (26). Bu ölçekte bireylerin son yedi gün içinde yaptıkları fiziksel aktivite düzeyleri 4 başlık altında (şiddetli aktiviteler, orta şiddetli aktiviteler, yürüme ve oturma) değerlendirilmektedir. Toplam puan, aktivitelere verilen MET (Metabolik Eşdeğer) değerleri ile (şiddetli aktivite=8 MET, orta şiddetli aktivite=4 MET, yürüme=3,3 MET) aktivitenin yapılma süresi ve aktivitenin yapılma frekansı (gün sayısı)'nın çarpılmasıyla bulunur. Bunun sonucunda bireylerin haftalık MET-dk puanları elde edilmektedir. Bu puanlara göre bireyler "inaktif", "minimal aktif" ve "çok aktif" olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır (27).

SF-12: Genel popülasyonda sağlıkla ilgili yaşam kalitesini değerlendirmek amacıyla en sık kullanılan ölçekler arasında bulunan Short Form-36 Health Survey (SF-36) (28) , fiziksel ve sosyal işlevsellik, fiziksel ve duygusal rol (fiziksel ve duygusal problemler nedeniyle rol kısıtlaması), genel ve mental sağlık, beden ağrısı ve enerji olmak üzere sekiz alt boyut içeren toplam 36 maddeden oluşmaktadır (29). Ware ve ark. (1995), SF-36'nın daha pratik ve kısa sürede uygulanabilen formunu geliştirmeye karar

vermiş ve soru sayısını azaltarak SF-36 ile aynı alt boyutları içeren SF-12'yi geliştirmişlerdir (30). Soylu ev ark. tarafından ise SF-12'nin Türkçe formunun psikometrik özelliklerinin orijinal versiyonuyla benzerlik gösterdiğini, dolayısıyla SF36'ya alternatif olarak ülkemizde yapılacak uygulama ve araştırmalarda kullanılabileceğini gösterilmiştir (31).

İstatistiksel Analiz

Çalışmadan elde edilen verilerin istatistiksel analizi SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) Windows 25.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katılımcıların demografik özellikleri ile ölçek ve ölçüm parametrelerine ait sürekli değişkenler ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum değerler ile tanımlanmış; kategorik değişkenler ise sayı (n) ve yüzde (%) olarak sunulmuştur. Verilerin normal dağılıma uygunluğu Shapiro-Wilk ve Kolmogorov-Smirnov testleri ile görsel inceleme yöntemleri (histogram ve Q-Q grafikleri) kullanılarak değerlendirildi. Normal dağılım gösteren sürekli değişkenlerin iki bağımsız grup (Ortalama İnternet Kullanıcısı ve Riskli İnternet Kullanıcısı) arasındaki karşılaştırmalarında Bağımsız Örneklem t-Testi (Independent Samples t-test); normal dağılım göstermeyen değişkenlerin karşılaştırmalarında ise Mann-Whitney U Testi uygulandı. İstatistiksel anlamlılık düzeyi tüm analizler için $p < 0,05$ olarak kabul edildi.

Demografik değişkenler Tablo 1'de tanımlandı. Çalışmaya yaş ortalaması 21,11 ± 4,06 yıl olan 101 kadın (%71,1) ve yaş ortalaması 23,36 ± 4,34 yıl olan 41 erkek (%28,9) olmak üzere toplam 142 üniversite öğrencisi dahil edilmiştir. Üniversite öğrencilerinin Vücut Kitle İndeksi (VKİ) dağılımı incelendiğinde; %43,8'inin (n=91) normal, %14,4'ünün (n=30) fazla kilolu, %5,3'ünün (n=11) zayıf ve %4,8'inin (n=10) obez kategorisinde yer aldığı görülmüştür. Üniversite öğrencilerinin büyük bir çoğunluğunun (%95,7, n=135) dominant ekstremitesi sağ taraf iken, %4,93'ünün (n=7) sol taraftır. Öğrencilerin sağlık durumu ve alışkanlıklarına ilişkin verilere bakıldığında; %15,49'unun (n=22) sigara kullandığı, %13,38'inin (n=19) alkol tükettiği belirlenmiştir. Katılımcıların %7,75'inin (n=11) geçirilmiş bir cerrahi öyküsü bulunurken, %23,24'ünün (n=33) bir kronik hastalığa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1. Demografik değişkenler

		Katılımcılar (n=142)
		Ort. ± SS
Yaş	**Kadın** **Erkek**	21,11 ± 4.06 23,36 ± 4.34
		n (%)
Cinsiyet	**Kadın** **Erkek**	101 (71,1) 41 (28,9)
Vücut Kitle İndeksi (VKİ)	**Zayıf** **Normal** **Fazla Kilolu** **Obez**	11 (5,3) 91 (43,8) 30 (14,4) 10 (4,8)
Dominant Ekstremite	**Sağ** **Sol**	135 (95,7) 7 (4,93)

	Sigara Kullanımı	**Alkol Tüketimi**	**Cerrahi Öykü Varlığı**	**Kronik Hastalık Varlığı**
	n (%)	**n (%)**	**n (%)**	**n (%)**
Yok **Var**	109 (76,76)	22 (15,49)	19 (13,38) 123 (86,62)	11 (7,75) 131 (92,25)

Young İnternet Bağımlılığı Testi-Kısa Form sonuçları Tablo 2 ‘de gösterildi. Young İnternet Bağımlılığı Testi-Kısa Form sonuçlarına göre üniversite öğrencilerinin %95,1’i (n=135) "Ortalama İnternet Kullanıcısı", %4,9’u (n=7) ise "Riskli İnternet Kullanıcısı" olarak sınıflandırılmıştır. Gruba ait hiçbir katılımcı "Bağımlı İnternet Kullanıcısı" kategorisinde yer almamıştır. Günlük kullanılan teknolojik cihaz sayısı incelendiğinde; öğrencilerin %55,6’sının (n=79) 2 cihaz, %38,17’sinin (n=55) 1 cihaz, %0,7’sinin (n=1) 4 cihaz ve %0,7’sinin (n=1) 5 cihaz kullandığı tespit edilmiştir. Katılımcıların günlük ortalama teknolojik cihaz kullanım süresi ise 5,33 ± 2,30 saat (minimum 1, maksimum 14 saat) olarak bulunmuştur.

Tablo 2. Üniversite Öğrencilerinin Young İnternet Bağımlılık Ölçeği Skorları, Günlük Kullanılan Cihaz Sayıları ve Süreleri

		n (%)
Young İnternet Bağımlılık Ölçeği	**Ortalama İnternet Kullanıcısı**	135 (95,1)
	Riskli İnternet Kullanıcısı	7 (4,9)
	Bağımlı İnternet Kullanıcısı	0 (0)
Günlük Kullanılan Cihaz Sayısı	**1 cihaz**	55 (38,17)
	2 cihaz	79 (55,6)
	3 cihaz	0 (0)
	4 cihaz	1 (0,7)
	5 cihaz	1 (0,7)
Günlük Cihaz Kullanım Süresi		5,33 ±2.30 min 1 max 14

Üniversite öğrencilerinin dominant ekstremitelerine (sağ ve sol) göre dijital dinamometre ile ölçülen kas kuvveti (Newton/kg) değerleri Tablo 3'te sunuldu. Dominant tarafı sağ olanlarda sağ quadriceps femoris (QF) kası ortalaması 123,42 ± 37,53, sol QF ortalaması 120,94 ± 37,16’dır. Dominant tarafı sol olanlarda ise sağ QF ortalaması 125,3 ± 43,91, sol QF ortalaması 118,61 ± 45,19’dur. Dominant tarafı sağ olan bireylerde sağ taraf kuvvet ortalaması 79,12 ± 27,51, sol taraf kuvvet ortalaması 80,81 ± 28,91 olarak ölçülmüştür. Fleksiyon hareketinde dominant tarafı sağ olan grupta sağ deltoid kuvveti 86,58 ± 19,85 iken; abduksiyon hareketinde sağ deltoid kuvveti 86,02 ± 18,85 olarak kaydedilmiştir. Dominant tarafı sağ olanlarda sağ Hamstring kuvvet ortalaması 86,64 ± 23,85, sol Hamstring kuvvet ortalaması 84,56 ± 23,37’dir. Biceps brachii kuvvetinde ise sağ taraf ortalaması 113,98 ± 28,67, sol taraf ortalaması 115,37 ± 29,24 olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Dijital kas kuvveti sonuçları

	Dominant Ekstremite	N	Min.	Max.	Ort.	Std. Sapma
QF Kası (sağ)	**sağ**	135	50,10	241,20	123,42	37,53
	sol	7	81,1	204,3	125,3	43,91
QF Kası (sol)	**sağ**	135	45,6	239,2	120,94	37,16
	sol	7	70,6	196,2	118,61	45,19
Gastrokinemius Kası (sağ)	**sağ**	135	29,50	147,5	79,12	27,51
	sol	7	38,8	150,0	82,22	41,39
Gastrokinemius Kası (sol)	**sağ**	135	24,7	153,0	80,81	28,91
	sol	7	37,2	157,0	84,61	44,66
Deltoid Kası (Fleksiyon Hareketi) (sağ)	**sağ**	135	49,0	149,5	86,58	19,85
	sol	7	70,3	121,2	88,22	21,07
Deltoid Kası (Fleksiyon Hareketi) (sol)	**sağ**	135	47,2	148,8	88,04	20,50
	sol	7	66,5	133,3	94,30	26,40
Deltoid Kası (Ekstansiyon Hareketi) (sağ)	**sağ**	135	42,4	145,5	86,02	18,85
	sol	7	57,0	127,6	91,64	25,19
Deltoid Kası (Ekstansiyon Hareketi) (sol)	**sağ**	135	44,3	138,1	84,72	19,35
	sol	7	60,9	133,4	89,67	29,89
Hamstring Kası (sağ)	**sağ**	135	150,6	38,6	86,64	23,85
	sol	7	48,6	190,0	93,27	45,26
Hamstring Kası (sol)	**sağ**	135	43,6	164,9	84,56	23,37
	sol	7	208,0	45,5	92,10	52,99
Biceps Brachi Kası (sağ)	**sağ**	135	58,7	213,9	113,98	28,67
	sol	7	75,8	191,0	124,30	42,15
Biceps Brachi Kası (sol)	**sağ**	135	65,0	210,9	115,37	29,24
	sol	7	76,9	263,0	129,80	68,27

QF: Quadriceps Femoris, min: minimum, max: maksimum, ort: ortalama, std: standart

Gövde kas kuvvetlerinin değerlendirilmesi Tablo 4'te gösterildi. Sırt ekstansör kas kuvveti açısından üniversite öğrencilerinin %62,7'si (n=89) "5" (normal) ve %17,6'sı (n=25) "5-" seviyesinde bulunmuştur. Gövde Fleksörlerinde ise üniversite öğrencilerinin %61,3'ünün (n=87) "5" seviyesinde, %11,3'ünün (n=16) "5-" seviyesinde ve %12,7'sinin (n=18) "3" seviyesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Üniversite Öğrencilerinin Sırt Ekstansörleri ve Gövde Fleksörleri Kas Kuvvetleri

	Sırt Ekstansörleri		Gövde Fleksörleri	
	N	**%**	**N**	**%**
3	3	2,1	18	12,7
3+	3	2,1	6	4,2
4-	10	7,0	6	4,2
4	3	2,1	1	0,7
4+	9	6,3	8	5,6
5-	25	17,6	16	11,3
5	89	62,7	87	61,3

Üniversite Öğrencilerinin Uluslararası Fiziksel Aktivite Anketi (UFAA-KF) verilerine göre MET Değerleri, Oturma Süreleri ve IPAQ Kategorisi verileri Tablo 5'te gösterildi. Katılımcıların ortalama

fiziksel aktivite puanı 2431,10 ± 2916,34 MET-dk/hafta ve günlük ortalama oturma süresi 6,12 ± 2,63 saat olarak hesaplanmıştır. Fiziksel aktivite düzeylerine (IPAQ kategorisi) göre dağılım incelendiğinde; öğrencilerin %24,8'inin (n=35) düşük/inaktif (Kategori 1), %49,6'sının (n=70) orta/minimal aktif (Kategori 2) ve %25,5'inin (n=36) yüksek/çok aktif (Kategori 3) düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. MET Değerleri, Oturma Süreleri ve IPAQ Kategorisi Tanımlayıcı Verileri

	N	Min.	Max.	Ort.	Std. Sapma
MET Değeri	142	0	22932	2431,10	2916,344
Oturma Süresi	142	0	14	6,12	2,635
		1 (Düşük)	**2 (Orta)**	**3 (Yüksek)**	
IPAQ Kategori	**N**	35	70	36	
	%	24,8	49,6	25,5	

min: minimum, max: maksimum, ort: ortalama, std: standart

Üniversite öğrencilerinin İnternet Kullanım Sınıflandırmasına Göre SF-12 Skorları Tablo 6'da gösterildi. İnternet kullanımı durumuna göre yaşam kalitesi (SF-12) alt boyut puanları incelendiğinde; "Ortalama İnternet Kullanıcısı" olan grubun Fiziksel Sağlık Skoru (PCS-12) ortalaması 46,84 ± 4,88, Mental Sağlık Skoru (MCS-12) ortalaması 36,43 ± 8,37'dir. "Riskli İnternet Kullanıcısı" grubun Fiziksel Sağlık Skoru ortalaması 47,61 ± 2,93 iken, Mental Sağlık Skoru ortalaması 43,24 ± 6,02 olarak bulunmuştur.

Tablo 6. İnternet Kullanım Sınıflandırmasına Göre SF-12 Skorları

	N		Ort.	Std. Sapma
Ortalama İnternet Kullanıcısı	135	**Fiziksel Skor**	46,84	4,88
		Mental Skor	36,43	8,37
Riskli İnternet Kullanıcısı	7	**Fiziksel Skor**	47,61	2,93
		Mental Skor	43,24	6,02

ort: ortalama, std: standart

Ortalama internet kullanıcıları ile riskli internet kullanıcıları arasında dijital yöntemle ölçülen kas kuvveti değerlerinin karşılaştırılması Tablo 7'de verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda; Sağ QF (p=0,087), Sol QF (p=0,077), Sağ Deltoid (Abduksiyon hareketi) (p=0,082), Sol Deltoid (Abduksiyon hareketi) (p=0,325), Sağ Hamstring (p=0,175) ve Sol Hamstring (p=0,178) kas kuvveti ortalamaları açısından ortalama internet kullanıcıları ve riskli internet kullanıcıları grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır (p>0,05).

Tablo 7. İnternet Kullanım Sınıflandırmasına Göre Kas Kuvveti Karşılaştırmaları

	İnternet Bağımlılığı Sınıflandırması	N	Ort.	Std. Sapma	p
QF Kası (sağ)	Ortalama internet kullanıcısı	135	2,0677	,13100	0,087
	Riskli internet kullanıcısı	7	2,1554	,13851	
QF Kası (sol)	Ortalama internet kullanıcısı	135	2,0562	,13693	0,077
	Riskli internet kullanıcısı	7	2,1512	,15458	
Deltoid Kası (Ekstansiyon Hareketi) (sağ)	Ortalama internet kullanıcısı	135	,09467	,00815	0,195
	Riskli internet kullanıcısı	7	,11731	,04434	

Deltoid Kası (Ekstansiyon Hareketi) (sol)	Ortalama internet kullanıcısı	135	,10063	,00866	0,198
	Riskli internet kullanıcısı	7	,09870	,03730	
Deltoid Kası (Ekstansiyon Hareketi) (sağ)	Ortalama internet kullanıcısı	135	1,9161	,09806	0,082
	Riskli internet kullanıcısı	7	1,9539	,11423	
Deltoid Kası (Ekstansiyon Hareketi) (sol)	Ortalama internet kullanıcısı	135	1,9229	,09108	0,325
	Riskli internet kullanıcısı	7	1,9856	,11848	
Hamstring Kası (sağ)	Ortalama internet kullanıcısı	135	1,9196	,11952	0,175
	Riskli internet kullanıcısı	7	1,9827	,11297	
Hamstring Kası (sol)	Ortalama internet kullanıcısı	135	1,9091	,12047	0,178
	Riskli internet kullanıcısı	7	1,9716	,08081	

QF: Quadriceps Femoris, min: minimum, max: maksimum, ort: ortalama, std: standart

3. SONUÇ

Bu çalışmanın temel amacı, üniversite öğrencilerinde internet bağımlılığı düzeyine göre dijital olarak ölçülen kas kuvvetini, fiziksel aktivite seviyesini ve yaşam kalitesini değerlendirmektir. Çalışmamızın ana bulguları; riskli internet kullanımı olan öğrenciler ile ortalama internet kullanımı olan öğrenciler arasında dijital kas kuvveti ve fiziksel aktivite düzeyleri açısından anlamlı bir fark saptanmadı. Buna karşın riskli internet kullanımı olan grubun SF-12 mental bileşen skorunun (MCS-12) ortalama internet kullanıcılarına göre istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek olduğunu (p=0,036) gösterdi.

Literatürdeki önceki araştırmalar internet bağımlılığı/akıllı telefon ve fiziksel aktivite arasında ilişki olabileceğini öne sürmüşlerdir. 2024 yılında Pirwani ve ark. yaptıkları sistematik analizde (32) inceledikleri çalışma sonuçlarına göre kesitsel çalışmalar fiziksel aktivite ile akıllı telefon bağımlılığı arasında zayıf bir bağlantı olduğunu gösterirken, egzersiz odaklı müdahale çalışmaları, egzersizin akıllı telefon bağımlılığı üzerinde anlamlı önemli etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırmacılar, bu araştırma alanında internet bağımlılığı/akıllı telefon ve fiziksel aktivite arasındaki ilişkide birçok aracı faktör olabileceğini, akıllı telefon kullanımının ya da internet bağımlılığının hem de fiziksel aktivitenin objektif bir şekilde ölçülmesinin standardize hale getirilememesi gibi sebeplerle bu ilişkinin incelenmesine yönelik daha fazla çalışmasına ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Literatürde internet/akıllı telefon bağımlılığı ile fiziksel aktivite arasında ters yönlü ilişki bildirilmesine rağmen, bu ilişkinin kas kuvvetine yansıması konusunda kanıtlar sınırlıdır. Önceki çalışmalar ağırlıklı olarak internet/akıllı telefon bağımlılığı ile fiziksel aktivite arasındaki ilişkiye odaklanırken, bizim çalışmamız bu ilişkinin yanında farklı kas gruplarının dijital olarak ölçülen kas kuvvetini de değerlendirmiştir.

Araştırmalar, bireylerin egzersiz yoluyla internet bağımlılığının zararlı etkilerini hafifletebileceğini ortaya koymuştur. Bu fenomenin altında yatan mekanizma şöyledir: ilk olarak, egzersiz vücut ısısını yükseltir ve kas gerginliğini azaltır, böylece anksiyete ve stres belirtilerini hafifletir; ikinci olarak, egzersizin neden olduğu katekolamin artışı, kardiyovasküler ve solunum sistemlerini düzenleyebilir, duyguları kontrol edebilir ve dikkat ile hafızayı etkileyebilir; üçüncü olarak ise, egzersizle üretilen endorfinlerden elde edilen zevk, uzun süreli olmasıyla karakterize edilir. Egzersizin, merkezi sinir sisteminin belirli yapı ve işlevlerini geliştirebileceği ve böylece dopamin ile dopamin reseptörlerini iki yönlü olarak düzenleyebileceği kanıtlanmıştır. Bu da insan sağlığına fayda sağlar ve internet bağımlılığı olan ergenlerin sergilediği sorunlu davranışları etkili bir şekilde ele alabilir (33,34). Ancak fiziksel aktivite ile internet bağımlılığı arasındaki ilişki üzerine, özellikle de internet bağımlılığı üzerinde fiziksel aktivitenin etkileşiminde rol oynayan altta yatan mekanizmaların incelenmesi açısından daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir; bu alandaki çalışmalar hala nispeten yetersizdir. 2025 yılında Sun ve ark. tarafından yapılan çalışmada (35) internet bağımlılığı ile toplam fiziksel aktivite arasında negatif ilişki bulunmuş ve çalışmada öz-kontrolün aracı rolü olduğu bildirilmiş. Literatürde internet bağımlılığı ile fiziksel aktivite arasında ters yönlü ilişki bildirilmesine rağmen, bu ilişkinin kas kuvvetine yansıması konusunda kanıtlar sınırlıdır. Önceki çalışmalar ağırlıklı olarak internet bağımlılığı

ile fiziksel aktivite arasındaki ilişkiye odaklanırken, bizim çalışmamız bu ilişkinin yanında farklı kas gruplarının dijital olarak ölçülen kas kuvvetini de değerlendirdi. Çalışmamızda internet bağımlılığı ve kas kuvveti açısından anlamlı fark saptanmamasına karşın, bu sonuçlar bir kişinin günlük fiziksel aktivitesinin azalabileceği ama bu durumun genç yaşta henüz ölçülebilir kas kuvveti kaybına yol açmayabileceğiyle açıklanabilir.

Literatürde internet bağımlılığının depresyon ve bazı psikolojik sorunlarla ilişkili olduğu bildirilirken (36), mevcut çalışmada riskli internet kullanımı grubunda MCS-12 skorları daha yüksek bulundu. Bu bulgu, internet kullanımının mental sağlık üzerindeki etkilerinin doğrusal ve tek yönlü olmayabileceğini düşündürmektedir. İnternet, sosyal iletişim, eğlence, bilgiye erişim, akademik kaynaklara ulaşım ve sosyal destek sağlayabilir. Dolayısıyla problematik kullanım ile internet kullanımı aynı şey değildir. Nitekim Almukhtar ve ark. yaptıkları çalışmada (37) Suudi Arabistan'daki tıp öğrencilerinin orta düzeyde internet bağımlılığıyla daha iyi bir yaşam kalitesine sahip olduklarına dair kanıt sunmaktadır. Bu sonuç da bizim çalışmamızla benzer nitelikte sonuçlar sunmaktadır.

Çalışmamızda, riskli internet kullanımı olan öğrencilerin MCS-12 skorlarının ortalama internet kullanımı olan öğrencilere göre anlamlı düzeyde daha yüksek olduğu bulundu. Bu bulgu, internet bağımlılığı ile psikolojik iyilik hali arasında genellikle negatif yönde ilişki bildiren önceki çalışmalarla tam olarak örtüşmemektedir. Bu farklılığın birkaç olası nedeni bulunmaktadır. Öncelikle, SF-12'nin MCS-12 alt boyutu genel mental sağlık ve algılanan yaşam kalitesine ilişkin bir değerlendirme sağlamakta olup, internet kullanımına bağlı özgül psikolojik sorunları doğrudan değerlendirmemektedir. Buna karşılık, YİBT-KF problemli internet kullanımının düzeyini değerlendirmektedir. Dolayısıyla, problemli internet kullanımı ile genel mental sağlık arasındaki ilişkinin doğrusal olmayabileceği ve bu iki ölçümün farklı psikososyal boyutları yansıtıyor olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte, internet kullanımının yalnızca olumsuz sonuçlarla ilişkilendirilmemesi gerektiği de dikkate alınmalıdır. Üniversite öğrencileri açısından internet; sosyal iletişim, akranlarla etkileşim, sosyal destek, bilgiye erişim ve akademik faaliyetler için önemli bir araç olabilir. Bu nedenle, internet kullanımının bireyin mental sağlığı üzerindeki etkisi kullanımın süresinin yanı sıra kullanım amacı ve niteliğine de bağlı olabilir. Özellikle öğrencilerin interneti sosyal ve akademik amaçlarla kullanması, yüksek internet kullanımının bazı durumlarda daha yüksek algılanan mental sağlık skorlarıyla birlikte görülmesine katkıda bulunmuş olabilir. Ancak bu açıklama mevcut çalışmanın verileriyle doğrudan test edilmediğinden, olası bir açıklama olarak değerlendirilmelidir.

Diğer yandan, çalışmamızın kesitsel tasarımı nedeniyle internet kullanımı ile mental sağlık arasındaki ilişkinin yönü veya nedenselliği hakkında çıkarım yapılamamaktadır. Ayrıca, örneklem büyüklüğünün sınırlı olması ve gruplar arasındaki MCS-12 farkının istatistiksel olarak anlamlı olmasına rağmen klinik açıdan ne ölçüde anlamlı olduğunun belirlenememesi, bulgunun yorumlanmasında dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, mevcut sonuç riskli internet kullanımının mental sağlık üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermemekte; yalnızca bu örneklemde riskli internet kullanımı olan öğrencilerin MCS-12 skorlarının daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. İnternet kullanımının farklı amaçları, kullanım süresi ve kullanım biçimleri ile mental sağlık arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi için daha geniş örneklemli, longitudinal ve mümkün olduğunca objektif ölçümlerin kullanıldığı çalışmalara ihtiyaç vardır.

Sonuçlar ve Öneriler

Üniversite öğrencilerinde riskli internet kullanımı ile objektif kas kuvveti ve fiziksel aktivite seviyeleri arasında doğrudan bir ilişki saptanmadı. İleride yapılacak çalışmalarda, daha geniş örneklem gruplarıyla, bağımlılık düzeyleri daha dengeli dağılmış popülasyonlarda ve longitudinal tasarımlarla internet kullanımının kas-iskelet sistemi üzerindeki uzun dönemli etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.

Çalışmanın Kısıtlılıkları ve Güçlü Yönleri

Çalışmamızın en güçlü yönü, literatürde sıklıkla tercih edilen subjektif manuel kas testleri yerine objektif ve sayısal veriler sunan dijital kas kuvvet ölçüm cihazlarının (MicroFET 2) kullanılmış olmasıdır. Ancak, çalışmanın kesitsel tasarıma sahip olması neden-sonuç ilişkilerinin kesin olarak kurulmasını engellemektedir. Ayrıca, örneklem boyutunun tek bir fakülte/bölüm öğrencileriyle sınırlı olması ve riskli internet kullanıcısı grubundaki katılımcı sayısının azlığı sonuçların genellenebilirliğini kısıtlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Calfas, KJ. Taylor, WC. (1994). Effects Of Physical-Activity On Psychological Variables İn Adolescents.Pediatr Exercise. 6: 406-423.
2. Chou, C. Condron, L. Belland, JC. (2005). A Review Of The Research On İnternet Addiction. Educational Psychology Review. 17: 363-388.
3. Kim, K. Ryu, E. Chon, MY. Yeun, EJ. Choi, SY. Seo, JS. Nam, BW. (2006). Internet Addiction İn Korean Adolescents And İts Relation To Depression And Suicidal İdeation: A Questionnaire Survey. Int J Nurs Stud.43: 185-192.
4. Dong H, Yang F, Lu X, Hao W. Internet addiction and related psychological factors among children and adolescents in China during the coronavirus disease 2019 (COVID-19) epidemic. Front Psychiatry. 2020;11:00751. https://d oi.org/10.3389/fpsyt.2020.00751.
5. Park S. Associations of physical activity with sleep satisfaction, perceived stress, and problematic internet use in Korean adolescents. BMC Public Health. 2014;14(1):1143. https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-1143.
6. Poskotinova LV, Krivonogova OV, Zaborsky OS. Cardiovascular response to physical exercise and the risk of internet addiction in 15–16-year-old adolescents. J Behav Addictions. 2021;10(2):347–51. https://doi.org/10.1556/2006.20 21.00021.
7. Haskell WL, Lee IM, Pate RR, et al. Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. Med Sci Sports Exerc 2007; 39: 1423–1434. doi: 10.1249/mss.0b013e3180616b27
8. Blair SN, Church TS. The fitness, obesity, and health equation: is physical activity the common denominator? JAMA 2004; 292: 1232–1234. doi: 10.1001/jama.292.10.1232
9. Gracia-Marco L, Bel-Serrat S, Cuenca-Garcia M, et al. Amino acids intake and physical fitness among adolescents. Amino Acids 2017;49:1041–52.
10. Martinez-Gomez D, Eisenmann JC, Gomez-Martinez S, et al. Associations of physical activity and fitness with adipocytokines in adolescents: the AFINOS Study. Nutr Metab Cardiovasc Dis 2012;22:252–9.
11. Agostinis-Sobrinho C, Abreu S, Moreira C, et al. Muscular fitness, adherence to the Southern European Atlantic Diet and cardiometabolic risk factors in adolescents. Nutr Metab Cardiovasc Dis 2017;27:695–702.
12. Silva DAS, Martins PC. Impact of physical growth, body adiposity and lifestyle on muscular strength and cardiorespiratory fitness of adolescents. J Bodyw Mov Ther 2017;21:896–901.
13. Nicholas JA, Sapega A, Kraus H, Webb JN. Factors influencing manual muscle tests in physical therapy. J Bone Joint Surg Am 1978;60:186-90.
14. Hansen, A. W., Beyer, N., Flensborg-Madsen, T., Grønbæk, M., & Helge, J. W. (2013). Muscle strength and physical activity are associated with self-rated health in an adult Danish population. Preventive medicine, 57(6), 792-798.

15. Aitkens S, Lord J, Bernauer E, Fowler WM, Lieberman JS, Berck P. Relationship of manual muscle testing to objective strength measurements. Muscle Nerve 1989;173-7.
16. Beasley WC. Influence of method on estimates of normal knee extensor force among normal and postpolio children. Phys Ther Rev 1956;36:21-41.
17. Marino M, Nicholas JA, Gleim GW, Rosenthal P, Nicholas SJ. The efficacy of manual assessment of muscle strength using a new device. Am J Sports Med 1982;10:360-4.
18. Mendler HM. Effect of stabilization on maximum isometric knee extensor force. Phys Ther 1967;47:375-9.
19. Nicholas JA, Sapega A, Kraus H, Webb JN. Factors influencing manual muscle tests in physical therapy. J Bone Joint Surg Am 1978;60:186-90.
20. Saraniti AJ, Gleim GW, Melvin M, Nicholas JA. The relationship between subjective and objective measurements of strength. J Orthopaed Sports Phys Ther 1980;2:15-9.
21. Schwartz S, Cohen ME, Herbison GJ, Shah A. Relationship between two measures of upper extremity strength: manual muscle test compared to hand-held myometry. Arch Phys Med Rehabil 1992;73:1063-8.
22. Wadsworth CT, Krishnan R, Sear M, Harrold J, Nielsen DH. Intrarater reliability of manual muscle testing and hand-held dynametric muscle testing. Phys Ther 1987;67:1342-7.
23. Hayes, K., Walton, J. R., Szomor, Z. L., & Murrell, G. A. (2002). Reliability of 3 methods for assessing shoulder strength. *Journal of Shoulder and Elbow surgery*, *11*(1), 33-39.
24. Bayraktar, F. (2001). *İnternet kullanımının ergen gelişimindeki rolü* (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
25. Kutlu, M., Savcı M., Demir, Y. ve Aysan, F. (2016). Young İnternet Bağımlılığı Testi Kısa Formunun Türkçe uyarlaması: Üniversite öğrencileri ve ergenlerde geçerlilik ve güvenilirlik çalışması. *Anadolu Psikiyatri Dergisi, 17*(Ek1), 69-76.
26. Saglam M, Arikan H, Savci S, Inal-Ince D, Bosnak-Guclu M, Karabulut E, et al. International physical activity questionnaire: reliability and validity of the Turkish version.Percept Mot Skills. 2010;111(1):278–84.
27. Saglam M, Arikan H, Savci S, Inal-Ince D, Bosnak-Guclu M, Karabulut E, et al. International physical activity questionnaire: reliability and validity of the Turkish version. Perceptual and motor skills. 2010 Aug;111(1):278–84.
28. Coons SJ, Rao S, Keininger DL ve ark. (2000) A comparative review of generic quality-of-life instruments. Pharmacoeconomics 17:13-35.
29. Ware JE, Snow KK, Kosinski M ve ark. (1993) SF-36 Health Survey: Manual and Interpretation Guide. Boston: The Health Institute, New England Medical Center.
30. Ware JE, Kosinski M, Keller SD (1995) SF-12: How to Score the SF-12 Physical and Mental Health Summary Scales. Boston: The Health Institute, New England Medical Center.
31. Soylu, C., ve Kütük, B. (2022). SF-12 Yaşam Kalitesi Ölçeği'nin Türkçe Formunun Güvenirlik ve Geçerlik Çalışması. *Türk Psikiyatri Dergisi*, *33*(2), 108-117. https://doi.org/10.5080/u25700
32. Pirwani, N., & Szabo, A. (2024). Could physical activity alleviate smartphone addiction in university students? A systematic literature review. Preventive medicine reports, 42, 102744. https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2024.102744
33. Siomos, K. E., Dafouli, E. D., Braimiotis, D. A., Mouzas, O. D., and Angelopoulos, N. V. (2008). Internet addiction among Greek adolescent students. Cyberpsychol. Behav. 11, 653–657. doi: 10.1089/cpb.2008.0088
34. Jun, G., Jianhua, S., and Kunpeng, X. (2012). An empirical study of the effects of physical education and sports interventions on college students' Internet addiction. J. Shenyang Sports Inst. 31:5.

35. Sun Y, Wang Y, Yu H, Liu J and Feng X (2025) The effect of physical activities on internet addiction in college students: the mediating effect of self-control. Front. Psychol. 16:1530740. doi: 10.3389/fpsyg.2025.1530740
36. Sayili, U., Kara, B., Aydin, S. N., Siddikoglu, E., Albayrak, B., & Erginoz, E. (2025). Are depression, quality of life and life satisfaction associated with internet addiction? A cross-sectional study among Turkish university students. BMC psychiatry, 25(1), 644. https://doi.org/10.1186/s12888-025-07097-4
37. Almukhtar, N. M., & Alsaad, S. M. (2020). Quality of life in medical students with internet addiction. Journal of family medicine and primary care, 9(11), 5736–5740. https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_986_19

KARDİYOPULMONER REHABİLİTASYON ALANINDA YAPILAN LİSANSÜSTÜ TEZLERİN SİSTEMATİK İNCELENMESİ: BİR META-ANALİZ ÇALIŞMASI

Fzt Amirhosein JABBARİ NİARİ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Disiplinlerarası Kardiyopulmoner Fizyoterapi Anabilim Dalı, Samsun, **ORCID:** 0009-0004-3182-8676

Doç.Dr. Ercan TURAL

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Samsun, **ORCID:** 0000-0003-3894-7761

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de 2000–2026 yılları arasında kardiyopulmoner rehabilitasyon alanında gerçekleştirilen lisansüstü tezleri sistematik olarak incelemek, tezlerin genel özelliklerini ve araştırma eğilimlerini belirlemek ve klinik ve metodolojik açıdan karşılaştırılabilir veriye sahip çalışmaların sonuçlarını meta-analiz yöntemiyle değerlendirmektir.

Gereç ve Yöntem: Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nde "pulmoner rehabilitasyon", "kardiyopulmoner rehabilitasyon", "kardiyopulmoner fizyoterapi", "pulmoner fizyoterapi" ve "solunum fizyoterapisi" anahtar kelimeleri kullanılarak 2000–2026 yıllarını kapsayan tarama gerçekleştirildi. Dahil edilme kriterlerini karşılayan 95 benzersiz tez sistematik incelemeye alındı. Klinik ve metodolojik açıdan karşılaştırılabilir sonuçlar rastgele etkiler modeli kullanılarak meta-analiz edildi. Sürekli sonuçlar ortalama fark (MD) ve %95 güven aralığı (GA) ile ifade edildi; çalışmalar arası heterojenlik I^2 istatistiğiyle değerlendirildi.

Bulgular: İncelenen 95 tezin 78'i (%82,1) pulmoner, 17'si (%17,9) kardiyak/kardiyovasküler hasta gruplarında gerçekleştirilmişti. Tezlerin 37'si (%38,9) doktora, 31'i (%32,6) yüksek lisans ve 27'si (%28,4) tıpta uzmanlık teziydi. En sık çalışılan hasta grubu KOAH (n=37; %38,9) idi. Solunum fonksiyonlarının meta-analizinde müdahale grupları lehine FEV_1 için 0,17 L (%95 GA: 0,04–0,30; I^2=%66,4), FVC için 0,19 L (%95 GA: 0,10–0,27; I^2=%0), FEV_1 (% beklenen) için 4,33 yüzde puan (%95 GA: 1,35–7,31; I^2=%67,9), FVC (% beklenen) için 5,17 yüzde puan (%95 GA: 3,18–7,16; I^2=%0) ve FEV_1/FVC için 2,82 yüzde puan (%95 GA: 1,51–4,13; I^2=%0) birleşik ortalama fark elde edildi. Dört çalışmanın 6 Dakika Yürüme Testi (6DYT) sonuçlarının birleştirilmesiyle müdahale grupları lehine 45,51 m'lik birleşik ortalama fark bulundu (%95 GA: 14,24–76,78; I^2=%87,8). Solunum kas kuvvetini değerlendiren çalışmaların karşılaştırıcı müdahaleleri farklı olduğundan MİP ve MEP sonuçları destekleyici nicel analiz kapsamında değerlendirildi.

Sonuç: Türkiye'de kardiyopulmoner rehabilitasyon alanındaki lisansüstü tezlerin büyük bölümünün pulmoner hastalıklar ve özellikle KOAH üzerinde yoğunlaştığı görüldü. Nicel sentezlerde bazı solunum fonksiyonu ve egzersiz kapasitesi sonuçlarında müdahale grupları lehine bulgular elde edildi. Bununla birlikte çalışma sayılarının sınırlı olması ve bazı analizlerde yüksek heterojenlik bulunması sonuçların dikkatli yorumlanmasını gerektirmektedir. Daha az çalışılmış kardiyopulmoner hasta gruplarında araştırmaların artırılması ve meta-analize uygun istatistiksel verilerin standart biçimde raporlanması gelecekteki nicel sentezleri güçlendirebilir.

Anahtar Kelimeler: Kardiyopulmoner rehabilitasyon, pulmoner rehabilitasyon, fizyoterapi ve rehabilitasyon, sistematik inceleme, meta-analiz

SYSTEMATIC REVIEW OF GRADUATE EDUCATION THESES IN THE FIELD OF CARDIOPULMONARY REHABILITATION: A META-ANALYSIS STUDY

ABSTRACT

Objective: This study aimed to systematically review postgraduate theses conducted in the field of cardiopulmonary rehabilitation in Türkiye between 2000 and 2026, identify their general characteristics and research trends, and evaluate the results of studies providing clinically and methodologically comparable data using meta-analysis.

Materials and Methods: The Council of Higher Education National Thesis Center was searched for the period from 2000 to 2026 using the keywords “pulmonary rehabilitation,” “cardiopulmonary rehabilitation,” “cardiopulmonary physiotherapy,” “pulmonary physiotherapy,” and “respiratory physiotherapy.” A total of 95 unique theses meeting the eligibility criteria were included in the systematic review. Clinically and methodologically comparable outcomes were synthesized using random-effects meta-analysis. Continuous outcomes were expressed as mean differences (MDs) with 95% confidence intervals (CIs), and between-study heterogeneity was assessed using the I^2 statistic.

Results: Of the 95 theses included, 78 (82.1%) investigated pulmonary populations and 17 (17.9%) investigated cardiac/cardiovascular populations. Thirty-seven (38.9%) were doctoral theses, 31 (32.6%) were master's theses, and 27 (28.4%) were medical specialty theses. COPD was the most frequently investigated condition (n=37; 38.9%). Meta-analysis of pulmonary function outcomes showed pooled mean differences favoring the intervention groups of 0.17 L for FEV_1 (95% CI: 0.04–0.30; I^2=66.4%), 0.19 L for FVC (95% CI: 0.10–0.27; I^2=0%), 4.33 percentage points for FEV_1 % predicted (95% CI: 1.35–7.31; I^2=67.9%), 5.17 percentage points for FVC % predicted (95% CI: 3.18–7.16; I^2=0%), and 2.82 percentage points for FEV_1/FVC (95% CI: 1.51–4.13; I^2=0%). Pooling four studies assessing the 6-minute walk test resulted in a mean difference of 45.51 m favoring the intervention groups (95% CI: 14.24–76.78; I^2=87.8%). Because comparator interventions differed among studies evaluating respiratory muscle strength, MIP and MEP outcomes were evaluated in a supportive quantitative analysis.

Conclusion: Postgraduate research in cardiopulmonary rehabilitation in Türkiye was predominantly focused on pulmonary diseases, particularly COPD. Quantitative syntheses showed findings favoring intervention groups for several pulmonary function and exercise-capacity outcomes. However, the limited number of studies and substantial heterogeneity in some analyses require cautious interpretation. Greater representation of less frequently studied cardiopulmonary populations and more standardized statistical reporting may facilitate stronger quantitative syntheses in future research.

Keywords: Cardiopulmonary rehabilitation, pulmonary rehabilitation, physiotherapy and rehabilitation, systematic review, meta-analysis

INTRODUCTION

Cardiopulmonary diseases may be associated not only with adverse effects on the respiratory and cardiovascular systems but also with reduced exercise capacity, dyspnea, loss of muscle strength, limitations in activities of daily living, and impaired quality of life. Therefore, cardiopulmonary rehabilitation is considered a multidimensional approach that targets not only disease-related physiological parameters but also individuals' functional capacity and independence in daily life.

Pulmonary rehabilitation is a comprehensive intervention based on a thorough patient assessment followed by exercise training, education, and behavior change, designed to improve the physical and psychological condition of individuals with chronic respiratory disease and to promote long-term adherence to health-enhancing behaviors (Spruit et al., 2013). Current clinical practice recommendations also indicate that pulmonary rehabilitation is an important component in the management of various chronic respiratory diseases (Rochester et al., 2023).

Cardiac rehabilitation is a comprehensive and multidisciplinary approach that includes patient assessment, exercise training, cardiovascular risk factor management, psychosocial interventions, and promotion of physical activity in individuals with cardiovascular disease (Brown et al., 2024). Although pulmonary and cardiac rehabilitation programs target different patient populations, they share common rehabilitation goals, such as improving exercise capacity, promoting physical activity, and enhancing functional status.

Numerous postgraduate studies have been conducted in the field of cardiopulmonary rehabilitation across different patient populations, exercise approaches, respiratory muscle training methods, and physiotherapy interventions. However, differences among theses in terms of patient populations, interventions, assessment methods, and outcome measures may make it difficult to evaluate the accumulated scientific evidence collectively. A systematic examination of postgraduate theses may contribute to identifying the clinical areas in which research has been concentrated and those that have been studied less frequently.

Quantitative synthesis of studies that are sufficiently similar from clinical and methodological perspectives enables the assessment of the overall direction of effect, uncertainty, and between-study heterogeneity beyond the findings reported in individual studies. However, studies that are not sufficiently similar in terms of patient populations, interventions, comparators, and outcome measures should not be combined under a common effect estimate (Deeks et al., 2024).

The aim of this study was to systematically review postgraduate theses conducted in the field of cardiopulmonary rehabilitation in Türkiye between 2000 and 2026, to describe their general characteristics, patient populations, and research trends, and to evaluate the results of studies with clinically and methodologically comparable quantitative data using meta-analysis.

RESEARCH AND FINDINGS

Research Method

Theses published between 2000 and 2026 were searched in the Council of Higher Education National Thesis Center using the keywords “pulmonary rehabilitation,” “cardiopulmonary rehabilitation,” “cardiopulmonary physiotherapy,” “pulmonary physiotherapy,” and “respiratory physiotherapy.” When the same thesis was retrieved using more than one search term, duplicate records were deduplicated. Following title, abstract, and full-text assessments, 95 unique theses meeting the inclusion criteria were included in the systematic review. The PRISMA 2020 statement was taken into consideration in reporting (Page et al., 2021). Because the total number of records identified in the initial search, the number of duplicate records, and the numbers excluded at the selection stages had not been retained, these values were not retrospectively estimated.

Theses involving pulmonary, cardiac, or cardiopulmonary patient populations were included if their primary research question was directly related to cardiopulmonary physiotherapy and rehabilitation, pulmonary or cardiac rehabilitation, exercise training, respiratory muscle training, functional cardiopulmonary assessment, perioperative rehabilitation, or related rehabilitation outcomes. Studies with a primary population that was not cardiopulmonary were excluded unless a defined cardiac or pulmonary disease constituted the primary focus of the research. Psychometric studies, studies focusing solely on education, cost/economic studies, and pharmacological/analgesic studies whose primary research question was not directly related to cardiopulmonary physiotherapy and rehabilitation were also excluded. Thesis type alone was not used as an inclusion or exclusion criterion.

Publication year, university, thesis type, clinical field, patient/disease group, and basic study characteristics were extracted from the included theses. For quantitative synthesis, sample sizes, intervention and control groups, assessment time points, outcome measures, and means and standard deviations directly reported in the theses were recorded. In multi-arm studies, the necessary group combinations were performed using directly reported group data. Meta-analysis was conducted only for outcomes that were clinically and methodologically comparable. Data for which group mean changes and standard deviations of the changes were directly reported were prioritized. When the standard

deviation of the change was unavailable, it was not derived from baseline and final assessment standard deviations using an assumed correlation coefficient. FEV_1 and FVC values reported in liters and as percent predicted were analyzed separately. Pulmonary and cardiac studies were not combined within the same effect pool without clinical justification. In multi-arm studies, appropriate intervention arms were combined to prevent the shared control group from being used more than once.

Continuous outcomes were pooled using mean differences (MDs) and 95% confidence intervals (CIs). A random-effects model was used because of clinical and methodological differences. Between-study variance (τ^2) was estimated using the REML method, and heterogeneity was assessed using Cochran's Q test and the I^2 statistic (Deeks et al., 2024). The main results were reported using pooled effect estimates and 95% confidence intervals obtained from the REML random-effects model. Outcomes that were not appropriate for pooling under a common effect size were evaluated narratively.

General Characteristics of the Theses

A total of 95 unique theses meeting the inclusion criteria for the systematic review were evaluated. Of these, 78 (82.1%) were conducted in pulmonary patient populations and 17 (17.9%) in cardiac/cardiovascular patient populations. According to thesis type, 37 (38.9%) were doctoral theses, 31 (32.6%) were master's theses, and 27 (28.4%) were medical specialty theses.

Table 1. Distribution of theses included in the systematic review according to thesis type and clinical field

Characteristic	n	%
Thesis type		
Doctoral	37	38.9
Master's	31	32.6
Medical specialty	27	28.4
Total	95	100.0
Clinical field		
Pulmonary	78	82.1
Cardiac/cardiovascular	17	17.9
Total	95	100.0

When patient/disease groups were examined, COPD was the most frequently studied condition (n=37; 38.9%). This was followed by lung cancer/thoracic-pulmonary surgery (n=11; 11.6%), CABG/cardiac surgery (n=10; 10.5%), bronchiectasis/cystic fibrosis/primary ciliary dyskinesia (n=10; 10.5%), and interstitial lung disease/IPF/pulmonary sarcoidosis (n=8; 8.4%).

Table 2. Distribution of theses according to the main patient/disease groups

Patient/disease group	n	%
COPD	37	38.9
Lung cancer / thoracic-pulmonary surgery	11	11.6
CABG / cardiac surgery	10	10.5
Bronchiectasis / cystic fibrosis / primary ciliary dyskinesia	10	10.5
Interstitial lung disease / IPF / pulmonary sarcoidosis	8	8.4
Other cardiac/cardiovascular diseases	6	6.3
COVID / post-COVID	5	5.3
Asthma	4	4.2

Obstructive sleep apnea	2	2.1
Pulmonary arterial hypertension	1	1.1
Lung transplantation	1	1.1
Total	95	100.0*

The percentages sum to 99.9% because percentages for individual categories were rounded to one decimal place.

A total of 17 different universities were represented in the distribution of theses by university. The largest numbers of theses were conducted at the University of Health Sciences (n=14; 14.7%), Marmara University (n=13; 13.7%), and Hacettepe University (n=9; 9.5%).

Scope of the Quantitative Synthesis

Not all 95 theses included in the systematic review were included in the meta-analysis. Studies with clinically and methodologically comparable outcomes and the numerical data required to calculate the effect estimate were evaluated according to outcome measure. A total of eight unique theses contributed to at least one quantitative synthesis (Aydın, 2022; Bellur, 2012; Çil Akıncı, 2008; Çınar, 2024; Durutürk, 2013; Kaya, 2021; Saka, 2019; Vurur, 2023). Although the remaining theses were retained within the scope of the systematic review, they were not included in the relevant meta-analyses because the outcomes and/or the reported numerical data were not suitable for pooling under a common effect estimate.

Because the same thesis could provide data for more than one outcome measure, the number of studies included in the analyses differed according to the outcome. Four or five studies were included in the analyses of respiratory function, four studies in the 6MWT analysis, and three studies each in the supportive quantitative analyses of MIP and MEP.

Table 3. Main outcome measures evaluated within the scope of the meta-analysis

Outcome domain	Outcome measure	k	Effect measure	Analysis
Respiratory function	FEV_1 (L)	4	MD	Random effects
Respiratory function	FVC (L)	4	MD	Random effects
Respiratory function	FEV_1 (% predicted)	5	MD	Random effects
Respiratory function	FVC (% predicted)	5	MD	Random effects
Respiratory function	FEV_1/FVC	4	MD	Random effects
Exercise capacity	6MWT	4	MD	Random effects
Respiratory muscle strength	MIP	3	MD	Supportive quantitative analysis
Respiratory muscle strength	MEP	3	MD	Supportive quantitative analysis

Findings Related to Respiratory Function

Respiratory function outcomes were analyzed separately according to the units in which they were reported. FEV_1 and FVC values reported in liters and as percent predicted were not combined within the same analysis. FEV_1/FVC was evaluated as a separate outcome.

In the analysis of FEV_1 reported in liters, the pooled mean difference was +0.17 L (95% CI: 0.04 to 0.30) in favor of the intervention groups. Moderate-to-high between-study heterogeneity was observed (I^2=66.4%).

For FVC reported in liters, the pooled mean difference was +0.19 L (95% CI: 0.10 to 0.27) in favor of the intervention groups. No statistical heterogeneity was observed in this analysis (I^2=0%).

For FEV_1 expressed as percent predicted, the pooled mean difference was +4.33 percentage points (95% CI: 1.35 to 7.31) in favor of the intervention groups. Between-study heterogeneity was I^2=67.9%.

For FVC expressed as percent predicted, the pooled mean difference was +5.17 percentage points (95% CI: 3.18 to 7.16) in favor of the intervention groups, with I^2=0%.

In the FEV_1/FVC analysis, the pooled mean difference was +2.82 percentage points (95% CI: 1.51 to 4.13) in favor of the intervention groups. No statistical heterogeneity was observed (I^2=0%).

Table 4. Meta-analysis results for respiratory function outcomes

Outcome	k	Pooled MD	95% CI	I^2
FEV_1 (L)	4	+0.17 L	0.04 to 0.30	66.4%
FVC (L)	4	+0.19 L	0.10 to 0.27	0%
FEV_1 (% predicted)	5	+4.33 percentage points	1.35 to 7.31	67.9%
FVC (% predicted)	5	+5.17 percentage points	3.18 to 7.16	0%
FEV_1/FVC	4	+2.82 percentage points	1.51 to 4.13	0%

FEV_1: forced expiratory volume in one second; FVC: forced vital capacity; CI: confidence interval; MD: mean difference; k: number of studies included in the analysis.

Figure 1. Forest plot of the random-effects meta-analysis for FEV_1 (L) outcomes.

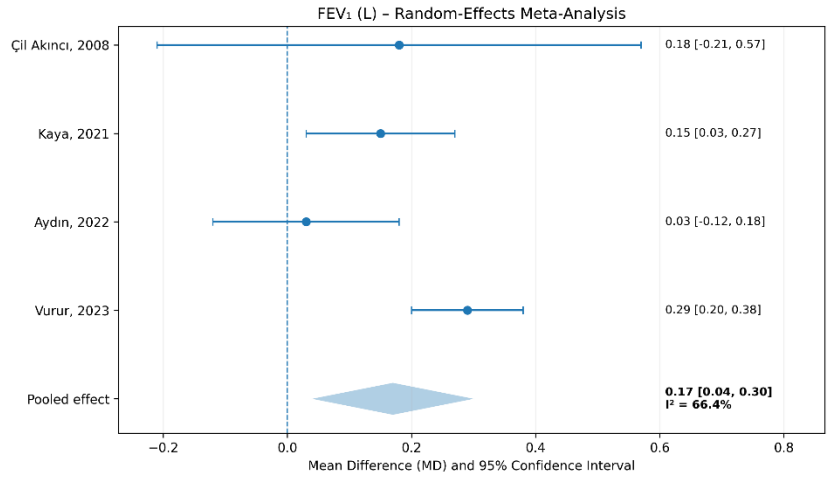


Figure 2. Forest plot of the random-effects meta-analysis for FVC (L) outcomes.

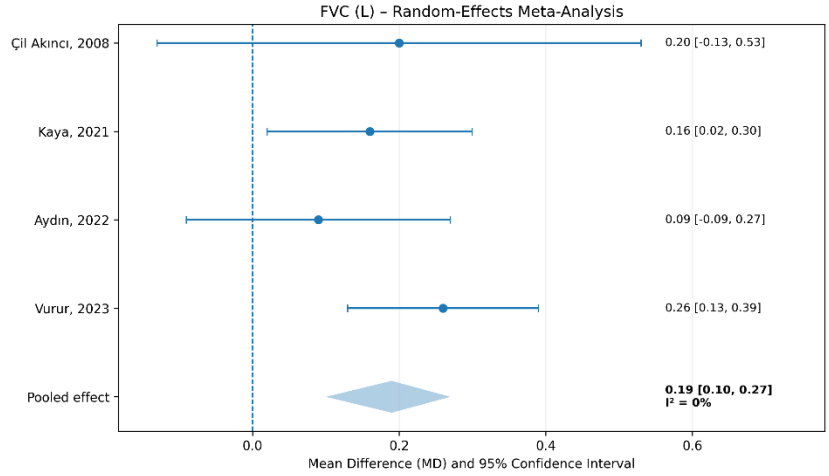


Figure 3. Forest plot of the random-effects meta-analysis for FEV_1 (% predicted) outcomes.

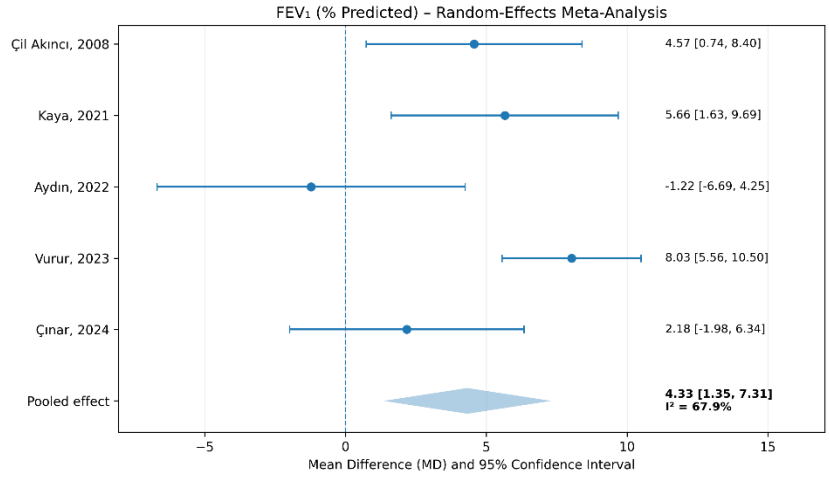


Figure 4. Forest plot of the random-effects meta-analysis for FVC (% predicted) outcomes.

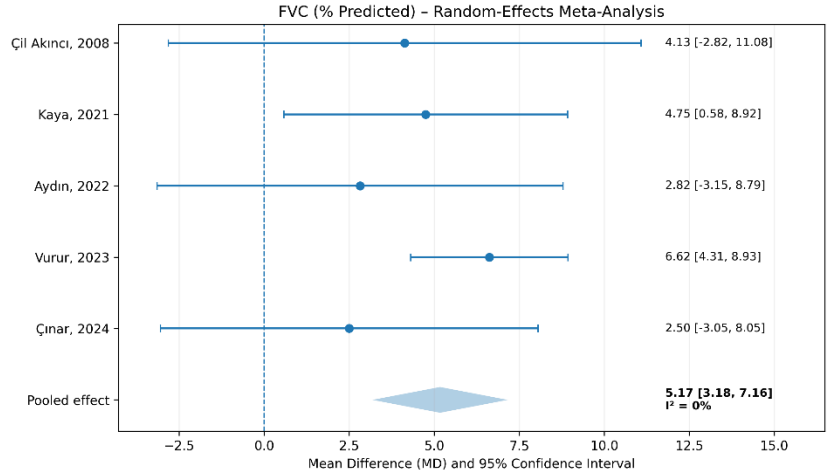
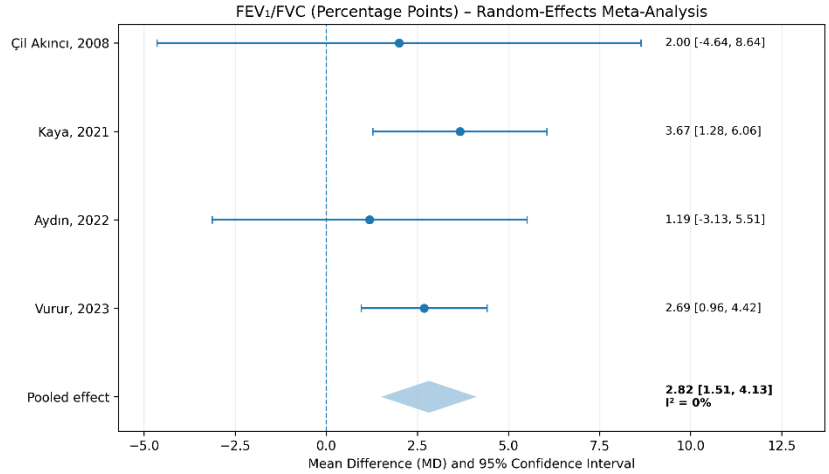


Figure 5. Forest plot of the random-effects meta-analysis for FEV₁/FVC outcomes.



Although the pooled effect estimates in the analyses of respiratory function outcomes favored the intervention groups, between-study variability differed according to the outcome measure. I^2 was 0% for FVC values reported in liters and as percent predicted and for FEV₁/FVC, whereas I^2 was 66.4% and 67.9% for FEV₁ values reported in liters and as percent predicted, respectively. Therefore, it is more appropriate to evaluate the respiratory function results according to each outcome measure rather than as a single overall effect.

Findings Related to Exercise Capacity

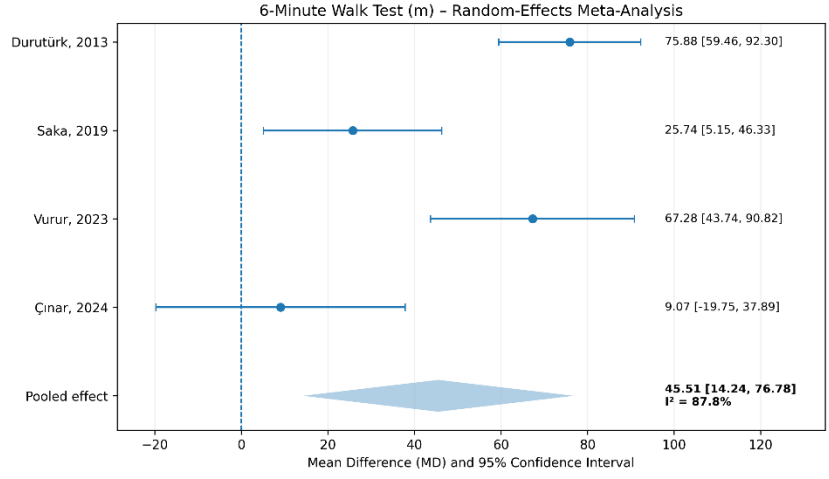
Four studies reporting the 6-minute walk test (6MWT) in a format suitable for quantitative synthesis were included in the meta-analysis. The pooled mean difference was +45.51 m (95% CI: 14.24 to 76.78) in favor of the intervention groups. High between-study heterogeneity was observed (I^2=87.8%).

Table 5. Meta-analysis result for the 6-minute walk test

Outcome	k	Pooled MD	95% CI	I^2
6MWT	4	+45.51 m	14.24 to 76.78	87.8%

6MWT: 6-minute walk test; CI: confidence interval; MD: mean difference; k: number of studies included in the analysis.

Figure 6. Forest plot of the random-effects meta-analysis for 6-minute walk test outcomes.



The I^2 value of 87.8% in the 6MWT analysis indicates a high level of variability in effect sizes across studies. Therefore, the pooled result should not be interpreted as indicating an effect of the same magnitude across all studies and patient groups. In addition, because no analysis based on a prespecified minimal clinically important difference threshold was performed in this study, no separate classification of clinical significance was made for the pooled mean difference of 45.51 m.

Findings Related to Respiratory Muscle Strength

MIP and MEP outcomes related to respiratory muscle strength were evaluated across three studies. Because the comparator interventions differed among the studies, these results were considered within the scope of a supportive quantitative analysis rather than as estimates of the primary treatment effect.

For MIP, the pooled mean difference was +45.51 cmH_2O (95% CI: 34.77 to 56.24) in favor of the intervention groups. High heterogeneity was observed (I^2=87.4%).

For MEP, the pooled mean difference was +30.45 cmH_2O (95% CI: 21.91 to 39.00) in favor of the intervention groups. No statistical heterogeneity was observed (I^2=0%).

Table 6. Supportive quantitative analysis results for respiratory muscle strength

Outcome	k	Pooled MD	95% CI	I^2
MIP	3	+45.51 cmH_2O	34.77 to 56.24	87.4%
MEP	3	+30.45 cmH_2O	21.91 to 39.00	0%

CI: confidence interval; MD: mean difference; MEP: maximal expiratory pressure; MIP: maximal inspiratory pressure; k: number of studies included in the analysis.

Because of the high heterogeneity in the MIP analysis and differences in comparator interventions across studies, these results should not be interpreted as a precise estimate of a single common treatment effect. Therefore, the MIP and MEP results were considered supportive findings.

Other Clinical Outcomes

Different clinical outcomes, including dyspnea, symptom burden, and health-related quality of life, were also evaluated in the theses reviewed. However, the measurement instruments used and statistical reporting formats differed across studies. In some theses, the absence of the standard deviation of change or other variance information required for quantitative synthesis also limited the possibility of conducting a common meta-analysis.

In particular, outcomes related to the St. George's Respiratory Questionnaire (SGRQ), COPD Assessment Test (CAT), and dyspnea were not combined in a common quantitative synthesis for these reasons and were evaluated narratively. As specified in the Methods, standard deviations of change that were not reported in the theses were not derived using assumed correlation coefficients.

Discussion of the Findings

Of the 95 theses reviewed in this study, 82.1% were conducted in pulmonary patient populations and 17.9% in cardiac/cardiovascular patient populations, indicating that the pulmonary field was more highly represented within the thesis pool examined. COPD ranked first among the patient groups, with 37 theses (38.9%), accounting for an important proportion of the concentration in the pulmonary field. However, because this study was not designed to investigate the reasons for this distribution, no causal inference was made regarding why pulmonary studies or COPD studies were more frequent.

Pulmonary rehabilitation is defined as a comprehensive approach that includes exercise training, education, and behavior change in chronic respiratory diseases (Rochester et al., 2023; Spruit et al., 2013). Systematic reviews of pulmonary rehabilitation in COPD have also reported findings favoring

rehabilitation in terms of exercise capacity and health-related quality of life (McCarthy et al., 2015). The fact that COPD was the most frequently studied patient group in the current thesis pool is consistent with the extensive attention given to this disease in the international pulmonary rehabilitation literature. However, this similarity should not be interpreted as a direct finding explaining the distribution of theses in Türkiye.

In the quantitative syntheses of respiratory function outcomes, the direction of the pooled effect estimates favored the intervention groups; however, between-study variability was not the same across outcomes. More consistent results were obtained for FVC in liters and as percent predicted and for FEV_1/FVC, whereas greater between-study variability was observed for FEV_1 in liters and as percent predicted. The effects of rehabilitation interventions should not be evaluated solely on the basis of spirometric parameters; other clinical outcomes, including exercise capacity, symptoms, functional status, and quality of life, should also be considered (Rochester et al., 2023; Spruit et al., 2013).

In the 6MWT meta-analysis of exercise capacity, the direction of the pooled effect favored the intervention groups. However, the high between-study heterogeneity indicates that the magnitude of the effect differed across studies. Systematic reviews evaluating pulmonary rehabilitation in COPD have also reported findings favoring rehabilitation in terms of exercise capacity (McCarthy et al., 2015). However, because the patient populations and interventions included in the present meta-analysis were not identical to those in the external literature, direct comparison of effect sizes is not appropriate.

In the supportive quantitative analyses of respiratory muscle strength, the direction of the MIP and MEP results favored the intervention groups. A systematic review evaluating the effects of inspiratory muscle training in individuals with COPD also reported favorable findings for inspiratory muscle strength (Beaumont et al., 2018). However, because comparator interventions differed across the current analyses and high heterogeneity was observed in the MIP analysis, the results should be interpreted within their own clinical and methodological context.

A distinction should be made between the number of theses included in the systematic review and the number contributing to the quantitative syntheses. All 95 theses constituted the dataset of the systematic review, whereas eight contributed to at least one quantitative synthesis. This does not mean that the remaining theses were excluded from the systematic review. Because quantitative synthesis requires sufficient comparability of the outcome measure and numerical data that allow calculation of an effect estimate, a more limited study pool for the meta-analysis is methodologically expected.

Limitations of the Study

This study has several limitations. The systematic review was limited to postgraduate theses from Türkiye that were identified through the five predefined search terms in the Council of Higher Education National Thesis Center and met the study criteria. In addition, patient populations, rehabilitation approaches, comparator interventions, and assessment methods differed across the theses.

The limited number of studies eligible for meta-analysis for some outcome measures and the high heterogeneity observed particularly in the 6MWT and MIP analyses should be taken into consideration when interpreting the pooled effect estimates. Differences in the outcome measures used and statistical reporting formats across the theses also prevented some clinical outcomes from being quantitatively pooled.

In some theses, insufficient reporting of change and variance data required for meta-analysis reduced the amount of data eligible for quantitative synthesis. Missing statistical values were not generated using assumption-based methods; outcomes that were not suitable for quantitative synthesis were retained in the narrative evaluation of the systematic review.

Because the total number of records identified in the initial search, the number of duplicate records, and the numbers excluded during the selection stages had not been retained, these values were not retrospectively estimated. Therefore, although the PRISMA 2020 reporting principles were taken into consideration, a complete PRISMA flow diagram including the numerical stages was not constructed.

CONCLUSION

In this systematic review and meta-analysis, 95 postgraduate theses conducted in the field of cardiopulmonary rehabilitation in Türkiye between 2000 and 2026 and meeting the inclusion criteria were evaluated. The majority of the theses were conducted in pulmonary patient populations, and COPD was identified as the most frequently studied patient group.

All 95 theses included in the systematic review were evaluated in terms of their descriptive characteristics and content, whereas eight unique theses with clinically and methodologically comparable data contributed to at least one quantitative synthesis. The number of studies included in the quantitative syntheses varied from three to five depending on the outcome measure.

In the quantitative syntheses of respiratory function and exercise capacity, the pooled effect estimates favored the intervention groups. However, particularly in the analyses of FEV_1, 6MWT, and MIP, between-study variability, together with the limited number of studies eligible for meta-analysis for some outcomes, requires cautious interpretation of the findings. The MIP and MEP results for respiratory muscle strength were considered supportive findings rather than precise estimates of the primary treatment effect because of differences in comparator interventions.

Differences among the theses in terms of patient populations, interventions, outcome measures, and statistical reporting formats limited the ability to evaluate some outcomes within a common quantitative synthesis. Increasing postgraduate research in the cardiac/cardiovascular field and in other less frequently represented cardiopulmonary patient populations, together with more standardized reporting of outcome measures and statistical data, may strengthen the scope and power of future systematic reviews and meta-analyses.

REFERENCES

Aydın, O. (2022). *İnterstisyel akciğer hastalarında solunum kas eğitiminin solunum parametreleri, fonksiyonel kapasite, denge ve yaşam kalitesi üzerine etkisi* [Doctoral dissertation, Bezmialem Vakıf University].

Beaumont, M., Forget, P., Couturaud, F., & Reychler, G. (2018). Effects of inspiratory muscle training in COPD patients: A systematic review and meta-analysis. *The Clinical Respiratory Journal, 12*(7), 2178–2188. https://doi.org/10.1111/crj.12905

Bellur, N. (2012). *Obstrüktif uyku apne sendromlu hastalarda inspiratuar kas eğitimi ve orofarengeal egzersiz eğitiminin etkilerinin karşılaştırılması* [Master's thesis, Hacettepe University].

Brown, T. M., Pack, Q. R., Aberegg, E., Brewer, L. C., Ford, Y. R., Forman, D. E., Gathright, E. C., Khadanga, S., Ozemek, C., & Thomas, R. J. (2024). Core components of cardiac rehabilitation programs: 2024 update: A scientific statement from the American Heart Association and the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation. *Circulation, 150*(18), e328–e347. https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000001289

Çil Akıncı, A. (2008). *KOAH'lı hastalara uygulanan pulmoner rehabilitasyonun fiziksel ve psikolojik parametrelere etkisi* [Doctoral dissertation, Marmara University].

Çınar, B. (2024). *Kistik fibrozisli çocuk ve adölesanlarda solunum fizyoterapisine ilave edilen hippoterapi simülatörünün etkinliğinin araştırılması* [Doctoral dissertation, İstanbul University-Cerrahpaşa].

Deeks, J. J., Higgins, J. P. T., Altman, D. G., McKenzie, J. E., & Veroniki, A. A. (2024). Analysing data and undertaking meta-analyses. In J. P. T. Higgins, J. Thomas, J. Chandler, M. Cumpston, T. Li, M. J. Page, & V. A. Welch (Eds.), *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions* (Version 6.5, Chapter 10). Cochrane.

Durutürk, N. (2013). *Kronik obstrüktif akciğer hastalığı olan hastalarda bisiklet ergometresi ile kalistenik egzersiz eğitiminin karşılaştırılması* [Doctoral dissertation, Hacettepe University].

Kaya, M. (2021). *Kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) olan hastalarda yaratıcı dans temelli egzersiz eğitiminin solunum, denge ve kognitif fonksiyonlar, solunum ve periferik kas kuvveti ve fonksiyonel kapasite üzerine etkisi* [Doctoral dissertation, Bezmialem Vakıf University].

McCarthy, B., Casey, D., Devane, D., Murphy, K., Murphy, E., & Lacasse, Y. (2015). Pulmonary rehabilitation for chronic obstructive pulmonary disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (2), CD003793. https://doi.org/10.1002/14651858.CD003793.pub3

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

Rochester, C. L., Alison, J. A., Carlin, B., Jenkins, A. R., Cox, N. S., Bauldoff, G., Bhatt, S. P., Bourbeau, J., Burtin, C., Camp, P. G., Cascino, T. M., Dorney Koppel, G. A., Garvey, C., Goldstein, R., Harris, D., Houchen-Wolloff, L., Limberg, T., Lindenauer, P. K., Moy, M. L., … Holland, A. E. (2023). Pulmonary rehabilitation for adults with chronic respiratory disease: An official American Thoracic Society clinical practice guideline. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 208*(4), e7–e26. https://doi.org/10.1164/rccm.202306-1066ST

Saka, S. (2019). *Kronik obstrüktif akciğer hastalığında inspiratuar kas eğitiminin dispne nedeniyle hareket korkusuna etkisinin değerlendirilmesi* [Doctoral dissertation, Bezmialem Vakıf University].

Spruit, M. A., Singh, S. J., Garvey, C., ZuWallack, R., Nici, L., Rochester, C., Hill, K., Holland, A. E., Lareau, S. C., Man, W. D.-C., Pitta, F., Sewell, L., Raskin, J., Bourbeau, J., Crouch, R., Franssen, F. M. E., Casaburi, R., Vercoulen, J. H., Vogiatzis, I., … Wouters, E. F. M. (2013). An official American Thoracic Society/European Respiratory Society statement: Key concepts and advances in pulmonary rehabilitation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 188*(8), e13–e64. https://doi.org/10.1164/rccm.201309-1634ST

Vurur, S. (2023). *Kronik obstrüktif akciğer hastalıklarında dirençli proprioseptif nöromusküler fasilitasyon egzersizlerinin solunum kas kuvvetine etkisi* [Doctoral dissertation, İstanbul Medipol University].

NÖROLOJİK ACİL DURUMLARDA BİLGİLENDİRİLMİŞ ONAMIN ALGORİTMİK VE ANLAMSAL DENETİMİ; BÜYÜK DİL MODELLERİ VE EVRENSEL SAĞLIK İLETİŞİMİ İNDEKSİ İLE ÇOK BOYUTLU BİR DEĞERLENDİRME

Dr. Öğr.Üyesi Cihat ÖZGÜNCÜ

Selcuk University, Faculty of Medicine, Department of Neurology, 42130 Selçuklu, Konya

ORCID ID: 0000-0001-7755-9409

ÖZET

Akut nörolojik acil durumlar; sıklıkla bilinç durumu değişikliği, bilişsel bozukluklar veya ciddi duygusal sıkıntı yaşayan hastaları kapsar ve bu durumlar, hastaların standart sağlık bilgilendirmelerini anlama becerisini kritik ölçüde zayıflatır. Bu çalışma, Evrensel Sağlık İletişimi Endeksi (UHCI) algoritmik çerçevesini kullanarak, yüksek riskli nörolojik girişimlerde kullanılan standart Türkçe onam formlarının anlaşılırlığını, etik titizliğini ve klinik yeterliliğini sistematik olarak değerlendirmektedir.

Türk Nöroloji Derneği'nin resmi web sitesinden beş resmi onam formu —İntravenöz Doku Plazminojen Aktivatörü (IV tPA), Lomber Ponksiyon (LP), Terapötik Plazma Değişimi (PE), İntravenöz Metilprednizolon (IVMP) ve İntravenöz İmmünoglobulin (IVIG)— temin edilmiş ve UHCI algoritması kullanılarak sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Algoritma; her bir belgeyi Erişilebilirlik, Şeffaflık, Özerklik, Sistem Yükü ve Tıbbi Yeterlilik olmak üzere beş temel boyut ve 17 alt parametrede incelemiştir. Tıbbi yeterlilik ve kritik eksikliklerin varlığı, UpToDate klinik altın standartları ile kıyaslanmıştır. Akut bilişsel stres altındaki hasta deneyimini simüle etmek amacıyla; algılanan kaygı, zorlama ve iletişim boşluklarını nicelleştirmek için Büyük Dil Modelleri (LLM'ler) tarafından oluşturulan, 8. sınıf okuryazarlık düzeyine sahip otonom hasta/vekil kişilikler kullanılmıştır.

Ortalama genel UHCI puanı 62,69 ± 4,23 olarak saptanmıştır. Yüksek perplexity düzeyi ve %49'u aşan ortalama nadir kelime kullanım oranıyla kanıtlandığı üzere, erişilebilirlik belirgin bir sistemsel engel (Ortalama: 41,50 ± 1,38) nedeniyle kısıtlanmıştır. Kelime sayılarının azlığı sayesinde Sistem Yükü boyutu neredeyse optimal puanlara (99,42 ± 1,16) ulaşmıştır. Bununla birlikte, beş belgeden dördü, hayati tehlike arz eden komplikasyonlara yer vermemeleri nedeniyle ciddi şeffaflık puanı kayıplarına (-%30) uğramış; ciddi risk eşleşme oranları IVMP'de %18,2, IV tPA ve IVIG'de ise %33,3 olarak gerçekleşmiştir. Özerklik boyutu önemli ölçüde değişkenlik göstermiş (Ortalama: 51,92 ± 20,08); IV tPA formu kurumsal zorlamayı yansıtırken (baskı puanı 0,91'e karşılık seçim puanı 0,02; Özerklik: 1,8), LP formu doğrudan hasta katılımından yoksun kalmıştır (sosyal mesafe: 0,0). Simüle edilmiş kişilikler, 10 üzerinden ortalama 8,4'lük bir kaygı puanı ile belirgin düzeyde akut sıkıntı bildirdi.

Güncel acil durum onam formları, kriz iletişimi için etkili araçlar olmaktan ziyade öncelikle yasal güvenceler işlevi görmekte; bu durum da hassas durumdaki hastalar ve onların yasal temsilcileri üzerinde aşırı bilişsel yük oluşturmaktadır. Algoritmik ve Doğal Dil İşleme (NLP) tabanlı denetim yöntemleri, akut durumlara yönelik bilgilendirilmiş onam sürecinin; hem etik hem de iletişimsel standartları gözeten, uygulanabilir ve hasta odaklı formatlarda yeniden yapılandırılması için sağlam ve nesnel bir temel sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Nörolojik aciller, Bilgilendirilmiş Onam, Doğal Dil İşleme, Büyük Dil Modelleri, Sağlık İletişimi

ALGORITHMIC SEMANTIC AUDITING OF INFORMED CONSENT IN NEUROLOGICAL EMERGENCIES: A MULTI_DIMENSIONAL EVALUATION WITH LARGE LANGUAGE MODELS AND THE UNIVERSAL HEALTH COMMUNICATION INDEX

ABSTRACT

Acute neurological emergencies often involve patients experiencing altered mental status, cognitive deficits, or significant emotional distress, all of which critically undermine their ability to comprehend even standard health communications. This study systematically evaluates the comprehensibility, ethical rigor, and clinical adequacy of standard Turkish consent forms employed in high-risk neurological interventions through application of the Universal Health Communication Index (UHCI) algorithmic framework.

Five official consent forms—Intravenous Tissue Plasminogen Activator (IV tPA), Lumbar Puncture (LP), Therapeutic Plasma Exchange (PE), Intravenous Methylprednisolone (IVMP), and Intravenous Immunoglobulin (IVIG)—were obtained from the Turkish Neurological Society's official website and systematically evaluated using the UHCI algorithm. The algorithm audited each document across five principal dimensions: Accessibility, Transparency, Autonomy, System Burden, and Medical Adequacy. We benchmarked medical adequacy and the presence of critical omissions against UpToDate clinical gold standards. To simulate patient experience under acute cognitive stress, we used autonomous patient/proxy personas at an 8th-grade literacy level, generated by Large Language Models (LLMs), to quantify perceived anxiety, coercion, and communication gaps.

The mean overall UHCI score was 62.69 ± 4.23. Accessibility was uniformly constrained by a pronounced systemic barrier (Mean: 41.50 ± 1.38), as evidenced by elevated perplexity and an average rare vocabulary rate exceeding 49%. System Burden achieved near-optimal scores (99.42 ± 1.16) due to concise word counts. Nevertheless, four of five documents incurred substantial transparency penalties (-30%) for omitting life-threatening complications, with serious risk matching rates of 18.2% in IVMP and 33.3% in IV tPA and IVIG. Autonomy exhibited considerable variance (Mean: 51.92 ± 20.08), with IV tPA reflecting institutional coercion (pressure score 0.91 vs. choice score 0.02; Autonomy: 1.8) and the LP form lacking direct patient engagement (social distance: 0.0). Simulated personas reported pronounced acute distress, with a mean anxiety score of 8.4/10.

Contemporary emergency consent forms primarily serve as legal safeguards rather than as effective tools for crisis communication, thereby imposing excessive cognitive demands on vulnerable patients and their proxies. Algorithmic NLP-based auditing offers a robust, objective foundation for restructuring acute informed consent into actionable, patient-centered formats that uphold both ethical and communicative standards.

Keywords: Neurological Emergencies, Informed Consent, Natural Language Processing, Large Language Models, Health Communication

1. INTRODUCTION

Informed consent is a fundamental ethical and legal principle in contemporary clinical practice, safeguarding patient autonomy through clear, comprehensive communication of procedural risks, therapeutic alternatives, and clinical indications (Emanuel, 2000). Nevertheless, implementing valid informed consent in emergent clinical scenarios presents significant obstacles (Moskop, 1999) . Acute neurological emergencies—such as ischemic stroke, status epilepticus, or severe neuroimmunological relapses—impose substantial cognitive and emotional demands on both patients and their surrogate decision-makers(Appelbaum, 2007). These conditions often manifest with acute encephalopathy, aphasia, cognitive impairment, or severe anxiety, all of which markedly diminish an individual's ability to assimilate complex health information within restricted therapeutic time frames (Kim et al., 2002). In such urgent contexts, medical communication must remain clear and linguistically accessible to

prevent the process from devolving into a mere administrative requirement (Kripalani et al., 2008; Moskop, 1999).

Despite a widespread bioethical consensus that prioritizes patient-centered communication, standard informed consent documents remain predominantly legalistic and defensive in nature (Nishimura et al., 2013). Comprehensive health literacy assessments indicate that most hospital consent forms require literacy competencies well above those of the general population, often incorporating complex, polysyllabic terminology, context-deficient procedural explanations, and intricate syntactic constructions (Paasche-Orlow et al., 2003) (Berkman et al., 2011). When healthcare documents exceed established readability thresholds, vulnerable patient populations become more prone to passive acquiescence, often endorsing forms without fully understanding the associated procedural risks (Kripalani et al., 2008), (Fang et al., 2006). In acute neurology, this issue creates significant bioethical tension: although clinicians must perform urgent interventions such as intravenous thrombolysis, plasma exchange, or emergent lumbar puncture, the explanatory materials they provide may inadvertently alienate the patients they are ethically and legally obliged to inform (Moskop, 1999) (Kim et al., 2002).

Recent developments in natural language processing (NLP) and Large Language Models (LLMs) have introduced scalable methodologies that overcome the limitations of traditional, static readability metrics (Rajpurkar et al., 2022; Thirunavukarasu et al., 2023). While conventional indices—such as Flesch-Kincaid and SMOG—primarily assess superficial lexical features, including syllable count and sentence length, LLM-based computational frameworks facilitate comprehensive semantic analyses, enable advanced technologies to permit autonomous quantification of domain-specific jargon density, syntactic compliance, and communicative discontinuities, and allow for benchmarking clinical content against standardized, evidence-based guidelines (Singhal et al., 2023; Thirunavukarasu et al., 2023) . Additionally, LLM-driven autonomous persona simulations, tailored to varying literacy and stress profiles, enable systematic modeling of patient comprehension challenges, perceived anxiety, and information retention in acute medical settings (Argyle et al., 2023; Rajpurkar et al., 2022) .

Although computational linguistic methodologies have increasingly been used to analyze general consumer health materials, their use in standardized informed consent protocols for neurological emergencies remains insufficiently explored (Ayers et al., 2023) . Official consent templates developed by national professional societies frequently serve as institutional benchmarks across tertiary healthcare centers, yet the multidimensional communicative efficacy of these documents has seldom undergone rigorous algorithmic evaluation. To bridge this gap, the present study employs the Universal Health Communication Index (UHCI)—an innovative, multidimensional NLP-based framework—to systematically assess official emergency neurological informed consent forms across five principal parameters: Accessibility, Transparency, Autonomy, System Burden, and Medical Adequacy. By benchmarking procedural disclosures against authoritative clinical standards and simulating crisis-level patient interactions, this research seeks to identify persistent systemic communication barriers and propose an evidence-based framework to improve cognitive alignment in emergency medical documentation.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study Design and Document Selection

This study employed a natural language processing (NLP) and computational linguistics approach to systematically evaluate informed consent forms utilized in acute neurological emergencies. Five official consent documents published by the Turkish Neurological Society (TNS) were obtained from the society's official repository and included the following interventions:

- Intravenous Tissue Plasminogen Activator (IV tPA) for hyperacute ischemic stroke

- Diagnostic Lumbar Puncture (LP) for acute neuro-infectious or vascular emergencies

- Therapeutic Plasma Exchange (PE) for acute neuromuscular or neuroimmunological crises

- High-Dose Intravenous Methylprednisolone (IVMP) for acute demyelinating relapses; - Intravenous Immunoglobulin (IVIG) for acute immune-mediated neurological crises

We stripped all documents of administrative components (e.g., signature lines, institutional headers) and preprocessed them to standardize them for subsequent linguistic analysis.

2.2. Universal Health Communication Index (UHCI) Evaluation

We evaluated documents using the Universal Health Communication Index (UHCI), a specialized algorithmic framework designed for multidimensional analysis of medical texts. The UHCI assesses documents across five principal domains, comprising 17 sub-parameters:

- Accessibility: surface readability formulas, syntactic perplexity distribution of, rare vocabulary (Zipf's law), and typographic scannability

- Transparency: Mmedical jargon density, affective sentiment distribution, simulated emotional distress, andpenalties for omission of critical complications

- Autonomy: Syntactic voice (passive constructions), social distance, choice architecture markers, and linguistic markers of paternalism

- System Burden: Administrative shielding, word count, and total cognitive processing duration including reading and question-formulation time

- Medical Adequacy: Completeness of clinical content benchmarked against evidence-based gold standards

Clinical Gold Standard Benchmarking and Persona Simulations: For each intervention, we extracted relevant clinical gold standards from UpToDate point-of-care clinical topics and Lexicomp monographs to establish reference benchmarks for content adequacy. We semantically mapped each document's content to these benchmarks to identify omissions of life-threatening complications and procedural risks.

Additionally, an autonomous Large Language Model (LLM) persona—calibrated to an eighth-grade literacy level and conditioned for acute emotional distress—simulated real-time crisis interactions. This agent performed automated gap analysis (generating clarification questions to expose information deficits) and cognitive retention audits (evaluating recall of critical procedural hazards). Domain-specific and composite global scores (0–100) were calculated for all forms, and descriptive statistics (mean ± standard deviation) were reported.

2.3. Ethical Considerations

Because the study analyzed only publicly available institutional documents using computational simulations and did not involve human participants, patient records, or identifiable clinical data, formal institutional review board (IRB) approval was not required.

3. RESULTS

Table 1 summarizes the findings of the Universal Health Communication Index (UHCI) assessment for the five acute neurological informed consent forms. The mean overall UHCI composite score across all analyzed documents was 62.69 ± 4.23 (range: 57.98–68.62).

Accessibility domain scores were consistent across documents, with a mean of 41.50 ± 1.38. Turkish-adapted surface readability metrics indicated that all texts were difficult to read, as reflected by Ateşman scores between 38.8 (IVIG) and 62.4 (IV tPA) and Çetinkaya-Uzun scores between 27.1 (IVIG) and 36.2 (IV tPA). Algorithmic perplexity values ranged from 63.92 (LP) to 88.69 (IVMP), and the proportion of rare vocabulary (Zipf analysis) exceeded 45% in all documents (range: 45.8%–50.9%). Visual design and typographic scannability scores varied from 25.0 to 50.0.

In the Transparency domain, the mean score was 50.00 ± 10.65. Four documents (IVMP, PE, IV tPA, and IVIG) incurred significant penalty deductions (−30%) for omitting critical procedural complications, resulting in Transparency scores below 50.0. Only the LP document maintained an unpenalized score (68.00). Medical jargon density ranged from 0.9% (IVMP, 4 terms) to 3.4% (PE, 14 terms). Simulated persona anxiety levels under crisis conditions ranged from 7.0 to 9.0 out of 10, corresponding to domain anxiety sub-scores between 10.0 and 30.0.

Autonomy domain scores demonstrated the greatest variability, with a mean of 51.92 ± 20.08 (range: 23.97–78.23). The proportion of passive voice constructions varied from 14.3% to 20.7% across the forms. Coercion analysis revealed a choice score of 0.02 versus a pressure score of 0.91 for IV tPA (autonomy sub-score: 1.8), while PE demonstrated a choice score of 0.52 versus a pressure score of 0.20 (autonomy sub-score: 71.8). Social distance assessments indicated a complete absence of first-person framing in the LP document (score: 0.0).

System Burden domain scores were uniformly high for all forms, with a mean value of 99.42 ± 1.16. Total document lengths ranged from 228 words (IV tPA) to 716 words (LP). Estimated reading times spanned from 2.3 minutes (IV tPA) to 7.2 minutes (LP), and question-formulation intervals ranged from 2.5 minutes (IVMP) to 10.8 minutes (IVIG). No institutional legal defense phrases were identified in any document.

In the Medical Adequacy domain, the mean score was 70.56 ± 10.35, with scores ranging from 53.67 (IVMP) to 81.52 (IVIG). Alignment with clinical gold-standard items varied substantially: IV tPA 30.2%, PE 50.0%, IVMP 59.2%, LP 62.5%, and IVIG 72.5%. Disclosure rates for serious risks and complications were below the 50% threshold in IVMP (18.2%), IV tPA (33.3%), and IVIG (33.3%). Gap analysis deductions were applied for LP (−40 points; unaddressed post-dural puncture headache duration and analgesia), IVIG (−25 points; unaddressed risks of stroke and renal toxicity), PE (−20 points; pneumothorax risks), and IV tPA (−5 points; decision-time constraints). Critical risk retention auditing was successful for LP, PE, IV tPA, and IVIG (scores: 100.0), but not for IVMP (score: 0.0).

Table 1. Multidimensional Universal Health Communication Index (UHCI) domain scores and aggregate evaluations of standard acute neurological informed consent forms.

Intervention Document	Accessibility	Transparency	Autonomy	System Burden	Medical Adequacy	Overall UHCI Score
High-Dose Intravenous Methylprednisolone (IVMP)	39.75	49.00*	55.58	100.00	53.67	57.98
Diagnostic Lumbar Puncture (LP)	43.43	68.00	23.97	97.35	73.00	61.41
Therapeutic Plasma Exchange (PE)	40.98	48.15*	78.23	100.00	74.00	68.62
Intravenous Tissue Plasminogen Activator (IV tPA)	41.23	44.47*	44.21	100.00	70.59	60.10
Intravenous Immunoglobulin (IVIG)	42.12	40.39*	57.59	99.75	81.52	65.33
Mean ± SD	41.50 ± 1.38	50.00 ± 10.65	51.92 ± 20.08	99.42 ± 1.16	70.56 ± 10.35	62.69 ± 4.23

* Denotes the application of an automated -30% omission penalty in the Transparency domain due to critical failure in serious complication disclosure (<50% clinical benchmark matching).

4. DISCUSSION

This study presents a comprehensive, multi-dimensional algorithmic assessment of official informed consent documents employed in acute neurological emergencies, revealing that current standardized templates do not meet the required standards for communicative effectiveness and ethical adequacy (Hall et al., 2012). Use of the Universal Health Communication Index (UHCI), benchmarked against UpToDate point-of-care clinical standards, highlights an ongoing conflict between institutional risk management priorities and the imperative for patient-centered crisis communication.

4.1. Principal Findings

The principal empirical outcome of this study is the marked structural divergence observed across fundamental communication domains. System Burden scores were consistently high across all forms (Mean: 99.42 ± 1.16), driven by concise document length; however, Accessibility scores remained critically low (Mean: 41.50 ± 1.38), mainly due to high syntactic complexity and a prevalence of rare vocabulary exceeding 45%. Notably, four of the five consent documents received substantial transparency penalties (−30%) because they insufficiently disclosed major procedural risks, with serious risk alignment rates as low as 18.2% for IVMP and 33.3% for IV tPA and IVIG. Moreover, simulated patient personas subjected to acute cognitive stress demonstrated significant distress (anxiety scores up to 9.0/10), underscoring persistent communication gaps concerning procedural aftercare and unreported morbidities.

4.2. Implications for Theory and Bioethics

From a theoretical standpoint, these findings illuminate a "defensive transparency paradox" in emergency medical communication. Prevailing bioethical frameworks assume written consent secures patient autonomy through comprehensive, rational deliberation (Manson & O'Neill, 2007). In contrast, when emergent clinical settings converge with acute neurological impairments—such as cognitive dysfunction, aphasia, or heightened surrogate distress—condensed, legalistic consent documents fail to enhance autonomy; instead, they shift institutional liability onto vulnerable decision-makers (Quill & Brody, 1996).

This phenomenon is exemplified by the notably low Autonomy scores observed in the IV tPA protocol (1.8 out of 100), where coercive linguistic elements outweighed features supporting informed choice. Conventional readability indices (e.g., Flesch-Kincaid, SMOG) have traditionally masked these ethical shortcomings by favoring lexical brevity (Wang et al., 2013). The present findings show that brevity achieved by omitting critical complications fosters a false perception of simplicity, impeding the substantive understanding required for valid informed consent (Jefford & Moore, 2008).

4.3. Implications for Clinical Practice and Health Policy

In clinical practice, professional neurological societies must move beyond static, liability-oriented templates and adopt dynamically tiered communication frameworks (Schenker et al., 2011). In hyperacute medical settings, consent forms should clearly differentiate between immediate procedural risks and secondary technical details. Incorporating standardized visual aids, structured risk-frequency metrics, and plain-language summaries may significantly reduce cognitive load and acute anxiety while maintaining the necessary level of clinical detail (Garcia-Retamero & Cokely, 2013).

Additionally, routinely integrating natural language processing-based audits into institutional review protocols will enable clinical governance bodies to systematically benchmark informed consent documents against current point-of-care evidence before widespread implementation (Haug & Drazen, 2023).

4.4. Limitations and Future Directions

This study has certain limitations. First, the analysis was limited to five emergency neurological consent forms produced by a single national neurological society, which may constrain the generalizability of the findings across different legal and healthcare contexts. Second, while LLM-driven persona simulations provide standardized, reproducible measures of cognitive stress and linguistic gap analysis, they remain computational proxies and do not fully capture the physiological and contextual nuances inherent to real-time clinical interactions (Lee et al., 2023).

Future research should incorporate prospective clinical studies assessing real-time patient and surrogate comprehension, decisional regret, and physiological stress markers during emergency consent encounters. Comparative, transnational investigations evaluating acute consent documentation across diverse regulatory environments may further refine and validate algorithmic auditing frameworks (Grady, 2015).

5. CONCLUSION

Contemporary acute neurological informed consent forms predominantly prioritize institutional liability protection over effective crisis communication, thereby imposing substantial cognitive demands on vulnerable patients and their surrogates. The integration of multi-dimensional algorithmic audit methodologies offers an objective and scalable framework to identify and address critical disclosure deficiencies, facilitating the evolution of emergency medical documentation toward authentic patient-centered care.

REFERENCES

Appelbaum, P. S. (2007). Assessment of Patients' Competence to Consent to Treatment. *New England Journal of Medicine*, *357*(18), 1834–1840. https://doi.org/10.1056/NEJMcp074045

Argyle, L. P., Busby, E. C., Fulda, N., Gubler, J. R., Rytting, C., & Wingate, D. (2023). Out of One, Many: Using Language Models to Simulate Human Samples. *Political Analysis*, *31*(3), 337–351. https://doi.org/10.1017/pan.2023.2

Ayers, J. W., Poliak, A., Dredze, M., Leas, E. C., Zhu, Z., Kelley, J. B., Faix, D. J., Goodman, A. M., Longhurst, C. A., Hogarth, M., & Smith, D. M. (2023). Comparing Physician and Artificial Intelligence Chatbot Responses to Patient Questions Posted to a Public Social Media Forum. *JAMA Internal Medicine*, *183*(6), 589. https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2023.1838

Berkman, N. D., Sheridan, S. L., Donahue, K. E., Halpern, D. J., & Crotty, K. (2011). Low Health Literacy and Health Outcomes: An Updated Systematic Review. *Annals of Internal Medicine*, *155*(2), 97–107. https://doi.org/10.7326/0003-4819-155-2-201107190-00005

Emanuel, E. J. (2000). What Makes Clinical Research Ethical? *JAMA*, *283*(20), 2701. https://doi.org/10.1001/jama.283.20.2701

Fang, M. C., Machtinger, E. L., Wang, F., & Schillinger, D. (2006). Health literacy and anticoagulation-related outcomes among patients taking warfarin. *Journal of General Internal Medicine*, *21*(8), 841–846. https://doi.org/10.1111/j.1525-1497.2006.00537.x

Garcia-Retamero, R., & Cokely, E. T. (2013). Communicating Health Risks With Visual Aids. *Current Directions in Psychological Science*, *22*(5), 392–399. https://doi.org/10.1177/0963721413491570

Grady, C. (2015). Enduring and Emerging Challenges of Informed Consent. *New England Journal of Medicine*, *372*(9), 855–862. https://doi.org/10.1056/NEJMra1411250

Hall, D. E., Prochazka, A. V., & Fink, A. S. (2012). Informed consent for clinical treatment: Figure 1: *Canadian Medical Association Journal*, *184*(5), 533–540. https://doi.org/10.1503/cmaj.112120

Haug, C. J., & Drazen, J. M. (2023). Artificial Intelligence and Machine Learning in Clinical Medicine, 2023. *New England Journal of Medicine*, *388*(13), 1201–1208. https://doi.org/10.1056/NEJMra2302038

Jefford, M., & Moore, R. (2008). Improvement of informed consent and the quality of consent documents. *The Lancet Oncology*, *9*(5), 485–493. https://doi.org/10.1016/S1470-2045(08)70128-1

Kim, S. Y. H., Karlawish, J. H. T., & Caine, E. D. (2002). Current State of Research on Decision-Making Competence of Cognitively Impaired Elderly Persons. *The American Journal of Geriatric Psychiatry*, *10*(2), 151–165. https://doi.org/10.1097/00019442-200203000-00006

Kripalani, S., Bengtzen, R., Henderson, L. E., & Jacobson, T. A. (2008). Clinical research in low-literacy populations: using teach-back to assess comprehension of informed consent and privacy information. *IRB*, *30*(2), 13–19.

Lee, P., Bubeck, S., & Petro, J. (2023). Benefits, Limits, and Risks of GPT-4 as an AI Chatbot for Medicine. *The New England Journal of Medicine*, *388*(13), 1233–1239. https://doi.org/10.1056/NEJMsr2214184

Manson, N. C., & O'Neill, O. (2007). *Rethinking Informed Consent in Bioethics*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511814600

Moskop, J. C. (1999). INFORMED CONSENT IN THE EMERGENCY DEPARTMENT. *Emergency Medicine Clinics of North America*, *17*(2), 327–340. https://doi.org/10.1016/S0733-8627(05)70062-6

Nishimura, A., Carey, J., Erwin, P. J., Tilburt, J. C., Murad, M. H., & McCormick, J. B. (2013). Improving understanding in the research informed consent process: a systematic review of 54 interventions tested in randomized control trials. *BMC Medical Ethics*, *14*(1), 28. https://doi.org/10.1186/1472-6939-14-28

Paasche-Orlow, M. K., Taylor, H. A., & Brancati, F. L. (2003). Readability Standards for Informed-Consent Forms as Compared with Actual Readability. *New England Journal of Medicine*, *348*(8), 721–726. https://doi.org/10.1056/NEJMsa021212

Quill, T. E., & Brody, H. (1996). Physician Recommendations and Patient Autonomy: Finding a Balance between Physician Power and Patient Choice. *Annals of Internal Medicine*, *125*(9), 763–769. https://doi.org/10.7326/0003-4819-125-9-199611010-00010

Rajpurkar, P., Chen, E., Banerjee, O., & Topol, E. J. (2022). AI in health and medicine. *Nature Medicine*, *28*(1), 31–38. https://doi.org/10.1038/s41591-021-01614-0

Schenker, Y., Fernandez, A., Sudore, R., & Schillinger, D. (2011). Interventions to Improve Patient Comprehension in Informed Consent for Medical and Surgical Procedures. *Medical Decision Making*, *31*(1), 151–173. https://doi.org/10.1177/0272989X10364247

Singhal, K., Azizi, S., Tu, T., Mahdavi, S. S., Wei, J., Chung, H. W., Scales, N., Tanwani, A., Cole-Lewis, H., Pfohl, S., Payne, P., Seneviratne, M., Gamble, P., Kelly, C., Babiker, A., Schärli, N., Chowdhery, A., Mansfield, P., Demner-Fushman, D., … Natarajan, V. (2023). Large language models encode clinical knowledge. *Nature*, *620*(7972), 172–180. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06291-2

Thirunavukarasu, A. J., Ting, D. S. J., Elangovan, K., Gutierrez, L., Tan, T. F., & Ting, D. S. W. (2023). Large language models in medicine. *Nature Medicine*, *29*(8), 1930–1940. https://doi.org/10.1038/s41591-023-02448-8

Wang, L.-W., Miller, M. J., Schmitt, M. R., & Wen, F. K. (2013). Assessing readability formula differences with written health information materials: Application, results, and recommendations. *Research in Social and Administrative Pharmacy*, *9*(5), 503–516. https://doi.org/10.1016/j.sapharm.2012.05.009

DİYABETİK RETİNOPATİ PROGRESYONUNDA EVREYE ÖZGÜ *SOD1* VE *CAT* GEN EKSPRESYON DEĞİŞİKLİKLERİ

Asst. Prof. Dr. Tugba AGBEKTAS

Sivas Cumhuriyet University, Yıldızeli Vocational School, Department of Food Processing Technologies, 58140, Sivas, Türkiye

ORCID ID: 0009-0004-4533-0019

PhD Student Gonca KABAK

Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Medicine, Department of Medical Biochemistry, 58140, Sivas, Türkiye

ORCID ID: 0009-0004-2430-5076

Assoc. Prof. Dr. Duygu YALINBAS YETER

Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Medicine, Department of Ophthalmology, 58140, Sivas, Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-9001-0277

ÖZET

Diyabetik retinopati (DR), kronik hiperglisemi ile ilişkili ve ilerleyici görme kaybına yol açabilen önemli bir mikrovasküler diyabet komplikasyonudur. Oksidatif stresin, proliferatif olmayan diyabetik retinopatiden (NPDR) proliferatif diyabetik retinopatiye (PDR) ilerlemede önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir. *Süperoksit dismutaz 1 (SOD1)* ve *katalaz (CAT)*, reaktif oksijen türlerinin detoksifikasyonunda görev alan temel antioksidan enzimlerdir. Bu çalışmada, diyabetes mellitus (DM) ve DR'nin farklı evrelerinde *SOD1* ve *CAT* gen ekspresyon düzeylerinin değerlendirilmesi ve bu değişikliklerin glisemik yük ile ilişkisinin araştırılması amaçlandı. Çalışmaya PDR (n=20), NPDR (n=20), retinopatisi olmayan DM (n=21) ve sağlıklı kontrol (n=19) gruplarından toplam 80 birey dahil edildi. *SOD1* ve *CAT* gen ekspresyonları gerçek zamanlı kantitatif ters transkripsiyon polimeraz zincir reaksiyonu (RT-qPCR) yöntemiyle analiz edildi. *Gliseraldehit-3-fosfat dehidrogenaz (GAPDH)* referans gen olarak kullanıldı ve gen ekspresyonundaki değişimler ΔCt değerleri temel alınarak değerlendirildi. Glukoz ve glikozillenmiş hemoglobin (HbA1c) düzeyleri çalışma grupları arasında anlamlı farklılık gösterdi ve kontrol grubunda daha düşük düzeylerde bulundu. *SOD1* ΔCt değerleri gruplar arasında anlamlı farklılık göstermedi (Kruskal–Wallis H=4.863, p=0.182). Buna karşılık, *CAT* ΔCt değerlerinde gruplar arasında anlamlı farklılık saptandı (H=8.613, p=0.035). Dunn–Bonferroni post-hoc analizinde bu farklılığın PDR ve kontrol grupları arasında olduğu belirlendi (düzeltilmiş p=0.037). HbA1c ile *CAT* ΔCt arasında zayıf negatif korelasyon saptandı (Spearman ρ=−0.223, p=0.047). DM, NPDR ve PDR evrelerinin sıralı olarak değerlendirildiği ordinal lojistik regresyon analizinde HbA1c, tek değişkenli modelde daha ileri DR evresi ile anlamlı olarak ilişkiliydi (OR=1.63, %95 GA: 1.13–2.34, p=0.008). HbA1c, *CAT* ΔCt ve *SOD1* ΔCt değişkenlerini içeren çok değişkenli model anlamlıydı (χ^2=11.103, p=0.011; Nagelkerke R^2=0.187). Düzeltilmiş modelde yalnızca HbA1c daha ileri DR evresi ile bağımsız olarak ilişkili bulundu (OR=1.60, %95 GA: 1.11–2.32, p=0.013); *CAT* ve *SOD1* ΔCt değerleri ise bağımsız olarak anlamlı değildi. Sonuç olarak, bulgular *CAT* gen ekspresyonunun özellikle PDR evresinde kontrol grubuna göre farklılık gösterdiğini, buna karşın *SOD1* için gruplar arasında anlamlı bir değişiklik bulunmadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca HbA1c'nin DR evre ilerlemesi ile bağımsız ilişkisinin gösterilmesi, glisemik yükün hastalık progresyonundaki önemini desteklemektedir. Bu bulgular, antioksidan savunma sistemi ile glisemik kontrol arasındaki ilişkinin DR progresyonunda evreye özgü olarak değerlendirilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

Anahtar kelimeler: DR, NPDR, PDR, oksidatif stres, *SOD1*, *CAT*, RT-qPCR

STAGE-SPECIFIC CHANGES IN *SOD1* AND *CAT* GENE EXPRESSION DURING DIABETIC RETINOPATHY PROGRESSION

ABSTRACT

Diabetic retinopathy (DR) is a major microvascular complication of diabetes associated with chronic hyperglycemia and progressive vision loss. Oxidative stress is considered an important contributor to the progression from non-proliferative diabetic retinopathy (NPDR) to proliferative diabetic retinopathy (PDR). *Superoxide dismutase 1 (SOD1)* and *catalase (CAT)* are key antioxidant enzymes involved in the detoxification of reactive oxygen species. This study aimed to evaluate *SOD1* and *CAT* gene expression across different stages of diabetes and DR and to investigate their associations with glycemic burden. A total of 80 participants were included: 20 with PDR, 20 with NPDR, 21 with diabetes mellitus (DM) without retinopathy, and 19 healthy controls. *SOD1* and *CAT* gene expression levels were analyzed using reverse transcription quantitative polymerase chain reaction (RT-qPCR). *Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase (GAPDH)* was used as the reference gene, and changes in gene expression were evaluated based on ΔCt values. Glucose and glycated hemoglobin (HbA1c) levels differed significantly among the study groups and were lower in the control group. *SOD1* ΔCt values did not differ significantly among groups (Kruskal–Wallis H=4.863, p=0.182). In contrast, a significant difference was observed in *CAT* ΔCt values (H=8.613, p=0.035). Dunn–Bonferroni post-hoc analysis demonstrated that this difference was attributable to the comparison between the PDR and control groups (adjusted p=0.037). HbA1c was weakly and negatively correlated with *CAT* ΔCt (Spearman ρ=−0.223, p=0.047). In ordinal logistic regression analysis, in which DM, NPDR, and PDR were treated as ordered stages, HbA1c was significantly associated with a more advanced DR stage in the univariable model (OR=1.63, 95% CI: 1.13–2.34, p=0.008). The multivariable model incorporating HbA1c, *CAT* ΔCt, and *SOD1* ΔCt was statistically significant overall (χ^2=11.103, p=0.011; Nagelkerke R^2=0.187). In the adjusted model, only HbA1c remained independently associated with a more advanced DR stage (OR=1.60, 95% CI: 1.11–2.32, p=0.013), whereas *CAT* and *SOD1* ΔCt values were not independently associated with DR progression. In conclusion, *CAT* gene expression showed a stage-related difference, particularly between the PDR and control groups, whereas no significant between-group difference was detected for *SOD1*. Furthermore, the independent association between HbA1c and increasing DR severity highlights the importance of glycemic burden in disease progression. These findings suggest that the relationship between antioxidant defense mechanisms and glycemic control should be considered in a stage-specific context during DR progression.

Keywords: DR, NPDR, PDR, oxidative stress, *SOD1*, *CAT*, RT-qPCR

1. INTRODUCTION

DR is a progressive retinal disorder associated with chronic hyperglycemia and is one of the major microvascular complications of diabetes. Although traditionally regarded as a microvascular disease, DR is now recognized as a complex neurovascular disorder involving vascular, neuronal, glial, and inflammatory processes. Clinically, DR is classified into NPDR and PDR. As the disease progresses, retinal microvascular damage, capillary nonperfusion, and increased vascular permeability become more pronounced, while pathological neovascularization may develop at advanced stages as a consequence of retinal ischemia (Antonetti et al., 2021). Chronic hyperglycemia activates several metabolic pathways involved in DR pathogenesis, including the polyol pathway, AGE formation, PKC activation, and the hexosamine pathway. A major consequence of these metabolic disturbances is excessive ROS generation. Hyperglycemia-induced mitochondrial superoxide production is considered a fundamental mechanism underlying diabetic complications (Brownlee, 2005). The retina is particularly susceptible to oxidative stress because of its high metabolic activity and oxygen demand. Under diabetic conditions, excessive ROS production may exceed endogenous antioxidant capacity, thereby promoting oxidative stress (Li et al., 2017). Oxidative stress contributes to retinal injury through lipid peroxidation, protein and DNA damage, mitochondrial dysfunction, and apoptosis. In addition, oxidative stress and inflammation are closely interconnected, and this bidirectional interaction may

contribute to the persistence and progression of retinal damage (Sun et al., 2024). CAT is an important component of the antioxidant defense system and catalyzes the decomposition of hydrogen peroxide into water and oxygen. Impairment of antioxidant defense mechanisms has been reported under diabetic conditions, and reduced antioxidant enzyme activity may contribute to increased oxidative damage (Kowluru & Chan, 2007). SOD1 also plays a critical role in antioxidant defense by converting superoxide radicals into hydrogen peroxide, which is subsequently detoxified by CAT. Thus, SOD1 and CAT function cooperatively in maintaining cellular redox balance. Previous studies have demonstrated alterations in antioxidant enzymes, including CAT, SOD, and GPx, in patients with DR, supporting the involvement of impaired antioxidant defense in disease pathogenesis (Haydinger et al., 2011). Accordingly, evaluating *CAT* and *SOD1* gene expression across different stages of DR may provide insight into stage-specific alterations in antioxidant defense mechanisms and their potential contribution to disease progression.

The present study aimed to evaluate *CAT* and *SOD1* gene expression levels across different stages of DR and to investigate the association between stage-specific alterations in these genes, oxidative stress, and disease progression.

2. METHODS

2.1. Selection of Patients and Controls

A total of 80 participants evaluated at the Department of Ophthalmology, Sivas Cumhuriyet University Research and Application Hospital, were included in the study and divided into four groups. The study groups consisted of 20 patients with proliferative diabetic retinopathy (PDR), 20 patients with non-proliferative diabetic retinopathy (NPDR), 21 individuals with diabetes mellitus (DM), and 19 healthy controls (CNT). Diagnoses of PDR and NPDR were established based on clinical ophthalmological examination, optical coherence tomography, and, when necessary, fundus fluorescein angiography findings. Patients who had previously initiated treatment or were receiving anti-VEGF therapy, as well as individuals with the specified ocular and systemic diseases, were excluded from the study. The DM group included individuals with a diagnosis of diabetes mellitus but without clinical evidence of diabetic retinopathy, whereas the control group consisted of healthy individuals with no history of diabetes or diabetic retinopathy. The groups were designed to be as comparable as possible in terms of age and sex. The study protocol was approved by the Clinical Research Ethics Committee of Sivas Cumhuriyet University on December 13, 2022, under decision number 2022-12/05, and the study was conducted in accordance with the ethical principles of the Declaration of Helsinki.

2.2. RNA Isolation and cDNA Synthesis

Peripheral blood samples collected from the participants into EDTA-containing tubes were used to determine SOD1 and CAT gene expression levels. Total RNA was isolated using a commercial RNA isolation kit according to the manufacturer's instructions. The purity and concentration of the RNA samples were assessed spectrophotometrically. Equal amounts of the obtained RNA samples were used for cDNA synthesis, which was performed according to the manufacturer's protocol. The synthesized cDNA samples were stored at −20 °C until further analysis.

2.3. Determination of SOD1 and CAT Gene Expression Levels

The expression levels of the SOD1 and CAT genes were determined using real-time quantitative polymerase chain reaction (qRT-PCR) with the obtained cDNA samples. GAPDH was used as the

internal reference gene for normalization of gene expression levels. Relative gene expression levels were calculated using the 2^−ΔΔCt method, and differences among the study groups were evaluated.

2.4. Statistical analysis

Statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics for Windows, Version 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Categorical variables were expressed as numbers and percentages and compared using Pearson's chi-square test or the Fisher–Freeman–Halton exact test, as appropriate. Continuous variables were summarized using median and interquartile range and compared among the PDR, NPDR, DM, and control groups using the Kruskal–Wallis test. When significant differences were detected, Dunn–Bonferroni post-hoc analysis was performed for pairwise comparisons. Associations between variables were assessed using Spearman's rank correlation analysis. Ordinal logistic regression analysis was used to evaluate factors associated with increasing DR severity, with disease stages coded as DM=0, NPDR=1, and PDR=2. Results were reported as odds ratios (ORs) with 95% confidence intervals (CIs). A two-sided *p* value <0.05 was considered statistically significant.

3. RESULTS

The study included 80 participants: 20 PDR, 20 NPDR, 21 DM, and 19 CNT. Sex distribution did not differ among groups (*p=0.719*), nor did smoking (*p=0.099*) or family history of DR (*p=0.168*). Family history of DM differed significantly among groups (*p<0.001*), occurring in 76.2% of DM, 70.0% of NPDR, and 35.0% of PDR participants, but not in the CNT group (Table 1).

Table 1. Comparison of categorical variables among PDR, NPDR, DM, and CNT groups

Variable	PDR (n=20)	NPDR (n=20)	DM (n=21)	CNT (n=19)	*p* value
Sex					
Female	13 (65.0)	12 (60.0)	12 (57.1)	14 (73.7)	*0.719*
Male	7 (35.0)	8 (40.0)	9 (42.9)	5 (26.3)	
Smoking					
Yes	2 (10.0)	5 (25.0)	4 (19.0)	0 (0.0)	*0.099*[a]
No	18 (90.0)	15 (75.0)	17 (81.0)	19 (100.0)	
Family history of DM					
Yes	7 (35.0)	14 (70.0)	16 (76.2)	0 (0.0)	***<0.001****
No	13 (65.0)	6 (30.0)	5 (23.8)	19 (100.0)	
Family history of DR					
Yes	4 (20.0)	2 (10.0)	4 (19.0)	0 (0.0)	*0.168*[a]
No	16 (80.0)	18 (90.0)	17 (81.0)	19 (100.0)	

Data are presented as n (%). Pearson chi-square test was used; Fisher–Freeman–Halton exact test ([a]) was used when expected cell counts were low. *p<0.05* was considered statistically significant.

By sex, age, weight, height, and BMI did not differ among groups in men (*p=0.645*, *p=0.290*, *p=0.981*, and *p=0.134*, respectively), whereas glucose and HbA1c differed significantly (*p=0.007* and *p=0.001*). In female, age and height did not differ (*p=0.057* and *p=0.386*), while weight, BMI, glucose, and HbA1c differed significantly (all *p<0.001*). The CNT group had the lowest median glucose and HbA1c values in both sexes (Table 2).

Table 2. Demographic and clinical variables across PDR, NPDR, DM, and CNT groups

Variable	Sex	PDR (n=20)	NPDR (n=20)	DM (n=21)	CNT (n=19)	*p* value
Age (years)	Male	59.00 (54.00–70.00)	62.00 (53.50–67.50)	58.00 (56.50–64.00)	51.00 (46.50–63.50)	*0.645*
	Female	63.00 (55.50–67.00)	62.50 (53.00–73.75)	52.50 (47.25–60.75)	55.50 (51.75–70.25)	*0.057*
Weight (kg)	Male	90.00 (76.00–96.00)	77.50 (75.00–91.25)	78.00 (76.50–103.00)	72.00 (65.00–84.50)	*0.290*
	Female	75.00 (70.00–90.00)	83.00 (71.25–92.00)	80.50 (72.00–89.00)	57.00 (54.25–63.00)	***<0.001****
Height (cm)	Male	170.00 (165.00–175.00)	169.00 (165.25–174.00)	172.00 (164.00–176.50)	170.00 (166.00–175.00)	*0.981*
	Female	160.00 (155.00–164.00)	158.50 (155.00–163.25)	162.00 (160.00–163.50)	160.50 (155.75–165.50)	*0.386*
Glucose (mg/dL)	Male	141.00 (130.00–240.00)	150.00 (141.75–216.00)	173.00 (144.50–252.50)	88.00 (87.50–97.00)	***0.007****
	Female	177.00 (124.25–258.00)	189.00 (147.00–220.75)	148.50 (119.50–169.50)	81.50 (76.75–94.50)	***<0.001****
BMI (kg/m²)	Male	29.68 (24.91–34.83)	28.34 (25.62–30.61)	31.64 (26.36–33.39)	24.91 (23.63–27.54)	*0.134*
	Female	31.88 (27.34–33.81)	32.56 (30.00–35.62)	30.69 (27.43–34.11)	22.21 (21.33–24.03)	***<0.001****
HbA1c (%)	Male	8.60 (7.30–9.80)	8.16 (7.18–9.29)	6.90 (6.55–8.00)	5.20 (4.80–5.90)	***0.001****
	Female	8.50 (7.55–10.15)	8.35 (7.72–8.90)	7.45 (6.50–9.25)	5.45 (5.15–5.70)	***<0.001****

Values are presented as median (Q1–Q3).
Kruskal–Wallis test.
*Statistically significant, $p<0.05$.
Q1: 25th percentile; Q3: 75th percentile; BMI: Body mass index; PDR: Proliferative diabetic retinopathy; NPDR: Non-proliferative diabetic retinopathy; DM: Diabetes mellitus.

SOD1 ΔCt did not differ significantly among groups (Kruskal–Wallis H=4.863; $p=0.182$), whereas *CAT* ΔCt did (H=8.613; $p=0.035$). Dunn–Bonferroni analysis identified a significant PDR–CNT difference (adjusted $p=0.037$). Mean *CAT* ΔCt ranks were 30.25 in PDR and 50.63 in CNT (Table 3). Group distributions of *SOD1* ΔCt and *CAT* ΔCt by sex are shown in Figure 1.

Table 3. Comparison of *SOD1* and *CAT* ΔCt across groups

Variable	PDR Mean Rank	NPDR Mean Rank	DM Mean Rank	CNT Mean Rank	Kruskal–Wallis H	*p* value	Post-hoc
SOD1 ΔCt	42.78	38.70	47.71	32.03	4.863	*0.182*	—
CAT ΔCt	30.25	36.90	44.52	50.63	8.613	***0.035****	**PDR–CNT, *p=0.037*[a]**

Groups were compared using the Kruskal–Wallis test. [a]Dunn–Bonferroni post-hoc analysis; *p* was Bonferroni-adjusted. *Statistically significant, *p<0.05*.

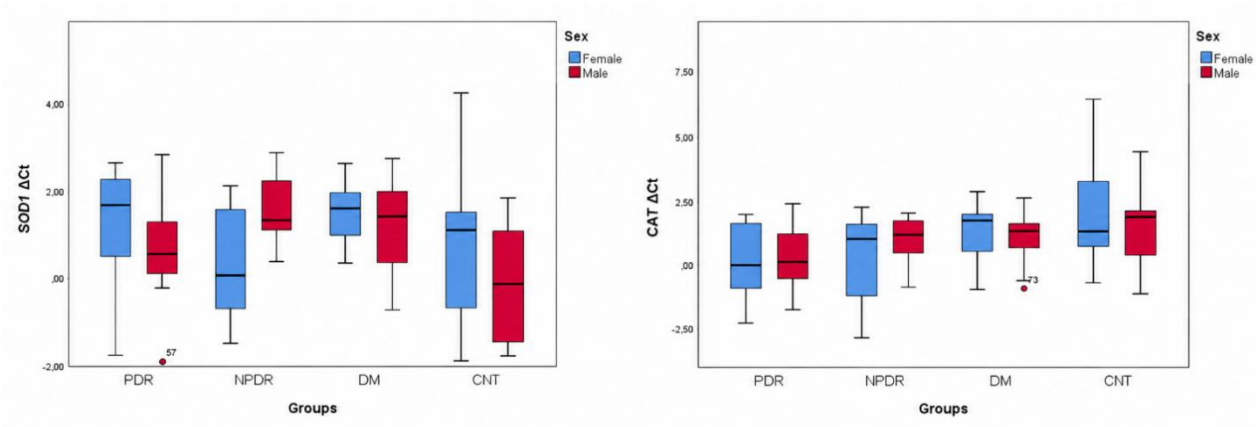


Figure 1. Distribution of *SOD1* ΔCt and *CAT* ΔCt by sex across the PDR, NPDR, DM, and control groups. Left: *SOD1* ΔCt; right: *CAT* ΔCt.

In the ordinal logistic regression analysis of factors associated with DR progression, HbA1c was significantly associated with a more advanced DR stage in the univariable model (B=0.488; OR=1.63; 95% CI: 1.13–2.34; *p=0.008*). In the univariable analyses, *CAT* ΔCt (*p=0.054*) and *SOD1* ΔCt (*p=0.271*) were not statistically significant. The multivariable model including HbA1c, *CAT* ΔCt, and *SOD1* ΔCt was statistically significant overall (χ^2=11.103; *p=0.011*; Nagelkerke R^2=0.187), and the proportional odds assumption was satisfied (*p=0.597*). In the adjusted model, only HbA1c remained statistically significant (B=0.472; OR=1.60; 95% CI: 1.11–2.32; *p=0.013*), whereas *CAT* ΔCt and *SOD1* ΔCt were not independently associated with DR progression (Table 4).

Table 4. Ordinal logistic regression for DR progression

Variable	Univariable B	OR (95% CI)	*p* value	Adjusted B	OR (95% CI)	*p* value
HbA1c	0.488	1.63 (1.13–2.34)	***0.008****	0.472	1.60 (1.11–2.32)	***0.013****
CAT ΔCt	-0.360	0.70 (0.48–1.01)	*0.054*	-0.277	0.76 (0.52–1.11)	*0.157*
SOD1 ΔCt	-0.222	0.80 (0.54–1.19)	*0.271*	-0.207	0.81 (0.54–1.23)	*0.331*

Stages were coded as DM=0, NPDR=1, and PDR=2. The adjusted model included HbA1c, *CAT* ΔCt, and *SOD1* ΔCt. The multivariable model was significant (χ^2=11.103; *p=0.011*; Nagelkerke R^2=0.187), and the proportional odds assumption was met (*p=0.597*). *Statistically significant, *p<0.05*.

Spearman analysis showed the strongest positive correlation between weight and BMI (ρ=0.897; *p<0.001*). HbA1c and glucose were also strongly correlated (ρ=0.747; *p<0.001*). Moderate positive correlations were observed between BMI and glucose (ρ=0.546; *p<0.001*) and weight and glucose (ρ=0.490; *p<0.001*). HbA1c and *CAT* ΔCt showed a weak negative correlation (ρ=-0.223; *p=0.047*). Other significant correlations are shown in Table 5; directions for categorical variables depend on 0/1 coding.

Table 5. Significant Spearman correlations

Variable 1	**Variable 2**	**Spearman ρ**	***p* value**
Age	HbA1c	0.228	***0.042****
Age	Glucose	0.225	***0.045****
Weight	Height	0.311	***0.005****
Weight	BMI	0.897	***<0.001****
Weight	Family history of DM	-0.272	***0.015****
Weight	Family history of DR	-0.324	***0.003****
Weight	HbA1c	0.315	***0.004****
Weight	Glucose	0.490	***<0.001****
BMI	Family history of DM	-0.319	***0.004****
BMI	Family history of DR	-0.323	***0.003****
BMI	HbA1c	0.417	***<0.001****
BMI	Glucose	0.546	***<0.001****
Smoking	Glucose	-0.333	***0.003****
Family history of DM	Family history of DR	0.407	***<0.001****
Family history of DM	HbA1c	-0.333	***0.003****
Family history of DM	Glucose	-0.348	***0.002****
HbA1c	Glucose	0.747	***<0.001****
HbA1c	*CAT ΔCt*	-0.223	***0.047****

Spearman rank correlation was used. Only associations with *p<0.05* are shown. For categorical variables, direction depends on the 0/1 coding used.

4. DISCUSSION

Oxidative stress induced by chronic hyperglycemia plays an important role in the pathogenesis and progression of DR. Increased ROS production may contribute to retinal injury through mitochondrial dysfunction, inflammation, endothelial damage, and disruption of the blood–retinal barrier (Haydinger et al., 2023; Mishra et al., 2015). In the present study, glucose and HbA1c levels differed significantly among the study groups, supporting the importance of glycemic burden in DR progression. Consistent with these findings, previous studies have demonstrated that poor glycemic control is associated with an increased risk of DR development and progression (Zhou & Chen, 2023). The antioxidant defense system represents an important protective mechanism against hyperglycemia-induced oxidative damage. In the present study, *SOD1* ΔCt values did not differ significantly among the groups, suggesting that alterations in *SOD1* expression may not occur uniformly across different stages of DR. This finding may reflect the complex and stage-dependent regulation of antioxidant defense mechanisms during disease progression. Previous studies have reported alterations in SOD and CAT levels in patients with DR; however, the magnitude and direction of these changes may vary according

to disease severity, sample type, metabolic status, and methodological differences (Bokhary et al., 2021; Mishra et al., 2015). In contrast to *SOD1*, *CAT* ΔCt values differed significantly among the study groups, with post-hoc analysis demonstrating a significant difference between the PDR and CNT groups. This finding suggests that *CAT*-related antioxidant responses may be altered in advanced stages of DR. Furthermore, HbA1c showed a weak negative correlation with *CAT* ΔCt, indicating a potential relationship between glycemic burden and *CAT*-related molecular changes. Persistent hyperglycemia may increase ROS production and impose sustained stress on endogenous antioxidant systems, thereby contributing to disruption of redox homeostasis (Haydinger et al., 2023). Nevertheless, this association should be interpreted cautiously because the relationship between oxidative stress and DR is multifactorial and may also be influenced by disease duration, hypertension, dyslipidemia, and other metabolic factors (Zhou & Chen, 2023). Ordinal logistic regression analysis further demonstrated that HbA1c was significantly associated with increasing DR severity. This association remained significant after adjustment for *SOD1* ΔCt and *CAT* ΔCt, whereas neither *SOD1* nor *CAT* ΔCt was independently associated with DR progression. These findings emphasize the importance of glycemic burden in disease severity while suggesting that alterations in individual antioxidant-related genes alone may not independently explain DR progression. This is consistent with the concept that DR develops through interactions among multiple metabolic, oxidative, inflammatory, and vascular pathways rather than through a single molecular mechanism (Haydinger et al., 2023; Mishra et al., 2023). The use of peripheral blood samples should also be considered when interpreting these findings. Although systemic alterations in antioxidant status may be associated with DR, peripheral blood measurements may not directly reflect molecular processes occurring within retinal tissue. Previous studies have indicated that oxidative stress and antioxidant profiles may differ among blood, vitreous, and aqueous humor samples (Karam-Palos et al., 2023). Therefore, further studies incorporating retinal or intraocular samples, larger cohorts, and additional oxidative stress markers may provide a more comprehensive understanding of stage-specific antioxidant responses in DR.

5. CONCLUSION

The present study demonstrated differential changes in antioxidant-related molecular parameters across different stages of DR. While *SOD1* ΔCt values did not differ significantly among the study groups, *CAT* ΔCt showed a significant overall difference, particularly between the PDR and CNT groups. In addition, *CAT* ΔCt was weakly correlated with HbA1c, suggesting a potential relationship between glycemic burden and *CAT*-related antioxidant responses. Ordinal logistic regression analysis identified HbA1c as an independent factor associated with increasing DR severity, whereas *SOD1* and *CAT* ΔCt were not independently associated with disease progression. These findings highlight the importance of glycemic control in DR progression and suggest that alterations in antioxidant defense mechanisms may occur in a stage-dependent manner. Further studies are warranted to clarify the biological significance of *SOD1* and *CAT* alterations and their potential contribution to oxidative stress-related mechanisms in DR.

REFERENCES

Antonetti, D. A., Silva, P. S., & Stitt, A. W. (2021). Current understanding of the molecular and cellular pathology of diabetic retinopathy. *Nature Reviews Endocrinology*, *17*(4), 195-206.

Bokhary, K., Aljaser, F., Abudawood, M., Tabassum, H., Bakhsh, A., Alhammad, S., ... & Alsubki, R. (2021). Role of oxidative stress and severity of diabetic retinopathy in type 1 and type 2 diabetes. *Ophthalmic Research*, *64*(4), 613-621.

Brownlee, M. (2005). The pathobiology of diabetic complications: a unifying mechanism. diabetes, 54(6), 1615.

Diabetic retinopathy is associated with oxidative stress and mitigation of gene expression of antioxidant enzymes. *International Journal of General Medicine*, 799-806.

El-Bab, M. F., Zaki, N. S., Mojaddidi, M. A., Al-Barry, M., & El-Beshbishy, H. A. (2013).

Haydinger, C. D., Oliver, G. F., Ashander, L. M., & Smith, J. R. (2023). Oxidative stress and its regulation in diabetic retinopathy. *Antioxidants*, *12*(8), 1649.

Karam-Palos, S., Andrés-Blasco, I., Campos-Borges, C., Zanón-Moreno, V., Gallego-Martínez, A., Alegre-Ituarte, V., ... & Pinazo-Durán, M. D. (2023). Oxidative stress mediates epigenetic modifications and the expression of miRNAs and genes related to apoptosis in diabetic retinopathy patients. *Journal of Clinical Medicine*, *13*(1), 74.

Kowluru, R. A., & Chan, P. S. (2007). Oxidative stress and diabetic retinopathy. *Journal of diabetes research*, *2007*(1), 043603.

Li, C., Miao, X., Li, F., Wang, S., Liu, Q., Wang, Y., & Sun, J. (2017). Oxidative stress-related mechanisms and antioxidant therapy in diabetic retinopathy. *Oxidative medicine and cellular longevity*, *2017*(1), 9702820.

Mishra, M., & Kowluru, R. A. (2015). Epigenetic modification of mitochondrial DNA in the development of diabetic retinopathy. *Investigative ophthalmology & visual science*, *56*(9), 5133-5142.

Sun, Q., Xing, X., Wang, H., Wan, K., Fan, R., Liu, C., ... & Wang, R. (2024). SCD1 is the critical signaling hub to mediate metabolic diseases: mechanism and the development of its inhibitors. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *170*, 115586.

Wang, Y., Meng, X., & Yan, H. (2017). Niaspan inhibits diabetic retinopathy-induced vascular inflammation by downregulating the tumor necrosis factor-α pathway. *Molecular Medicine Reports*, *15*(3), 1263-1271.

Zhou, J., & Chen, B. (2023). Retinal cell damage in diabetic retinopathy. *Cells*, *12*(9), 1342.

FARKLI LED IŞIK SPEKTRUMLARININ SEBZELERDE BÜYÜME, VERİM VE FİTOKİMYASAL KALİTE ÜZERİNE ETKİLERİ

Doç. Dr. Yelderem AKHOUNDNEJAD

Şırnak Üniversitesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, İdil/Şırnak

ORCID ID: 0000-0002-1435-864X

Doç. Dr. Yahya NAS

Şırnak Üniversitesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, İdil/Şırnak

ORCID ID: 0000-0002-6917-8697

ÖZET

Kontrollü çevre koşullarında sebze üretiminde ışığın spektral bileşimi; morfolojik özellikler, fotosentetik süreçler, biyokütle birikimi, verim oluşumu ve fitokimyasal metabolizma üzerindeki etkileri aracılığıyla bitki gelişiminin ve üretim performansının şekillenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Işık yayan diyot (LED) sistemlerinin sağladığı esneklik; dalga boyu dağılımı, ışık şiddeti, fotoperiyot ve aydınlatma sürelerinin birbirinden bağımsız olarak ayarlanmasına olanak tanıyarak sera, bitki fabrikası ve dikey tarım sistemlerinde bitkiye özgü aydınlatma programlarının oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Farklı dalga boyları ve bunların kombinasyonları, sebze bitkilerinde birbirinden farklı morfolojik, fizyolojik ve metabolik yanıtların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Mavi ışık genellikle kompakt bitki gelişimi, stomatal düzenleme, fotosentetik pigment oluşumu ve sekonder metabolit birikimiyle ilişkilendirilirken, kırmızı ışık fotosentetik karbon asimilasyonu ve biyokütle üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Yeşil ışık bitki kanopisinin alt katmanlarına daha etkin biçimde nüfuz ederek alt yaprakların fotosentetik aktivitesine katkı sağlayabilirken, uzak kırmızı ışık bitki mimarisi, kuru madde dağılımı ve generatif gelişimi etkileyebilmektedir. Özellikle domates ve marulda gerçekleştirilen çalışmalar, uygun LED spektrumlarının ve spektral kombinasyonların verim performansını desteklerken antosiyanin, karotenoid, askorbik asit, çözünür şekerler ve kaliteyle ilişkili diğer bileşiklerin birikimini de düzenleyebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bitkilerin spektral ışığa verdikleri yanıtlar; tür, çeşit, ışık şiddeti, fotoperiyot, sıcaklık, spektral bileşim ve gelişme dönemine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Bu derlemede, LED ışık spektrumlarının sebzelerde büyüme, fizyolojik performans, verim ve fitokimyasal kalite üzerindeki etkilerine ilişkin güncel bulgular değerlendirilmiştir. Ayrıca, verim ve besinsel kaliteyi desteklerken enerji kullanım etkinliğini artırabilecek spektral yönetim stratejileri ele alınmıştır. Bitki türüne ve gelişme dönemine özgü LED aydınlatma protokollerinin geliştirilmesi, kontrollü çevre koşullarında sebze üretiminde verimliliğin, ürün kalitesinin ve sürdürülebilirliğin artırılması açısından önem taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: LED aydınlatma, ışık spektrumu, sebze bitkileri, kontrollü çevre tarımı, fitokimyasal kalite, dikey tarım

EFFECTS OF DIFFERENT LED LIGHT SPECTRA ON GROWTH, YIELD, AND PHYTOCHEMICAL QUALITY OF VEGETABLES

ABSTRACT

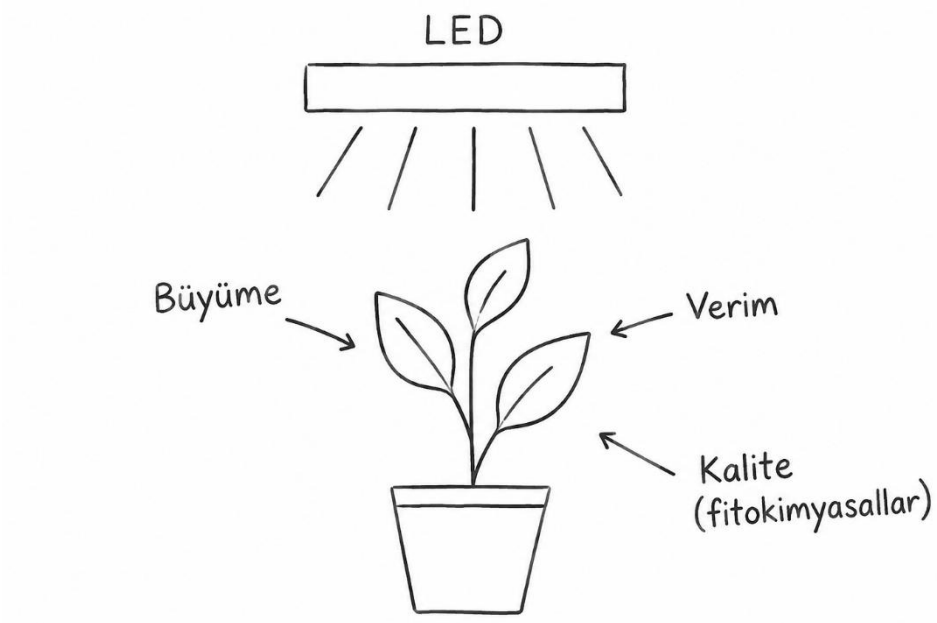
In controlled-environment vegetable production, the spectral composition of light plays a central role in shaping plant development and crop performance by influencing morphological traits, photosynthetic processes, biomass accumulation, yield formation, and phytochemical metabolism. The versatility of

light-emitting diode (LED) systems allows growers to design crop-specific lighting regimes through independent adjustment of wavelength distribution, irradiance, photoperiod, and exposure schedules across greenhouse, plant factory, and vertical farming applications. Different wavelengths and their combinations can induce distinct morphological, physiological, and metabolic responses in vegetable crops. Blue light is commonly associated with compact plant growth, stomatal regulation, photosynthetic pigment formation, and secondary metabolite accumulation, whereas red light plays an important role in photosynthetic carbon assimilation and biomass production. Green light can penetrate more effectively into the lower layers of the plant canopy and contribute to the photosynthetic activity of lower leaves, while far-red light can influence plant architecture, dry-matter partitioning, and reproductive development. Studies conducted particularly in tomato and lettuce have demonstrated that appropriate LED spectra and spectral combinations can support yield performance while also regulating the accumulation of anthocyanins, carotenoids, ascorbic acid, soluble sugars, and other quality-related compounds. However, plant responses to spectral light vary considerably depending on species, cultivar, light intensity, photoperiod, temperature, spectral composition, and developmental stage. This review evaluates recent findings on the effects of LED light spectra on vegetable growth, physiological performance, yield, and phytochemical quality. In addition, spectral management strategies that may enhance energy-use efficiency while supporting crop yield and nutritional quality are discussed. Future development of crop- and growth-stage-specific LED lighting protocols will be important for improving the productivity, product quality, and sustainability of controlled-environment vegetable production.

Keywords: LED lighting, light spectrum, vegetable crops, controlled-environment agriculture, phytochemical quality, vertical farming

1. Giriş

Işık, bitkilerde fotosentetik karbon asimilasyonu için gerekli temel enerji kaynağı olmasının yanı sıra büyüme, gelişme, fotomorfogenez ve metabolik süreçleri düzenleyen önemli bir çevresel sinyaldir. Kontrollü çevre tarımında yapay aydınlatma sistemleri; ışık şiddeti, fotoperiyot ve spektral bileşimin bitkinin fizyolojik gereksinimleri ile gelişme dönemine göre düzenlenmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle ışık yayan diyot (LED) teknolojileri, farklı dalga boylarının veya spektral kombinasyonların hassas biçimde uygulanabilmesi ve geleneksel ışık kaynaklarına kıyasla yüksek kontrol edilebilirlik sağlaması nedeniyle sera, bitki fabrikası ve dikey tarım sistemlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. LED aydınlatmanın bitkiler üzerindeki etkileri spektral bileşime bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Mavi, yeşil, kırmızı ve uzak-kırmızı ışık; yaprak genişlemesi, gövde uzaması, bitki mimarisi, stomatal davranış, fotosentetik performans, biyokütle oluşumu ve dağılımı ile sekonder metabolizma üzerinde farklı yanıtlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle maksimum biyokütle üretimini sağlayan spektral bileşim ile en yüksek besinsel veya fitokimyasal kaliteyi sağlayan ışık reçetesi her zaman aynı olmayabilir. LED spektrumunun etkileri yalnızca büyüme ve verimle sınırlı değildir. Soufi et al. (2023), farklı ışık spektrumlarının marulda bitki büyümesinin yanı sıra mineral element alımı, su tüketimi ve elektrik kullanımını da değiştirebildiğini göstermiştir. Bu bulgu, LED sistemlerinin değerlendirilmesinde biyolojik performans ile kaynak kullanım etkinliğinin birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Spektral yönetim aynı zamanda sebzelerin besinsel ve fonksiyonel kalitesinin geliştirilmesinde önemli bir araçtır. Farklı ışık uygulamalarının fenolik bileşikler, antosiyaninler, karotenoidler, askorbik asit, çözünür şekerler ve nitrat birikimi üzerinde etkili olabildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte bu yanıtlar tür, çeşit, gelişme dönemi, PPFD, fotoperiyot ve sıcaklık gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Bu derlemenin amacı, farklı LED ışık spektrumlarının sebze bitkilerinde büyüme, fotosentetik ve fizyolojik performans, biyokütle üretimi, verim ve fitokimyasal kalite üzerindeki etkilerini güncel araştırma bulguları doğrultusunda değerlendirmektir. Ayrıca kontrollü çevre ve dikey tarım sistemlerinde ürün verimi ve kalitesini desteklerken enerji kullanım etkinliğini geliştirebilecek spektral yönetim stratejileri ele alınmaktadır. Farklı LED ışık spektrumlarının sebze bitkilerinde büyüme, verim ve fitokimyasal kalite üzerindeki temel etkileri Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı LED ışık spektrumlarının sebze bitkilerinde büyüme, verim ve fitokimyasal kalite üzerindeki genel etkilerinin şematik gösterimi.

2. Işık Spektrumu ve Bitki Fotobiyolojisi

Bitkiler ışığı hem fotosentetik pigmentler hem de özelleşmiş fotoreseptör sistemleri aracılığıyla algılamaktadır. Klorofiller özellikle mavi ve kırmızı spektral bölgelerde güçlü absorbsiyon gösterirken, kriptokromlar ve fototropinler ağırlıklı olarak mavi ışığa, fitokrom sistemi ise kırmızı ve uzak-kırmızı ışığa duyarlıdır. Bu sistemler fotosentezin yanı sıra çimlenme, yaprak gelişimi, gövde uzaması, stomatal hareketler, pigment oluşumu ve generatif gelişim gibi çok sayıda fizyolojik ve gelişimsel sürecin düzenlenmesine katkıda bulunmaktadır. Mavi ışık çoğunlukla fotomorfogenez, stomatal düzenleme, klorofil birikimi ve sekonder metabolit senteziyle ilişkilendirilirken, kırmızı ışık fotosentetik karbon kazanımı ve biyokütle oluşumunda önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle kırmızı ve mavi ışığın farklı oranlardaki kombinasyonları kontrollü çevre üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yeşil ışığın fotosentetik ve morfolojik önemi de giderek daha fazla anlaşılmaktadır. Yeşil fotonların mavi ve kırmızı ışığa göre yaprak dokusunun ve yoğun kanopilerin daha derin katmanlarına ulaşabilmesi, alt yaprakların ışık kullanımına katkıda bulunabilmektedir. Bununla birlikte yeşil ışığın yararlı etkileri mutlak değildir; spektral oran ve çevre koşullarına bağlıdır.

Uzak-kırmızı ışık ise fitokrom aracılı sinyal mekanizmaları üzerinden bitki mimarisi, yaprak açısı, gövde uzaması, kanopi gelişimi ve kuru madde dağılımını etkileyebilmektedir. Özellikle kırmızı ve daha kısa dalga boylarıyla birlikte kullanıldığında uzak-kırmızı ışığın etkisi yalnızca fotomorfogenetik yanıtlarla sınırlı kalmamakta, bitki büyümesi ve generatif organlara asimilat dağılımına da yansıyabilmektedir. Dolayısıyla LED spektrumlarının etkisi yalnızca uygulanan toplam foton miktarı üzerinden değerlendirilmemelidir. Dalga boyları arasındaki etkileşimler, PPFD, fotoperiyot, uygulama süresi, kanopi yapısı, sıcaklık ve bitki genotipi birlikte bitkinin spektral ışığa verdiği yanıtı belirlemektedir.

3. Mavi Işığın Etkileri

Mavi ışık, sebze bitkilerinde fotomorfogenez ve fitokimyasal metabolizmanın düzenlenmesinde önemli bir spektral bileşendir. Mavi ışık oranındaki artış çoğu durumda gövde uzamasının sınırlandırılması, daha kompakt bitki yapısının oluşması, stomatal fonksiyonların düzenlenmesi ve fotosentetik

pigmentler ile bazı antioksidan bileşiklerin birikimindeki değişikliklerle ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte mavi ışığa verilen yanıt çevresel koşullardan bağımsız değildir. Jeong et al. (2025), iki marul çeşidinde farklı mavi ve yeşil ışık oranlarını 20, 24 ve 28 °C sıcaklıklarda karşılaştırmış ve spektral yanıtların sıcaklığa güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermiştir. Mavi ışığın bir bölümünün yeşil ışıkla değiştirilmesi 20–24 °C'de yaprak gelişimini desteklerken, 28 °C'de yüksek yeşil ve düşük mavi ışık oranı aşırı gövde uzaması ve yaprak kıvrılması gibi istenmeyen morfolojik yanıtlarla sonuçlanmıştır. Ayrıca mavi ışık ile yüksek sıcaklık arasında antioksidan kapasite açısından etkileşim belirlenmiştir (Jeong et al., 2025). Mavi ışık sekonder metabolizma üzerinde de etkili olabilmektedir. Hernández-Adasme et al. (2024), hidroponik sera marulunda ortam ışığının mavi, beyaz, mavi-kırmızı ve kırmızı LED'lerle değiştirilmesinin temel agronomik özelliklerde büyük değişiklikler oluşturmaksızın fenolik profili değiştirebildiğini göstermiştir. Bu sonuç, LED spektrumunun yalnızca biyokütle üretimi için değil, ürünün biyokimyasal kompozisyonunun yönlendirilmesi amacıyla da kullanılabileceğini göstermektedir.

Dolayısıyla yüksek mavi ışık oranının bütün sebze türleri için genel bir kalite reçetesi olarak değerlendirilmesi uygun değildir. Optimum oran; bitki türü, çeşit, sıcaklık, toplam PPFD ve hedeflenen kalite özelliğine göre belirlenmelidir.

4. Kırmızı Işığın Etkileri

Kırmızı ışık, klorofil tarafından etkin biçimde absorbe edilmesi ve fotosentetik elektron taşınımına yüksek katkısı nedeniyle kontrollü çevre aydınlatmasının temel spektral bileşenlerinden biridir. Kırmızı LED'lerin yüksek foton etkinliği de bu dalga boyunun kapalı üretim sistemlerinde yaygın kullanılmasının başlıca nedenlerinden biridir. Bununla birlikte, tek başına kırmızı ışığın kullanılması her zaman optimum bitki gelişimini sağlamamaktadır. Monokromatik veya aşırı yüksek oranlı kırmızı ışık bazı türlerde yaprak morfolojisi, pigment oluşumu veya fotosentetik fonksiyon açısından istenmeyen yanıtlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle kırmızı ışık genellikle mavi, yeşil, beyaz veya uzak-kırmızı spektral bileşenlerle birlikte kullanılmaktadır.

Vereshchagin et al. (2024), hidroponik marulda sıcak beyaz, soğuk beyaz ve Phyto-LED spektrumları ile bunların kombinasyonlarını karşılaştırmış; yeşil ışık oranı daha düşük, uzak-kırmızı bileşeni daha yüksek Phyto-LED uygulamalarının bitki verimliliğini yaklaşık %37 artırabildiğini bildirmiştir. Bununla birlikte aynı spektral uygulamalar generatif gelişime geçişi de hızlandırmıştır (Vereshchagin et al., 2024). Bu durum, biyokütledeki artışın tek başına optimum ışık reçetesinin göstergesi olarak kabul edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

5. Yeşil Işığın Etkileri

Yeşil ışık, geçmişte klorofil tarafından mavi ve kırmızı ışığa göre daha düşük oranda absorbe edilmesi nedeniyle fotosentez açısından ikincil bir spektral bölge olarak değerlendirilmiştir. Ancak güncel bulgular, yeşil fotonların yaprak ve kanopi içerisine daha derin nüfuz edebilmesinin özellikle yoğun bitki örtüsüne sahip üretim sistemlerinde önemli olabileceğini göstermektedir. Jeong et al. (2025), 20–24 °C'de mavi fotonların bir bölümünün yeşil fotonlarla değiştirilmesinin marulda yaprak gelişimini ve biyokütleyi destekleyebildiğini göstermiştir. Buna karşılık 28 °C'de yüksek yeşil ışık oranı aşırı gövde uzamasına ve yaprakların aşağı doğru kıvrılmasına yol açmıştır. Aynı çalışmada yüksek yeşil/düşük mavi oranının sıcak koşullarda bazı fitokimyasal bileşiklerin ve antioksidan kapasitenin azalmasıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir (Jeong et al., 2025). Bu bulgular, yeşil ışığın etkisinin "yararlı" veya "etkisiz" biçiminde basit bir sınıflandırmayla açıklanamayacağını göstermektedir. Yeşil ışığın morfolojik ve fotosentetik avantajları, sıcaklık ve mavi:yeşil oranı ile birlikte değerlendirilmelidir.

6. Uzak-Kırmızı Işığın Büyüme ve Verim Üzerine Etkileri

Uzak-kırmızı ışık özellikle meyve veren sebzelerde fitokrom sinyallemesi, bitki mimarisi, kanopi gelişimi ve kuru madde dağılımını değiştirebilmesi nedeniyle önemli bir spektral bileşendir. Vincenzi

et al. (2024), iki sırık domates çeşidinde uzak-kırmızı ışığın uygulama süresi ve fotoperiyot içerisindeki zamanlamasını değerlendirmiştir. Meyve verimi uzak-kırmızı ışığa maruz kalma süresiyle doğrusal olarak artarken, uygulamanın fotoperiyot içerisindeki zamanlaması daha sınırlı etki göstermiştir. Uzak-kırmızı ışık, birim alan başına meyve kuru ağırlığını yaklaşık %23–25 artırmış; bu yanıt hem toplam bitki kuru maddesindeki artış hem de kuru maddenin meyvelere daha yüksek oranda yönlendirilmesiyle ilişkilendirilmiştir (Vincenzi et al., 2024).Benzer şekilde Chen et al. (2024), iki tatlı biber çeşidinde beyaz tamamlayıcı ışığa uzak-kırmızı eklenmesinin kümülatif uzak-kırmızı miktarı arttıkça meyve verimini doğrusal olarak artırdığını bildirmiştir. Verim artışının temel olarak daha yüksek bitki kuru maddesi ve kaynak gücüyle ilişkili olduğu, ayrıca meyve tutumunun arttığı ve meyve çatlamasının azaldığı belirlenmiştir (Chen et al., 2024). Bununla birlikte uzak-kırmızı ışığın olumlu etkileri bütün koşullara genellenmemelidir. Spektral oran, çeşit, gelişme dönemi ve kaynak–havuz dengesi uzak-kırmızı ışığa verilen yanıtı önemli ölçüde değiştirebilir. Bu nedenle uzak-kırmızı ışığın üretim programlarına entegrasyonu yalnızca gövde veya yaprak gelişimi üzerinden değil, toplam biyokütle, meyve tutumu, kuru madde dağılımı ve ürün kalitesi birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır.

7. Fotosentez ve Fizyolojik Performans Üzerine Etkileri

LED spektrumunun fotosentetik performans üzerindeki etkileri; foton absorbsiyonu, pigment kompozisyonu, yaprak morfolojisi, stomatal davranış ve kanopi içerisindeki ışık dağılımındaki değişiklikler aracılığıyla ortaya çıkmaktadır. Kırmızı ve mavi ışık üst yaprakların fotosentetik aktivitesine önemli katkı sağlarken, yeşil ışığın daha derin yaprak ve kanopi katmanlarına ulaşabilmesi bütün bitki düzeyinde ışık kullanımını etkileyebilmektedir. Uzak-kırmızı ışık da diğer fotosentetik dalga boylarıyla birlikte uygulandığında bitki morfolojisi ve kanopi ışık yakalamasını değiştirebilmektedir. Soufi et al. (2023), marulda ışık spektrumunun fotosentetik ve büyüme yanıtlarının besin çözeltisi yönetimiyle birlikte değişebildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Jeong et al. (2025), mavi–yeşil spektral dengenin fizyolojik etkilerinin sıcaklığa bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, kontrollü çevre üretiminde ışığın sıcaklık ve bitki besleme gibi diğer çevresel faktörlerden bağımsız olarak optimize edilmesinin yeterli olmadığını göstermektedir.

Dolayısıyla fotosentetik performansın geliştirilmesinde yalnızca yaprak düzeyindeki anlık fotosentez hızının değil, kanopi ışık dağılımı, yaprak alanı gelişimi, stomatal fonksiyonlar ve toplam kuru madde üretiminin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

8. Verim ve Biyokütle Üretimi Üzerine Etkileri

LED spektrumu, yaprak alanı, kanopi mimarisi, fotosentetik etkinlik, çiçeklenme, meyve tutumu ve asimilat dağılımını değiştirerek verim ve biyokütle oluşumunu etkileyebilmektedir.

Meyve veren sebzelerde uzak-kırmızı ışığın verim üzerindeki etkileri özellikle dikkat çekmektedir. Domateste Vincenzi et al. (2024), uzak-kırmızı ışığın toplam kuru madde üretimini ve meyvelere kuru madde dağılımını artırdığını göstermiştir. Tatlı biberde Chen et al. (2024) ise kümülatif uzak-kırmızı uygulamasıyla meyve verimi arasında pozitif doğrusal ilişki belirlemiştir. Yapraklı sebzelerde spektral yanıt farklı olabilmektedir. Vereshchagin et al. (2024), beyaz LED'e Phyto-LED spektrumunun eklenmesinin marul verimliliğini artırabildiğini bildirmiştir. Farhangi et al. (2025) ise kontrollü çevre dikey tarımında beyaz LED'e derin-kırmızı ve uzak-kırmızı ışık eklenmesini marul ve fesleğende incelemiştir. Yüksek PPFD uygulamasında taze ağırlık beyaz ışık kontrolüne kıyasla marulda %76, fesleğende %79 artarken, aynı PPFD düzeyinde uzak-kırmızı ışık yaprak sayısı ve kanopi gelişimini, derin-kırmızı ışık ise biyokütleyi desteklemiştir (Farhangi et al., 2025). Bu sonuçlar, verim optimizasyonunda spektral kompozisyon ile toplam ışık miktarının birbirinden ayrılarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

9. Fitokimyasal Kalite Üzerine Etkileri

9.1. Fenolik Bileşikler ve Antosiyaninler

Fenolik bileşikler ve antosiyaninler ışık kalitesine duyarlı sekonder metabolitler arasında yer almaktadır. Spektral uygulamalar, bu bileşiklerin biyosentezini büyüme üzerindeki etkilerinden bağımsız biçimde değiştirebilmektedir. Hernández-Adasme et al. (2024), hidroponik sera marulunda mavi, beyaz, mavi-kırmızı ve kırmızı spektral destek uygulamalarının fenolik profili ve fenolik metabolizmayla ilişkili gen ekspresyonunu değiştirdiğini, buna karşın temel agronomik özelliklerin büyük ölçüde korunabildiğini göstermiştir. Bu sonuç, spektral yönetimin ürün miktarından bağımsız olarak biyokimyasal kaliteyi hedeflemek amacıyla kullanılabileceğine işaret etmektedir. Shen et al. (2024) ise hasat öncesi kısa süreli sürekli LED uygulamasının mor yapraklı marulda antosiyanin birikimini artırdığını bildirmiştir. Dolayısıyla özellikle üretimin son dönemindeki hedefli ışık uygulamaları, tüm yetiştirme süresince özel bir spektrum kullanmadan fitokimyasal kalitenin geliştirilmesi açısından önemli olabilir.

9.2. Askorbik Asit

Askorbik asit, ışık çevresindeki değişikliklere duyarlı önemli bir antioksidan ve besinsel kalite bileşenidir. Shen et al. (2024), mor yapraklı hidroponik marulda hasat öncesi sürekli LED uygulamasının askorbik asit içeriğini artırabildiğini göstermiştir. Çalışmada ışık şiddeti ve uygulama süresi arttıkça karotenoid, askorbik asit ve antosiyanin düzeylerinde artış, nitrat içeriğinde ise azalma belirlenmiştir. Bu bulgular, kısa süreli hasat öncesi aydınlatmanın besinsel biyofortifikasyon amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte uygulama şiddeti ve süresinin çeşit ve üretim sistemine göre yeniden optimize edilmesi gerekmektedir.

9.3. Karotenoidler ve Likopen

Karotenoidler, fotosentetik ışık hasadı ve fotokoruma işlevlerinin yanı sıra sebzelerin renk ve besinsel değerini belirleyen önemli bileşiklerdir. LED spektrumu karotenoid metabolizmasını tür ve organ düzeyinde farklı biçimlerde etkileyebilmektedir. Domates meyvesinde spektral uygulamanın gelişme dönemine ve uygulama zamanına bağlı olarak likopen ve diğer kalite bileşenlerini değiştirebildiği bildirilmiştir. Bu nedenle belirli bir mavi:kırmızı veya mavi:yeşil:kırmızı oranının tüm domates çeşitleri için evrensel optimum olarak sunulması uygun değildir. Yapraklı sebzelerde de karotenoid yanıtları spektral uygulamaya bağlıdır. Bergstrand et al. (2025), üretimin son dört gününde uygulanan dar bantlı ışığın marul ve aromatik bitkilerde kimyasal kompozisyonu değiştirebildiğini ve özellikle mavi ile sarı spektral bölgelerin fenolik bileşikler ile lutein/β-karoten konsantrasyonlarını artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

9.4. Çözünür Şekerler, Nitrat ve Lezzet Bileşenleri

LED uygulamaları yalnızca antioksidan bileşikleri değil, sebzelerin lezzet ve tüketici kalitesini belirleyen şekerler, nitrat ve acılık bileşenlerini de etkileyebilmektedir. Shen et al. (2024), mor yapraklı marulda hasat öncesi kısa süreli sürekli LED uygulamasının çözünür şeker içeriğini artırırken nitrat miktarını azalttığını bildirmiştir. Aynı uygulama, maruldaki acılıkla ilişkili lactucin ve lactucopicrin düzeylerini de düşürmüştür. Çalışmada 150 μmol m^{-2} s^{-1} şiddetinde iki günlük sürekli ışık uygulaması, incelenen koşullar içerisinde kalite ve elektrik girdisi açısından uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Ancak bu uygulama tek bir çeşit ve belirli yetiştirme koşullarında belirlenmiştir; dolayısıyla evrensel optimum olarak değil, kısa süreli hasat öncesi ışık stratejilerinin potansiyelini gösteren deneysel bir sonuç olarak değerlendirilmelidir.

10. Sürekli ve Darbeli LED Aydınlatma

Yapay aydınlatmanın elektrik tüketimi, kapalı bitki üretim sistemlerinin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini belirleyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle darbeli LED uygulamaları, enerji tüketimini azaltırken bitki büyümesi ve ürün kalitesini korumaya yönelik alternatif bir strateji olarak araştırılmaktadır. Ali et al. (2024), kırmızı ve yeşil marul çeşitlerinde sürekli LED aydınlatmayı 1 kHz frekanslı darbeli LED uygulamasıyla karşılaştırmıştır. Darbeli aydınlatma önemli düzeyde enerji tasarrufu sağlamakla birlikte, her iki çeşitte taze ağırlığın sürekli aydınlatmaya göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kırmızı marulda sürekli LED uygulaması hasat döneminde daha yüksek fenolik indeks ve daha güçlü sekonder metabolit yanıtı oluşturmuştur (Ali et al., 2024). Bu sonuçlar, elektrik tüketimindeki azalmanın tek başına yüksek üretim etkinliği anlamına gelmediğini göstermektedir. Enerji tasarrufuyla birlikte biyokütle veya ürün kalitesinde önemli kayıplar meydana gelmesi durumunda toplam ekonomik avantaj sınırlanabilir. Bu nedenle pratik hedef yalnızca kullanılan elektrik miktarını azaltmak değil, birim elektrik enerjisi başına elde edilen pazarlanabilir ürün miktarı ve kalitesini optimize etmek olmalıdır.

11. Hasat Öncesi Kısa Süreli Aydınlatma Stratejileri

Üretimin son döneminde uygulanan kısa süreli spektral işlemler, bütün yetiştirme döngüsü boyunca özel veya yüksek yoğunluklu ışık uygulamak yerine hasada yakın dönemde ürün kalitesini yönlendirmeyi amaçlayan bir stratejidir. Shen et al. (2024), hidroponik mor yapraklı marulda hasat öncesi 50, 100 ve 150 μmol m^{-2} s^{-1} şiddetlerinde iki veya dört günlük sürekli LED uygulamalarını değerlendirmiştir. Karotenoid, askorbik asit ve antosiyanin içerikleri artarken nitrat miktarı azalmış; 150 μmol m^{-2} s^{-1} şiddetindeki iki günlük uygulama çalışmanın koşullarında kalite ve elektrik girdisi açısından uygun bulunmuştur. Bergstrand et al. (2025) ise marul ve aromatik bitkilerde hasattan önceki son dört gün boyunca 456, 520, 596 ve 663 nm tepe dalga boylarına sahip dar bantlı ışık uygulamalarını karşılaştırmıştır. Özellikle mavi ve sarı spektral bölgelerin kimyasal kompozisyon üzerinde güçlü etkiler oluşturduğu; fenolik bileşikler ile lutein/β-karoten düzeylerini artırma potansiyeli taşıdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte bazı çeşit ve uygulamalarda taze veya kuru ağırlığın azalması, kalite kazanımı ile biyokütle arasında olası bir ödünleşmeye işaret etmektedir.

12. Kontrollü Çevre ve Dikey Tarım Sistemlerinde LED Aydınlatma

LED teknolojisi, özellikle güneş ışığının sınırlı olduğu veya tamamen yapay ışığa dayalı dikey tarım sistemlerinde üretimin temel bileşenlerinden biridir. Bu sistemlerde ışık spektrumu, PPFD ve fotoperiyot büyük ölçüde kontrol edilebilmekle birlikte, yapay aydınlatmanın yüksek elektrik gereksinimi üretim maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle son yıllarda yalnızca dar bantlı kırmızı–mavi sistemlere odaklanmak yerine geniş spektrumlu beyaz LED'lerin belirli dalga boylarıyla desteklenmesine yönelik çalışmalar artmıştır. Farhangi et al. (2025), beyaz LED tabanlı aydınlatmaya 660 nm derin-kırmızı ve 730 nm uzak-kırmızı ışık eklenmesini marul ve fesleğende değerlendirmiştir. Aynı PPFD altında uzak-kırmızı ışık yaprak sayısı ve kanopi gelişimini desteklerken, derin-kırmızı ışığın biyokütle üzerinde daha belirgin etkiler oluşturduğu bildirilmiştir. Vereshchagin et al. (2024) da beyaz LED ile Phyto-LED kombinasyonlarının marul üretkenliğini artırabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte spektral optimizasyon yalnızca bitkinin biyolojik performansını değil; armatürlerin foton etkinliği, elektrik maliyeti, ürünün ekonomik değeri ve yetiştirme süresini de kapsamalıdır. Gelecekte sensörler, gerçek zamanlı bitki fenotipleme sistemleri ve otomatik kontrol algoritmalarının LED teknolojileriyle entegrasyonu, ışık şiddeti ve spektrumun bitkinin gelişme dönemine ve fizyolojik durumuna göre dinamik olarak ayarlanmasına olanak sağlayabilir.

13. Sınırlamalar ve Gelecek Perspektifleri

LED spektrumu konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmakla birlikte, mevcut literatürün genellenebilirliğini sınırlayan bazı önemli sorunlar bulunmaktadır. Öncelikle spektral yanıtlar bitki türü

ve çeşidine güçlü biçimde bağlıdır. Marulda belirlenen optimum spektral oranların domates, biber veya diğer sebzelere doğrudan aktarılması bilimsel açıdan uygun değildir. İkinci olarak, spektrum ile diğer çevresel faktörler arasındaki etkileşimlerin daha fazla dikkate alınması gerekmektedir. Jeong et al. (2025)'in sonuçları, mavi ve yeşil ışığın etkilerinin 20–28 °C aralığında dahi önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir. Bu nedenle gelecekte spektrum × sıcaklık, spektrum × CO_2, spektrum × besleme ve spektrum × nem etkileşimlerinin faktöriyel deneylerle incelenmesi gerekmektedir. Üçüncü olarak, verim ile fitokimyasal kalite arasında olası ödünleşmeler bulunmaktadır. Biyokütleyi artıran bir spektrum fenolik bileşikler veya pigment konsantrasyonunu aynı ölçüde artırmayabilir. Bu nedenle yalnızca taze ağırlığın maksimumlaştırılması, özellikle fonksiyonel kalite açısından yüksek değer taşıyan sebzelerde yeterli bir optimizasyon kriteri değildir. Dördüncü olarak, enerji etkinliği biyolojik üretkenlikle birlikte değerlendirilmelidir. Ali et al. (2024)'te darbeli LED'in enerji tasarrufu sağlamasına rağmen taze ağırlığın azalması bunun açık bir örneğidir. Gelecekte çalışmaların kWh başına taze biyokütle, kWh başına kuru madde veya kWh başına pazarlanabilir ürün değeri gibi karşılaştırılabilir göstergeler raporlaması yararlı olacaktır. Gelecek araştırmaların ayrıca bitki türü, çeşit ve gelişme dönemine özgü dinamik ışık reçeteleri; kısa süreli hasat öncesi spektral müdahaleler; sensör tabanlı gerçek zamanlı ışık yönetimi; ekonomik optimizasyon ve yapay zekâ destekli kontrollü çevre sistemleri üzerinde yoğunlaşması beklenmektedir. Böyle bir yaklaşım, LED teknolojisinin yalnızca bitki büyümesini artıran bir aydınlatma sistemi olmaktan çıkarak hassas üretim yönetiminin aktif bir bileşeni haline gelmesini sağlayabilir.

14. Sonuç

LED ışık spektrumunun yönetimi, kontrollü çevre koşullarında yetiştirilen sebzelerde morfolojik gelişim, fotosentetik performans, biyokütle oluşumu, verim ve fitokimyasal kaliteyi önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Kırmızı ışık fotosentetik karbon kazanımı ve biyokütle üretiminde önemli bir bileşen iken, mavi ışık bitki mimarisi, stomatal davranış, pigment oluşumu ve sekonder metabolizmanın düzenlenmesinde belirgin rol oynamaktadır. Yeşil ışık, yaprak ve kanopinin daha derin katmanlarına nüfuz ederek ışığın bitki içerisinde daha dengeli dağılımına katkıda bulunabilmekte; ancak bu etkiler sıcaklık ve spektral oranlara bağlı olarak değişebilmektedir. Uzak-kırmızı ışık ise fitokrom aracılı yanıtlar, bitki mimarisi, kuru madde üretimi ve asimilat dağılımı üzerinden özellikle meyve veren sebzelerde büyüme ve verim performansını etkileyebilmektedir. Güncel bulgular, LED aydınlatmanın etkilerinin yalnızca spektral bileşime değil, ışık şiddeti, fotoperiyot, uygulama süresi ve zamanlamasına da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle hasat öncesi kısa süreli ışık uygulamalarının antosiyanin, askorbik asit, karotenoidler ve çözünür şekerler gibi kalite bileşenlerinin birikimini destekleyebildiği ve nitrat gibi istenmeyen bileşenlerin azaltılmasına katkıda bulunabildiği görülmektedir. Bununla birlikte, enerji tüketimini azaltmaya yönelik aydınlatma stratejilerinin biyokütle ve ürün kalitesinde kayıplara yol açabilmesi, enerji etkinliğinin biyolojik üretkenlikten bağımsız olarak değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak, bütün sebze türleri, çeşitler ve üretim koşulları için geçerli tek bir optimum LED spektrumundan söz etmek mümkün değildir. Gelecekte kontrollü çevre tarımında ışık yönetiminin; bitki türü, çeşit, gelişme dönemi ve çevresel koşullara özgü dinamik ışık reçetelerine dayandırılması gerekmektedir. Verim, fitokimyasal kalite, kaynak kullanım etkinliği ve elektrik tüketiminin bütüncül olarak değerlendirilmesi, LED tabanlı sebze üretim sistemlerinin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğinin geliştirilmesi açısından temel öneme sahiptir.

Kaynaklar

Ali, A., Santoro, P., Ferrante, A., & Cocetta, G. (2024). Continuous and pulsed LED applications on red and green lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*) for pre- and post-harvest quality and energy cost assessments. *Scientia Horticulturae, 338*, 113785. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113785

Bergstrand, K.-J., Harju, V., & Tossavainen, M. (2025). End-of-production light treatments as a tool for controlling chemical composition of herbs and lettuce. *Scientia Horticulturae, 352*, 114428. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114428

Chen, S., Kerstens, T., Zepeda, B., Ouzounis, T., Olschowski, S., Marcelis, L. F. M., & Heuvelink, E. (2024). Additional far-red increases fruit yield of greenhouse sweet pepper mainly through enhancing plant source strength. *Scientia Horticulturae*, *338*, 113787. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113787

Farhangi, H., Mozafari, V., Roosta, H. R., Shirani, H., Farhangi, S., & Farhangi, M. (2025). Optimizing LED lighting spectra for enhanced growth in controlled-environment vertical farms. *Scientific Reports*, *15*, 30152. https://doi.org/10.1038/s41598-025-15352-7

Hernández-Adasme, C., Silva, H., Peña, Á., Vargas-Martínez, M. G., Salazar-Parra, C., Sun, B., & Escalona Contreras, V. (2024). Modifying the ambient light spectrum using LED lamps alters the phenolic profile of hydroponically grown greenhouse lettuce plants without affecting their agronomic characteristics. *Plants*, *13*(17), 2466. https://doi.org/10.3390/plants13172466

Jeong, S. J., Zhen, S., Zhang, Q., Khan, M. N. E. A., & Niu, G. (2025). Spectral effects of green and blue light on lettuce morphology, growth, phytochemicals, and antioxidant capacity are temperature-dependent. *Environmental and Experimental Botany*, *237*, 106214. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2025.106214

Shen, W., Zhang, W., Li, J., Huang, Z., Tao, Y., Hong, J., Zhang, L., & Zhou, Y. (2024). Pre-harvest short-term continuous LED lighting improves the nutritional quality and flavor of hydroponic purple-leaf lettuce. *Scientia Horticulturae*, *334*, 113304. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113304

Soufi, H. R., Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2023). The plant growth, water and electricity consumption, and nutrients uptake are influenced by different light spectra and nutrition of lettuce. *Scientific Reports*, *13*, 20766. https://doi.org/10.1038/s41598-023-48284-1

Vereshchagin, M., Pashkovskiy, P., & Tarakanov, I. (2024). Adding Phyto-LED spectrum to white-LED light increases the productivity of lettuce plants. *Horticulturae*, *10*(8), 795. https://doi.org/10.3390/horticulturae10080795

Vincenzi, E., Ji, Y., Kerstens, T., Lai, X., Deelen, S., de Beer, E., Millenaar, F., Marcelis, L. F. M., & Heuvelink, E. (2024). Duration, not timing during the photoperiod, of far-red application determines the yield increase in tomato. *Scientia Horticulturae*, *338*, 113553. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113553

YAPRAKTAN MİKRO BESİN ELEMENTİ UYGULAMALARININ SEBZE BİTKİLERİNDE VERİM, KALİTE VE BESİNSEL DEĞER ÜZERİNE ETKİLERİ

Doç. Dr. Yelderem AKHOUNDNEJAD

Şırnak Üniversitesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, İdil/Şırnak

ORCID ID: 0000-0002-1435-864X

Doç. Dr. Yahya NAS

Şırnak Üniversitesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, İdil/Şırnak

ORCID ID: 0000-0002-6917-8697

ÖZET

Mikro besin elementleri, bitkiler tarafından düşük miktarlarda gereksinim duyulan ancak büyüme, gelişme, verim oluşumu ve ürün kalitesini belirleyen çok sayıda fizyolojik ve metabolik süreçte kritik işlevler üstlenen temel besin elementleridir. Çinko (Zn), demir (Fe), bor (B) ve mangan (Mn); fotosentez, enzim aktivasyonu, hücresel zar bütünlüğünün korunması, generatif gelişim, besin elementi metabolizması ve antioksidan savunma sisteminin düzenlenmesinde önemli roller oynamaktadır. Bu elementlerin yetersizliği, bitki gelişimi ve üreme süreçlerini sınırlandırarak verim kayıplarına ve yenilebilir bitki kısımlarının besinsel kalitesinde azalmaya neden olabilmektedir. Yapraktan gübreleme, özellikle yüksek toprak pH'sı, besin elementlerinin fiksasyonu, kök bölgesindeki elverişsiz koşullar veya elementler arasındaki antagonistik etkileşimler nedeniyle topraktan besin elementi alımının sınırlandığı durumlarda etkili bir besleme stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Güncel araştırmalar, uygun doz ve gelişme döneminde gerçekleştirilen yapraktan mikro besin elementi uygulamalarının vejetatif ve generatif gelişimi destekleyebildiğini, meyve tutumu ve verimi iyileştirebildiğini ve ürünlerin mineral bileşimi ile fiziksel ve fitokimyasal kalite özelliklerini olumlu yönde düzenleyebildiğini göstermektedir. Ayrıca bu uygulamalar, yenilebilir dokularda insan beslenmesi açısından önemli mineral elementlerin konsantrasyonunu artırarak agronomik biyofortifikasyon açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte, yapraktan uygulamaların etkinliği; besin elementinin kimyasal formu ve konsantrasyonu, uygulama zamanı ve sıklığı, yaprak yüzey özellikleri, çevresel koşullar, bitki türü, genotip ve gelişme dönemine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Bu derlemede, Zn, Fe, B ve Mn'nin sebze bitkilerindeki fizyolojik ve besinsel işlevleri ile yapraktan uygulamalarının büyüme, verim, ürün kalitesi, fitokimyasal bileşim ve besinsel değer üzerindeki etkilerine ilişkin güncel bulgular değerlendirilmiştir. Ayrıca mikro besin elementi kullanım etkinliğinin artırılması ve besinsel açıdan zenginleştirilmiş sebzelerin sürdürülebilir üretimine yönelik uygulama yaklaşımları ele alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Yapraktan gübreleme, mikro besin elementleri, sebze bitkileri, biyofortifikasyon, besinsel kalite

EFFECTS OF FOLIAR MICRONUTRIENT APPLICATIONS ON YIELD, QUALITY, AND NUTRITIONAL VALUE OF VEGETABLE CROPS

ABSTRACT

Micronutrients are required by plants in relatively small amounts but perform critical functions in numerous physiological and metabolic processes that determine plant growth, development, yield formation, and product quality. Zinc (Zn), iron (Fe), boron (B), and manganese (Mn) play important roles in photosynthesis, enzyme activation, maintenance of cellular membrane integrity, reproductive

development, nutrient metabolism, and regulation of antioxidant defense systems. Deficiencies of these elements can restrict plant growth and reproductive processes, resulting in yield losses and reduced nutritional quality of edible plant parts. Foliar fertilization has emerged as an effective nutrient management strategy, particularly when nutrient uptake from the soil is limited by high soil pH, nutrient fixation, unfavorable root-zone conditions, or antagonistic interactions among mineral elements. Current research indicates that foliar micronutrient applications at appropriate concentrations and developmental stages can promote vegetative and reproductive growth, improve fruit set and yield, and favorably modify the mineral composition as well as the physical and phytochemical quality attributes of vegetable crops. Moreover, these applications have considerable potential for agronomic biofortification by increasing the concentrations of nutritionally important mineral elements in edible tissues. Nevertheless, the effectiveness of foliar applications can vary considerably depending on the chemical form and concentration of the nutrient, application timing and frequency, leaf surface characteristics, environmental conditions, crop species, genotype, and developmental stage. This review evaluates current findings on the physiological and nutritional functions of Zn, Fe, B, and Mn in vegetable crops and the effects of their foliar application on plant growth, yield, product quality, phytochemical composition, and nutritional value. In addition, application approaches aimed at improving micronutrient-use efficiency and supporting the sustainable production of nutritionally enriched vegetables are discussed.

Keywords: Foliar fertilization, micronutrients, vegetable crops, biofortification, nutritional quality

1. Giriş

Mikro besin elementi yönetimi, yoğun sebze yetiştiriciliğinin temel bileşenlerinden biridir; çünkü nispeten düşük düzeydeki noksanlıklar dahi bitki büyümesini, generatif gelişimi, pazarlanabilir verimi ve ürün kalitesini sınırlandırabilmektedir. Makro besin elementlerine kıyasla çok daha düşük miktarlarda gereksinim duyulmasına rağmen mikro besin elementleri, çok sayıda fizyolojik, biyokimyasal ve gelişimsel süreçte görev almaktadır. Bunlar arasında çinko (Zn), demir (Fe), bor (B) ve mangan (Mn); enzim aktivasyonu, fotosentetik metabolizma, elektron taşınımı, hücre duvarı oluşumu, karbonhidrat metabolizması, generatif gelişim, hücresel zar bütünlüğü ve antioksidan savunma ile ilişkili birbirinden farklı ancak birbiriyle bağlantılı işlevler üstlenmektedir (Ahmed et al., 2024). Nitekim mikro besin elementi noksanlıklarının fotosentetik süreçler, mineral homeostazı ve metabolik düzenleme üzerinde önemli değişikliklere yol açabildiği domates gibi sebze türlerinde deneysel olarak da ortaya konulmuştur (Lodovici et al., 2024). Dolayısıyla yetersiz mikro besin elementi beslenmesi, hem ürün verimliliğini hem de yenilebilir bitki dokularının besinsel kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Dengeli mikro besin elementi beslenmesi, yalnızca noksanlık belirtilerinin önlenmesine yönelik bir uygulama olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir bahçe bitkileri üretiminin önemli bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Mikro besin elementi yönetimi; meyve iriliği, renk, tat ve aroma, besinsel bileşim, biyoaktif bileşikler, pazarlanabilir verim, hasat sonrası performans ve genel ürün kalitesi üzerinde etkili olabilmektedir (Ahmed et al., 2024). Örneğin domateste farklı Zn kaynaklarının yapraktan uygulanması; bitki büyümesi, fizyolojik özellikler, besin elementi alımı, verim ve meyve kalite özelliklerinde önemli değişiklikler oluşturmuş ve yanıtların kullanılan Zn formu ile uygulama dozuna bağlı olduğu gösterilmiştir (Ahmed et al., 2023). Benzer şekilde, ticari sanayi tipi domates çeşitlerinde Zn gübrelemesine verilen verim ve kalite yanıtlarının çeşitlere göre değişebildiği bildirilmiştir (Nas & Duman, 2024). Bu sonuçlar, mikro besin elementi uygulamalarının etkilerinin bitki türü, genotip, başlangıçtaki beslenme durumu, yetiştirme ortamı, besin elementi kaynağı ve uygulama yöntemine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle mikro besin elementi gübrelemesi, tüm üretim koşullarında geçerli standart bir girdi olarak değil, bitki ve yetiştirme koşullarına özgü bir besleme stratejisi olarak değerlendirilmelidir.

Kök bölgesindeki mikro besin elementi yarayışlılığı; toprak pH'sı, organik madde içeriği, nem, mineral elementler arasındaki etkileşimler ve elementlerin kimyasal formlarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Özellikle yüksek pH'lı ve kireçli topraklarda, toplam konsantrasyonları yeterli olsa

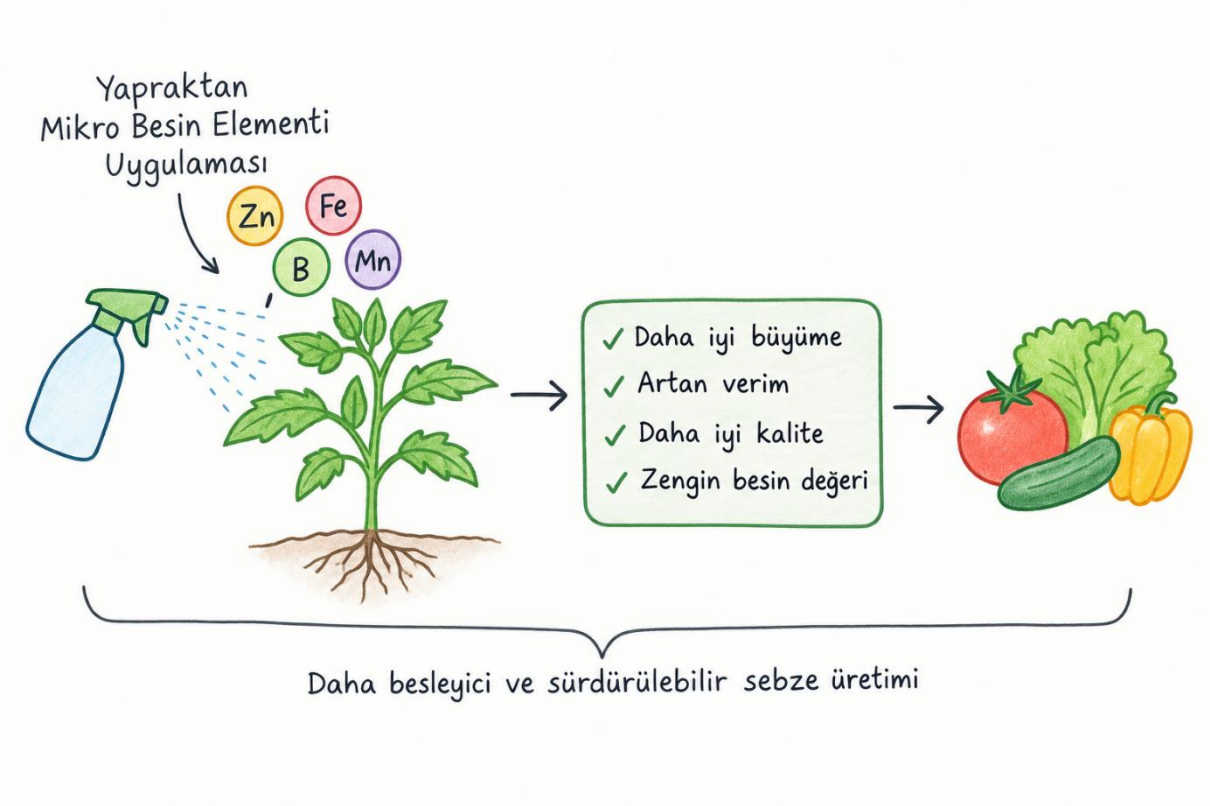
dahi bazı metalik mikro besin elementlerinin bitkiye yarayışlılığı önemli ölçüde azalabilmektedir. Fe bu açıdan önemli bir örnektir; Fe noksanlığı domateste mineral beslenme, metabolik süreçler ve gen ekspresyonu düzeyinde kapsamlı değişikliklere neden olabilmektedir (Lodovici et al., 2024). Alkali koşullarda mikro besin elementlerinin sınırlı yarayışlılığı, bitkinin beslenme durumunu ve buna bağlı fizyolojik ve metabolik süreçleri olumsuz etkileyebilmektedir. Domateste gerçekleştirilen güncel bir araştırma, alkali yetiştirme koşullarında mikro besin elementi temininde kullanılan formülasyonun mineral element birikimini ve metabolik yanıtları önemli ölçüde değiştirebildiğini göstermiştir (Leporino et al., 2025).

Yapraktan gübreleme, mikro besin elementlerinin doğrudan toprak üstü bitki dokularına ulaştırılmasını sağlayan alternatif bir besleme yoludur ve özellikle köklerden besin elementi alımının sınırlandığı koşullarda yararlı olabilmektedir. Bu yaklaşım, besin elementi noksanlıklarının nispeten hızlı biçimde giderilmesini sağlayabildiği gibi, uygulamaların çiçeklenme, meyve tutumu veya hızlı meyve gelişimi gibi kritik gelişme dönemleriyle eş zamanlı gerçekleştirilmesine de olanak tanımaktadır. Domateste yapraktan Fe-glutamat uygulamasının $FeSO_4$ ve L-glutamat uygulamalarına kıyasla büyüme ve verim performansını iyileştirebildiği bildirilmiştir (Mazhar et al., 2022). Benzer şekilde, hıyarda yapraktan ZnO ve Fe_3O_4 nanopartikül uygulamalarının fizyolojik ve biyokimyasal özellikler ile tohum verimini etkileyebildiği gösterilmiştir (Gupta et al., 2022). Bu sonuçlar, yapraktan mikro besin elementi uygulamalarında yalnızca uygulanan elementin değil, kullanılan kimyasal formun da bitki yanıtını belirleyen önemli bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, yapraktan uygulamanın etkinliği; besin elementinin kimyasal yapısı, konsantrasyonu ve formülasyonu, yaprak yüzey özellikleri, bitkinin gelişme dönemi, çevresel koşullar, uygulama hacmi ve uygulama sıklığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Aşırı konsantrasyonlar ise fitotoksisiteye veya besin elementleri arasındaki dengenin bozulmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle yapraktan mikro besin elementi uygulamalarının etkinliği yalnızca uygulama yapılıp yapılmaması üzerinden değil, doz × formülasyon × gelişme dönemi × genotip etkileşimleri dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Güncel araştırmalar, mikro besin elementi yönetiminin yalnızca görünür noksanlık belirtilerinin giderilmesiyle sınırlı olmadığını, aynı zamanda meyve kalitesi ve besinsel bileşimin düzenlenmesinde de etkili olabileceğini göstermektedir. Domateste optimize edilmiş B uygulamalarının perikarp kalınlığı, pH, fenolik bileşik konsantrasyonu ve Zn, Cu ve B dahil olmak üzere meyvenin mineral bileşimini değiştirdiği bildirilmiştir (Mal et al., 2025). Benzer şekilde, alkali koşullarda farklı mikro besin elementi şelatlama stratejilerinin mineral element birikimi, fenolik metabolizma ve antioksidan savunma üzerinde farklı yanıtlar oluşturduğu belirlenmiştir (Leporino et al., 2025). Yapraktan mikro besin elementi uygulamalarının yenilebilir dokulardaki mineral element konsantrasyonlarını artırabilmesi, bu uygulamaları agronomik biyofortifikasyon açısından da önemli hale getirmektedir. Bununla birlikte, toplam mineral konsantrasyonundaki artışın insan beslenmesine sağlayacağı gerçek katkı değerlendirilirken mineral elementlerin biyoyararlılığı da dikkate alınmalıdır.

Bu bulgular, mikro besin elementi gübrelemesinin bitki verimliliği, ürün kalitesi, besin elementi kullanım etkinliği ve besinsel değer açısından bütüncül olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu derlemede, Zn, Fe, B ve Mn'nin sebze bitkilerindeki fizyolojik ve besinsel işlevleri; özellikle yapraktan gübreleme uygulamalarının bitki büyümesi, verim oluşumu, ürün kalitesi, fitokimyasal bileşim ve besinsel biyofortifikasyon üzerindeki etkileri açısından değerlendirilmektedir. Ayrıca besin elementinin kimyasal formu, uygulama dozu ve zamanı, genotipe bağlı farklılıklar, besin elementleri arasındaki etkileşimler ve sürdürülebilir sebze üretiminde mikro besin elementi kullanım etkinliğinin geliştirilmesine yönelik yeni yaklaşımlar ele alınmaktadır. Yapraktan Zn, Fe, B ve Mn uygulamaları, sebze bitkilerinde büyüme ve verimin yanı sıra ürün kalitesi, fitokimyasal bileşim ve besinsel değeri de etkileyebilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Yapraktan mikro besin elementi (Zn, Fe, B ve Mn) uygulamalarının sebze bitkilerinde büyüme, verim, ürün kalitesi, fitokimyasal bileşim ve besinsel değer üzerindeki genel etkilerinin şematik gösterimi.

2. Sebze Yetiştiriciliğinde Mikro Besin Elementlerinin Önemi

Mikro besin elementlerine azot, fosfor ve potasyum gibi makro besin elementlerine kıyasla çok daha düşük miktarlarda gereksinim duyulmasına rağmen, bu elementlerin fizyolojik önemi gereksinim duyulan miktarlarla orantılı değildir. Mikro besin elementleri; yapısal bileşen, enzim kofaktörü ve aktivatörü ve redoks düzenleyicisi olarak görev yapmakta; fotosentez, solunum, generatif gelişim, mineral homeostazı ve sekonder metabolizma gibi temel süreçlere katılmaktadır (Ahmed et al., 2024). Bu nedenle mikro besin elementi noksanlıkları, birden fazla metabolik süreci eş zamanlı olarak etkileyerek fotosentetik performansın, büyümenin, verimin ve ürün kalitesinin azalmasına neden olabilmektedir. Nitekim domateste Fe noksanlığının mineral element homeostazı, metabolik süreçler ve gen ekspresyonunda kapsamlı değişikliklere yol açtığı ve Fe beslenmesi ile diğer besin elementlerinin metabolizması arasında yakın bir ilişki bulunduğu gösterilmiştir (Lodovici et al., 2024).

Zn, çok sayıda enzim sistemi ve proteinin işlevinde rol almakta; zar stabilitesi, protein ve karbon metabolizması, büyümenin düzenlenmesi ve antioksidan savunmaya katkıda bulunmaktadır. Zn beslenmesinin fizyolojik önemi, sebze bitkilerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla da desteklenmektedir. Örneğin yazlık kabakta Zn uygulamasının bitki büyümesi, fotosentetik pigmentler, mineral element dengesi ve antioksidan enzim aktivitelerini etkilediği bildirilmiştir (Behtash et al., 2022). Benzer şekilde, domateste yapraktan Zn ve ZnO nanopartikül uygulamalarının büyüme, verim, besin elementi alımı ve ürün kalite özelliklerini değiştirdiği ve bitki yanıtının Zn kaynağı ile uygulama dozuna bağlı olduğu belirlenmiştir (Ahmed et al., 2023). Bu sonuçlar, Zn'nin fizyolojik işlevlerinin yanı sıra uygun doz ve formülasyon kullanıldığında sebze üretiminde agronomik açıdan da önemli olabileceğini göstermektedir. Fe; fotosentetik ve solunumsal elektron taşınımı, klorofil ile ilişkili metabolik süreçler ve çok sayıda redoks-aktif protein ve enzimin işlevi açısından vazgeçilmez bir mikro besin elementidir. Domateste Fe noksanlığının bitki büyümesini ve pigment içeriğini olumsuz etkilediği, ayrıca Fe yarayışlılığı ile ışık algısının klorofil ve antosiyanin biyosentezi üzerinde önemli

etkileşimler oluşturduğu deneysel olarak gösterilmiştir (Gavassi et al., 2023). Daha yakın tarihli multi-omik bir çalışma da domateste Fe noksanlığının mineral beslenme, metabolit profili ve gen ekspresyonu düzeylerinde geniş kapsamlı yeniden düzenlemelere neden olduğunu ortaya koymuştur (Lodovici et al., 2024). Ayrıca yapraktan Fe_3O_4 nanopartikül uygulamasında düşük uygulama sıklığının domateste fotosentetik ve büyüme parametrelerini iyileştirebildiği, buna karşılık tekrarlanan uygulamaların mineral homeostazını bozarak büyümeyi sınırlandırabildiği bildirilmiştir (Li et al., 2024). Bu bulgular, Fe beslenmesinde yalnızca uygulanan miktarın değil, Fe formu ve uygulama sıklığının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

B; hücre duvarı organizasyonu, zar fonksiyonu, karbonhidrat taşınımı, meristematik aktivite ve özellikle generatif gelişimde önemli görevler üstlenmektedir. Polen çimlenmesi, polen tüpü gelişimi, döllenme ve bunu izleyen meyve tutumu süreçlerinin sebzelerde verim oluşumu açısından kritik olduğu bilinmektedir. Domateste gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, polen tüpünün ovaryuma ulaşması ve döllenmenin meyve tutumu ve gelişimini doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur (Tran et al., 2023). B beslenmesinin bu generatif süreçlerdeki önemi dikkate alındığında, özellikle çiçeklenme öncesi ve çiçeklenme dönemindeki B yönetimi önem kazanmaktadır. Nitekim farklı domates genotiplerinde gerçekleştirilen güncel bir araştırmada, B uygulamasının meyvenin fiziksel özellikleri, fenolik bileşik konsantrasyonu ve mineral bileşimini değiştirdiği ve yanıtların genotipe bağlı olduğu belirlenmiştir (Mal et al., 2025).

Mn ise fotosistem II'nin oksijen oluşturan kompleksinin işlevi açısından temel öneme sahip olup karbon metabolizması, redoks homeostazı ve antioksidan savunmada görev yapan çeşitli enzimlerin kofaktörü olarak işlev görmektedir. Bu nedenle Mn beslenmesindeki bozulmalar fotosentetik elektron taşınımı, karbon asimilasyonu ve oksidatif metabolizmayı etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, sebze bitkilerinde yalnızca Mn'nin yapraktan uygulanmasına odaklanan güncel özgün çalışmalar Zn ve Fe'ye kıyasla daha sınırlıdır. Bu nedenle çoklu mikro besin elementi uygulamalarında belirlenen fizyolojik veya verimsel değişimlerin doğrudan Mn'ye atfedilmesinden kaçınılması gerekmektedir.

Bu elementlerin agronomik önemi yalnızca noksanlık belirtilerinin önlenmesiyle sınırlı değildir. Dengeli mikro besin elementi beslenmesi; bitki büyümesini, verim oluşumunu, meyve kalitesini, besinsel bileşimi, biyoaktif bileşik birikimini ve hasat sonrası performansı geliştirebilmektedir (Ahmed et al., 2024). Bununla birlikte, bu durum mikro besin elementi dozunun artırılmasının her koşulda bitki performansını iyileştireceği şeklinde yorumlanmamalıdır. Mikro besin elementlerinde noksanlık, yeterlilik ve toksisite arasındaki konsantrasyon aralığı genellikle dardır. Örneğin domateste yapraktan Fe_3O_4 nanopartiküllerinin düşük uygulama sıklığında olumlu fizyolojik etkiler oluşturmasına karşılık, tekrarlanan uygulamalar mineral element homeostazını bozmuş ve büyümeyi sınırlandırmıştır (Tombuloglu et al., 2024). Benzer biçimde, Zn'nin fizyolojik etkilerinin de uygulama dozuna bağlı olduğu bildirilmektedir (Ahmed et al., 2023). Dolayısıyla mikro besin elementlerinin etkileri doz, kimyasal form, bitki türü, genotip, gelişme dönemi ve çevresel koşullar birlikte dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle sebze yetiştiriciliğinde mikro besin elementi yönetiminin temel amacı, bitki dokularındaki element konsantrasyonlarını mümkün olduğunca artırmak yerine fizyolojik açıdan yeterli ve dengeli bir beslenme düzeyi sağlamaktır. Bu yaklaşım; yüksek gübre girdileri, alkali yetiştirme ortamları, tuzluluk ve besin elementleri arasındaki antagonistik veya sinerjistik etkileşimlerin mikro besin elementi yarayışlılığını önemli ölçüde değiştirebildiği yoğun üretim sistemlerinde özellikle önemlidir. Mikro besin elementi yönetiminin doz, formülasyon, uygulama yöntemi ve genotip temelinde optimize edilmesi, hem yüksek bitki performansının korunması hem de aşırı uygulamaların yol açabileceği mineral dengesizliklerinin önlenmesi açısından gereklidir.

3. Yapraktan Beslemenin Temel İlkeleri ve Avantajları

Yapraktan gübreleme, çözünmüş besin elementlerinin doğrudan yaprak yüzeyine uygulanmasını içermektedir. Uygulanan besin elementleri kutikula, stomalar, trikomlar veya diğer epidermal yapılar aracılığıyla bitki dokularına girebilmekte; absorpsiyondan sonra lokal metabolik süreçlerde kullanılabilmekte veya elementin bitki içerisindeki hareketliliğine bağlı olarak diğer organlara taşınabilmektedir.

Yapraktan gübrelemenin başlıca avantajlarından biri, besin elementlerinin bitkiye nispeten hızlı biçimde ulaştırılabilmesidir. Bu özellik; yüksek pH, besin elementi fiksasyonu, kök bölgesi stresi veya mineral elementler arasındaki antagonistik etkileşimler nedeniyle kökten alımın sınırlandığı durumlarda özellikle önem taşımaktadır. Yapraktan besleme ayrıca çiçeklenme ve meyve tutumu gibi besin elementi gereksiniminin yüksek olduğu kritik gelişme dönemlerinde hedefli uygulamaların yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Bununla birlikte, yapraktan uygulama kök bölgesi gübrelemesine her koşulda üstün bir yöntem olarak değerlendirilmemelidir. Yaprak dokuları aracılığıyla güvenli biçimde uygulanabilecek besin elementi miktarı sınırlıdır ve yüksek konsantrasyonlar yaprak zararına veya metabolik dengesizliklere neden olabilmektedir. Ayrıca yapraktan absorbe edilen besin elementlerinin bitki içerisindeki hareketliliği elementler arasında önemli farklılık göstermektedir. Dolayısıyla yapraktan gübrelemenin etkinliği; besin elementinin kimyasal formu ve konsantrasyonunun yanı sıra püskürtme çözeltisinin özellikleri, yaprak yaşı, kutikula özellikleri, çevresel koşullar ve bitkinin gelişme dönemine bağlıdır.

Besin elementi formülasyonunun önemi, alkali koşullarda yetiştirilen domateste açık biçimde ortaya konulmuştur. Leporino et al. (2025), peptit esaslı biyoşelatlar ile geleneksel EDTA esaslı şelatları karşılaştırmış ve iki formülasyonun mineral element ve metabolik yanıtlar bakımından farklı etkiler oluşturduğunu belirlemiştir. EDTA esaslı gübreleme, yüksek uygulama dozlarında yaprak Zn ve Cu konsantrasyonlarının artırılmasında daha etkili olurken, peptit esaslı biyoşelat fenolik metabolizma yolları ile antioksidan savunmayı daha belirgin biçimde uyarmıştır. Buna karşılık, bu metabolik farklılıklar temel morfo-fizyolojik özelliklerde önemli değişikliklere yol açmamıştır (Leporino et al., 2025). Bu bulgu, bitki dokularındaki mineral element konsantrasyonunu en fazla artıran formülasyon ile en güçlü fizyolojik veya metabolik yanıtı oluşturan formülasyonun her zaman aynı olmayabileceğini göstermektedir.

4. Başlıca Mikro Besin Elementleri ve Etkileri

4.1. Çinko (Zn)

Çinko; enzim aktivasyonu, protein sentezi, zar bütünlüğü, karbon metabolizması, büyümenin düzenlenmesi ve antioksidan savunmada görev alan çok yönlü bir mikro besin elementidir. Zn noksanlığı yaprak genişlemesini, boğum arası uzamasını, fotosentetik performansı ve generatif gelişimi sınırlandırarak sonuçta bitki verimliliğinin azalmasına neden olabilmektedir.

Özellikle alkali veya kireçli koşullarda topraktaki Zn yarayışlılığının sınırlanması durumunda yapraktan Zn uygulamaları önemli bir besleme stratejisi oluşturabilir. Bitkinin Zn beslenme durumunun iyileştirilmesinin yanı sıra, yapraktan Zn uygulaması agronomik biyofortifikasyon açısından da önemli bir potansiyele sahiptir; çünkü yenilebilir dokulardaki Zn konsantrasyonunun artırılması insanlarda besinsel Zn alımına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte başarılı bir Zn biyofortifikasyonu; uygulama dozu, formülasyon, uygulama zamanı, bitki türü ve genotipi, elementin doku içerisindeki hareketliliği ve absorbe edilen Zn'nin yenilebilir organlara taşınma kapasitesine bağlıdır.

Zn ayrıca diğer mikro besin elementleriyle olan etkileşimleri kapsamında değerlendirilmelidir. Örneğin domateste optimize edilmiş B gübrelemesinin, B birikiminin yanı sıra meyvelerde Zn ve Cu konsantrasyonlarını da değiştirdiği belirlenmiştir (Mal et al., 2025). Benzer şekilde Leporino et al. (2025), alkali koşullarda mikro besin elementi formülasyonunun yaprak Zn ve Cu birikimini değiştirdiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, belirli bir mikro besin elementine verilen yanıtların bitkinin genel mineral beslenme dengesindeki değişikliklerden bağımsız olarak değerlendirilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.2. Demir (Fe)

Demir, fotosentetik ve solunumsal elektron taşınımı, klorofil ile ilişkili metabolik süreçler ve çok sayıda redoks proteini ile enzimin işlevi açısından temel bir mikro besin elementidir. Birçok toprakta toplam

Fe miktarı yüksek olmasına rağmen, alkali ve kireçli koşullarda bitkiye yarayışlı Fe miktarı önemli ölçüde azalabilmektedir.

Kök bölgesinden Fe alımının sınırlandığı koşullarda yapraktan Fe uygulaması, noksanlığın giderilmesine yönelik doğrudan bir yaklaşım sağlayabilir. Bununla birlikte yapraktan Fe uygulamasının etkinliği; kullanılan Fe formuna, yapraktan absorpsiyon kapasitesine, çevresel koşullara ve mevcut Fe noksanlığının şiddetine bağlıdır. Şelatlı formlar Fe'nin stabilitesini ve bitkiye ulaştırılmasını iyileştirebilmekle birlikte, bu formülasyonların agronomik etkinliği hem mineral element birikimi hem de bitkinin fizyolojik yanıtları açısından değerlendirilmelidir.

Burada Fe beslenmesine ilişkin doğrudan kanıtlar ile çoklu mikro besin elementi formülasyonlarından elde edilen sonuçların birbirinden ayrılması önemlidir. Örneğin Leporino et al. (2025) çalışması, alkali koşullarda mikro besin elementi formülasyonlarının değerlendirilmesi açısından oldukça değerlidir; ancak doğrudan Fe'ye özgü bir yapraktan gübreleme denemesi değildir. Bu çalışmanın temel katkısı, farklı şelatlama stratejilerinin mikro besin elementi birikimi, fenolik metabolizma ve antioksidan savunma üzerinde farklı etkiler oluşturabileceğini göstermesidir.

4.3. Bor (B)

Bor, özellikle hücre duvarı yapısı, zar bütünlüğü, karbonhidrat taşınımı, meristem aktivitesi, çiçeklenme, polen çimlenmesi, polen tüpü gelişimi ve generatif başarı açısından bitki büyümesi ve gelişmesinde özgün işlevlere sahiptir. Generatif süreçlerin B beslenme durumuna yüksek duyarlılığı nedeniyle hem B noksanlığı hem de aşırı B uygulaması meyve tutumu ve ürün kalitesi üzerinde önemli sonuçlara yol açabilmektedir.

B yönetiminin optimize edilmesinin önemi konusunda domatesten güçlü deneysel kanıtlar elde edilmiştir. Mal et al. (2025), yedi domates genotipinde beş farklı B uygulama protokolünü karşılaştırmış ve 28 meyve kalite özelliğini değerlendirmiştir. B uygulamasının perikarp kalınlığı, pH, fenolik bileşik konsantrasyonu ve meyvelerin Zn, Cu ve B içerikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. En etkili uygulama, dikim sırasında toprağa 2.0 kg ha^{-1} B uygulanması ile çiçeklenme öncesinde yapraktan 0.125 kg ha^{-1} B uygulamasının birlikte gerçekleştirilmesi olmuştur.

Söz konusu deney koşullarında optimize edilmiş B uygulaması; fiziksel kalite özellikleri, temel besinsel bileşim, antioksidanlarla ilişkili özellikler ve mineral element konsantrasyonlarında iyileşme sağlamış; ayrıca taze tüketim ve işleme açısından hesaplanan genel kalite indekslerini artırmıştır (Mal et al., 2025). Bununla birlikte B uygulamasına verilen yanıtın genotipe önemli ölçüde bağlı olması, belirli bir çeşit için optimize edilmiş gübreleme programının diğer çeşitlere doğrudan genellenmemesi gerektiğini göstermektedir.

4.4. Mangan (Mn)

Mangan, fotosistem II'nin suyu parçalayan kompleksinin işlevsel bir bileşeni olması nedeniyle fotosentetik oksijen oluşumu açısından temel öneme sahiptir. Ayrıca karbon metabolizması, antioksidan savunma ve sekonder metabolizmada görev alan çok sayıda enzimin kofaktörü olarak işlev görmektedir. Bu nedenle Mn noksanlığı fotosentetik etkinliği, klorofil durumunu, biyokütle üretimini ve sonuçta verimi olumsuz etkileyebilmektedir.

Topraktaki Mn yarayışlılığının yüksek pH veya uygun olmayan redoks koşulları nedeniyle sınırlandığı durumlarda yapraktan Mn uygulaması yararlı olabilir. Bununla birlikte Zn ve B ile karşılaştırıldığında, sebze bitkilerinde yalnızca yapraktan Mn uygulamasını inceleyen güncel araştırmalar daha sınırlıdır. Çoklu mikro besin elementi içeren uygulamaların kullanıldığı çalışmalarda gözlenen olumlu etkilerin doğrudan Mn'ye atfedilmemesi gerekmektedir.

Bu durum aynı zamanda önemli bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda Mn'ye özgü doz-yanıt ilişkilerinin, yapraktan absorpsiyon ve bitki içerisindeki hareketliliğin, Fe ve Zn ile etkileşimlerin ve Mn uygulamasının başlıca sebze türlerinde fotosentetik

performans ile yenilebilir ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir.

5. Yapraktan Mikro Besin Elementi Uygulamalarının Bitki Büyümesi Üzerine Etkileri

Yapraktan mikro besin elementi uygulamalarına bağlı vejetatif büyüme yanıtları; bu elementlerin fotosentez, enzim aktivitesi, zar fonksiyonu, hormonal metabolizma, besin elementi homeostazı ve oksidatif dengenin düzenlenmesindeki rolleri aracılığıyla ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte bitki dokularındaki besin elementi konsantrasyonunun artması her zaman biyokütlede oransal bir artışa yol açmamaktadır.

Bu durum Leporino et al. (2025) tarafından domateste gerçekleştirilen çalışmada açık biçimde görülmektedir. EDTA ve peptit esaslı mikro besin elementi formülasyonları mineral birikimi ve metabolik düzenleme açısından farklı yanıtlar oluşturmasına rağmen, temel morfo-fizyolojik özellikler şelat tipinden veya uygulama dozundan önemli ölçüde etkilenmemiştir. Peptit esaslı formülasyon fenolik metabolizma ve antioksidan savunmayı daha fazla uyarırken, EDTA Zn ve Cu birikiminin artırılmasında daha etkili olmuştur.

Bu sonuçlar, yapraktan mikro besin elementi araştırmalarının yorumlanması açısından önemli bir noktayı ortaya koymaktadır: besin elementi birikimi, antioksidan aktivite veya metabolit konsantrasyonundaki artışlar; biyokütle, yaprak alanı, bitki boyu veya diğer doğrudan büyüme parametreleri tarafından desteklenmediği sürece “bitki büyümesinde artış” olarak yorumlanmamalıdır.

6. Verim ve Verim Bileşenleri Üzerine Etkileri

Mikro besin elementleri; fotosentetik kapasitenin korunması, vejetatif gelişim, çiçek oluşumu, polen canlılığı, meyve tutumu, karbonhidrat taşınımı ve asimilat dağılımı gibi birbiriyle bağlantılı süreçler aracılığıyla verimi etkileyebilmektedir. Bu nedenle dengeli mikro besin elementi beslenmesinin bahçe bitkilerinde verim ve ticari kaliteyi geliştirebildiği bildirilmektedir (Ahmed et al., 2024).

B, uygulama zamanının önemini gösteren dikkat çekici bir örnektir. Mal et al. (2025), domateste dikim sırasında toprağa B uygulanması ile çiçeklenme öncesi yapraktan B uygulamasının birlikte gerçekleştirildiği stratejinin meyve kalite indekslerinde en güçlü genel iyileşmeyi sağladığını bildirmiştir. Çiçeklenme öncesi uygulamanın etkinliği, B'nin generatif gelişimdeki temel fizyolojik rolüyle uyumludur.

Bununla birlikte, yapraktan mikro besin elementi uygulamasına bağlı verim yanıtının büyüklüğü bitkinin başlangıçtaki beslenme durumuna önemli ölçüde bağlıdır. Besin elementleri bakımından yeterli düzeyde beslenen bitkilerde ilave yaprak uygulamaları sınırlı bir verim yanıtı oluşturabilir veya etkiler esas olarak mineral ve fitokimyasal bileşim üzerinde ortaya çıkabilir. Bu nedenle çalışmaların noksanlığın giderilmesi, verim artışı ve kalite odaklı takviye uygulamalarını birbirinden ayırması gerekmektedir.

7. Ürün Kalitesi ve Fitokimyasal Bileşenler Üzerine Etkileri

Mikro besin elementi yönetimi; mineral bileşim, meyvenin fiziksel ve yapısal özellikleri, şeker ve organik asit metabolizması, pigment oluşumu, fenolik metabolizma ve antioksidan savunmadaki değişiklikler aracılığıyla sebzelerin ürün kalitesini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bununla birlikte bu etkiler, uygulanan elementin türü ve dozu kadar uygulama yöntemi, kimyasal form, genotip ve yetiştirme koşullarına da bağlıdır. Bu nedenle mikro besin elementi uygulamalarının kalite üzerindeki etkilerinin yalnızca mineral element birikimi üzerinden değil, fiziksel, biyokimyasal, fitokimyasal ve besinsel kalite özellikleri birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Mal et al. (2025), B yönetiminin domates meyve kalitesinin birden fazla boyutunu eş zamanlı olarak değiştirebildiğine ilişkin kapsamlı deneysel kanıtlar sunmuştur. B uygulaması perikarp kalınlığı, pH,

fenolik bileşik konsantrasyonu ve meyvenin mineral bileşimini etkilemiştir. Bu bulgular, mikro besin elementi yönetiminin ürünün fiziksel, biyokimyasal ve besinsel özelliklerini eş zamanlı olarak değiştirebileceğini göstermektedir.

Zn uygulamalarından elde edilen güncel sonuçlar da mikro besin elementlerinin fitokimyasal kalite üzerindeki etkilerini desteklemektedir. Babanjeet et al. (2026), domateste topraktan ve yapraktan Zn, Fe ve I uygulamalarını karşılaştırmış ve özellikle %0.5 $ZnSO_4$'ün yapraktan uygulanmasının meyvelerin besinsel ve fonksiyonel özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağladığını bildirmiştir. Bu uygulama sonucunda likopen, toplam karotenoid, toplam fenolik ve flavonoid içeriklerinin yanı sıra fenilalanin amonyak liyaz, peroksidaz ve askorbat peroksidaz aktivitelerinde de önemli artışlar belirlenmiştir. Ayrıca meyvelerde mineral element birikiminin artması, yapraktan Zn uygulamasının hem fitokimyasal kalite hem de mineral biyofortifikasyon açısından etkili olabileceğini göstermiştir (Babanjeet et al., 2026).

Zn'nin kalite üzerindeki etkileri yapraklı sebzelerde de ortaya konulmuştur. Marulda farklı Zn kaynaklarının karşılaştırıldığı bir araştırmada, ZnO nanopartikül uygulamalarının biyokütle ve fotosentetik pigmentlerin yanı sıra toplam fenolik, flavonoid ve C vitamini gibi antioksidan bileşenleri de artırabildiği belirlenmiştir. Ayrıca CAT ve APX aktiviteleri ile yapraklardaki Zn ve diğer mineral elementlerin konsantrasyonlarında değişiklikler meydana gelmiştir. Özellikle geleneksel Zn kaynağına kıyasla daha düşük eşdeğer Zn dozlarında olumlu yanıtların elde edilmesi, besin elementinin yalnızca miktarının değil, uygulanan kimyasal formunun da kalite açısından önemli olduğunu göstermektedir (Garza-Alonso et al., 2023).

Fe uygulamalarının ürün kalitesi üzerindeki etkileri de kullanılan kompleks yapıya bağlı olarak değişebilmektedir. Biberde gerçekleştirilen bir çalışmada, yapraktan Fe-fulvik asit uygulamasının meyvelerde C vitamini ve fenolik bileşiklerin konsantrasyonunu artırdığı, aynı zamanda amino asit, karbonhidrat ve lipit metabolizmasıyla ilişkili çok sayıda metabolitte değişiklik oluşturduğu belirlenmiştir. Fe-fulvik asit uygulaması ayrıca meyvelerde Cd ve Ba birikimini azaltmıştır. Bu sonuçlar, uygun Fe formülasyonlarının yalnızca Fe beslenmesini değil, ürünün fitokimyasal bileşimini ve gıda güvenliğiyle ilişkili bazı özelliklerini de etkileyebileceğini göstermektedir.

Mn'nin kalite üzerindeki rolüne ilişkin bulgular yapraklı sebzelerde de dikkat çekmektedir. İki yıllık bir tarla denemesinde ıspanağa farklı N düzeyleriyle birlikte yapraktan Mn ve Mo uygulanması, bitki büyümesi ve kimyasal bileşim üzerinde önemli etkiler oluşturmuş ve yapraklardaki nitrat birikimini azaltmıştır. Sonuçlar, mikro besin elementi yönetiminin yapraklı sebzelerde yalnızca mineral konsantrasyonunun artırılması açısından değil, nitrat gibi kalite ve gıda güvenliği açısından önemli bileşenlerin düzenlenmesi bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

B uygulamalarının etkileri de domatesle sınırlı değildir. Sera koşullarında biberde farklı borik asit dozlarının yapraktan uygulama ve fertigasyon yoluyla karşılaştırıldığı bir çalışmada, uygulama yöntemi ve B konsantrasyonunun verim ve bitkinin beslenme durumu üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Yapraktan 0.5 g L^{-1} borik asit uygulaması en yüksek meyve verimiyle ilişkilendirilirken, B uygulamaları Fe, Mn, Zn, Cu ve diğer mineral elementlerin bitki dokularındaki konsantrasyonlarını da değiştirmiştir. Bu sonuçlar, tek bir mikro besin elementi uygulamasının diğer mineral elementlerin birikimini de etkileyebileceğini ve kalite yanıtlarının besin elementleri arasındaki etkileşimlerden bağımsız değerlendirilemeyeceğini göstermektedir. Bununla birlikte, mikro besin elementi uygulamalarının kalite üzerindeki etkileri her zaman olumlu ve doğrusal değildir. Sera koşullarında yetiştirilen iki mini-plum domates çeşidinde gerçekleştirilen güncel bir çalışmada, yapraktan Zn-EDTA uygulaması meyvelerin toplam Zn konsantrasyonunu %66 artırırken verimde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Bununla birlikte Zn biyolojik erişilebilirliği %26 azalmış ve toplam şeker, malik asit, sitrik asit, TSS/TA oranı, likopen ve tomatin gibi bazı önemli kalite özelliklerinde çeşide bağlı değişiklikler ortaya çıkmıştır. Özellikle 'Black Pearl' çeşidinin kalite yanıtlarının daha belirgin olması, yapraktan Zn biyofortifikasyonunun etkilerinin genotipe bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.

Benzer şekilde, domates bitkilerine yapraktan uygulanan farklı metal oksit nanomateryallerinin meyve kalitesi üzerinde birbirinden farklı etkiler oluşturduğu bildirilmiştir. Fe_3O_4, $MnFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, $Zn_{0.5}Mn_{0.5}Fe_2O_4$, Mn_3O_4 ve ZnO uygulamalarının karşılaştırıldığı çalışmada bazı uygulamalar

başlangıçta likopen ve β-karoten içeriğini azaltırken, Zn içeren bazı nanomateryaller hasat sonrası depolama döneminde toplam fenolik bileşiklerin birikimini artırmıştır. Bu sonuçlar, mikro besin elementi uygulamalarının pigment ve fenolik metabolizma üzerindeki etkilerinin kullanılan element ve formülasyona, ayrıca hasat sonrası döneme bağlı olarak değişebileceğini ortaya koymaktadır.

Mikro besin elementi formülasyonu, vejetatif büyümede önemli bir değişiklik oluşturmadan sekonder metabolizmayı da etkileyebilmektedir. Leporino et al. (2025), alkali koşullarda peptit esaslı biyoşelat uygulamasının temel morfo-fizyolojik özelliklerde sınırlı değişiklik oluşturmasına rağmen fenolik metabolizma ve antioksidan savunmayla ilişkili yolları uyardığını belirlemiştir. Bu durum, mikro besin elementi uygulamalarına bağlı metabolik ve kalite yanıtlarının her zaman büyüme veya biyokütle değişimleriyle paralel gerçekleşmediğini göstermektedir. Bu ayrım, Stoeva et al. (2026) tarafından gerçekleştirilen güncel domates çalışmasında daha açık biçimde ortaya konulmuştur. Farklı toprak, yaprak ve kombine mikro besin elementi uygulamalarının karşılaştırıldığı çalışmada Fe, Zn, Mn ve Cu bakımından en yüksek mineral zenginleşmesi yüksek uygulama düzeyinde elde edilmiş; ancak aynı uygulama verimde belirgin bir azalmaya neden olmuştur. Buna karşılık orta düzeydeki uygulamalar, verimliliği büyük ölçüde korurken meyvelerin mineral içeriğini ve bazı kalite özelliklerini iyileştirmiştir. Araştırmada en yüksek bütünleşik kalite indeksinin de en yüksek gübreleme dozunda değil, orta düzeyde kombine uygulamada elde edilmesi, maksimum mineral birikiminin her zaman optimum ürün kalitesi ve verim anlamına gelmediğini göstermektedir (Stoeva et al., 2026).

Sonuç olarak, mikro besin elementi uygulamalarının verim, mineral zenginleşme ve fitokimyasal kalite üzerindeki etkilerinin birbirinden bağımsız ancak bütüncül olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Biyokütlede veya verimde sınırlı değişiklik oluşturan bir uygulama mineral bileşimi, fenolik bileşikler, karotenoidler, C vitamini veya antioksidan kapasiteyi geliştirebilirken, maksimum mineral birikimini sağlayan yüksek dozlar verim kaybına veya bazı duyusal ve fonksiyonel kalite özelliklerinde olumsuz değişikliklere neden olabilmektedir. Ayrıca yapraklı sebzelerde nitrat birikimi ve meyve sebzelerinde ağır metal birikimi gibi gıda güvenliğiyle ilişkili parametrelerin de dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla mikro besin elementi yönetiminde temel hedef, yalnızca en yüksek doku konsantrasyonunu veya verimi elde etmek yerine verim, mineral zenginleşme, fitokimyasal kalite, besinsel değer ve gıda güvenliğini birlikte optimize etmek olmalıdır.

8. Mikro Besin Elementi Biyofortifikasyonu ve İnsan Beslenmesi

Agronomik biyofortifikasyon, tarımsal uygulamalar yoluyla yenilebilir bitki dokularındaki insan beslenmesi açısından önemli mineral elementlerin konsantrasyonunu ve ideal olarak biyolojik erişilebilirliğini ve biyoyararlılığını artırmayı amaçlamaktadır. Zn ve Fe bu açıdan özellikle önemlidir; çünkü bu elementlerin yetersiz besinsel alımı küresel ölçekte "gizli açlık" sorununun önemli bileşenlerinden biridir. Sebzelerin geniş tüketim alanına sahip olması ve birçok türün taze veya minimum düzeyde işlenerek tüketilmesi, bu ürünleri agronomik biyofortifikasyon açısından önemli hedefler haline getirmektedir (de Moraes et al., 2022; da Silva et al., 2024).

Yapraktan gübreleme, agronomik biyofortifikasyonun uygulanabilir yaklaşımlarından biridir. Besin elementleri bitkinin gelişme döneminde doğrudan yaprak yüzeyine uygulanabilmekte ve elementin yaprak tarafından absorpsiyonu, bitki içindeki hareketliliği, uygulama zamanı ve sıklığına bağlı olarak yenilebilir organlarda birikebilmektedir. Nitekim yapraktan $ZnSO_4$ uygulanan marulda Zn konsantrasyonunun yanı sıra verim ve bazı nutraseutik özelliklerin de uygulama dozuna bağlı olarak değiştiği bildirilmiştir (Preciado-Rangel et al., 2021). Bu durum, yapraktan uygulamaların yalnızca mineral konsantrasyonunu artıran bir araç olarak değil, agronomik performans ve ürün kalitesini birlikte etkileyebilen bir biyofortifikasyon stratejisi olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte biyofortifikasyon başarısı yalnızca uygulanan mineral element miktarına bağlı değildir. Genotip, bitki türü, yetiştirme sistemi, çevre koşulları, elementin kimyasal formu ve diğer mineral elementlerle olan etkileşimler, yenilebilir dokulardaki birikimi önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Örneğin tropik koşullarda marulun Zn ile agronomik biyofortifikasyonunda yaprak Zn konsantrasyonunun önemli ölçüde artırılabildiği, ancak yüksek Zn düzeylerinin biyokütlede azalma ve oksidatif stres oluşturabildiği bildirilmiştir (de Moraes et al., 2022). Bu sonuçlar, maksimum

mineral birikiminin her zaman optimum agronomik performans anlamına gelmediğini ve biyofortifikasyon dozunun dikkatli biçimde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, hidroponik marulda Fe ve Zn konsantrasyonlarının birlikte değiştirilmesi bu iki elementin yenilebilir dokulardaki birikiminin birbirinden bağımsız olmadığını göstermiştir. Besin çözeltisindeki Fe konsantrasyonunun artırılması yaprak Fe içeriğini ve Fe biyofortifikasyonunu artırırken, yüksek Fe düzeyleri yaprak Zn konsantrasyonunu, yaprak alanını ve kuru madde birikimini olumsuz etkileyebilmiştir. Zn konsantrasyonundaki artış ise hasatta askorbik asit içeriğini artırmıştır (da Silva et al., 2024). Bu bulgular, Fe ve Zn'nin eş zamanlı biyofortifikasyonunda elementler arası etkileşimlerin ve kalite özelliklerinin birlikte değerlendirilmesinin önemini göstermektedir.

Biyofortifikasyon; geleneksel ıslah, moleküler yaklaşımlar, genetik mühendisliği ve entegre agronomik uygulamalar yoluyla da gerçekleştirilebilmektedir (Azeem et al., 2025). Bununla birlikte kısa üretim döngüsüne sahip sebzelerde agronomik uygulamalar, mevcut çeşitlerin genetik yapısını değiştirmeden üretim süreci içerisinde uygulanabilmeleri nedeniyle pratik bir seçenek sunmaktadır. Özellikle yapraklı sebzelerde yenilebilir organın doğrudan hedeflenebilmesi, Zn ve Fe gibi mikro besin elementlerinin agronomik olarak zenginleştirilmesi açısından önemli bir avantaj sağlayabilir. Ancak yenilebilir dokulardaki toplam mineral element konsantrasyonunun artması, doğrudan aynı oranda daha yüksek besinsel yarar anlamına gelmemektedir. Bu ayrım Cannata et al. (2025) tarafından mini-plum domateslerde açık biçimde gösterilmiştir. Yapraktan Zn-EDTA uygulaması meyvelerin toplam Zn konsantrasyonunu %66 artırmasına rağmen Zn biyolojik erişilebilirliği %26 azalmış ve sonuçta biyolojik olarak erişilebilir Zn miktarındaki artış %23 ile sınırlı kalmıştır. Ayrıca iki domates çeşidinin toplam ve biyolojik olarak erişilebilir Zn bakımından farklı yanıtlar vermesi, biyofortifikasyon etkinliğinin genotipe bağlı olduğunu da göstermiştir. Dolayısıyla yalnızca toplam Zn konsantrasyonuna dayalı değerlendirmeler, uygulamanın insan beslenmesine gerçek katkısını olduğundan yüksek gösterebilir.

Biyofortifikasyonun başarısının değerlendirilmesinde ürün kalitesi de göz ardı edilmemelidir. Marulda yapraktan Zn biyofortifikasyonunun uygun dozlarda Zn konsantrasyonunu, verimi ve nutraseutik kaliteyi artırabildiği; ancak daha yüksek dozlarda biyolojik aktif bileşiklerin sentezinde azalmaların ortaya çıkabildiği bildirilmiştir (Preciado-Rangel et al., 2021). Benzer şekilde de Moraes et al. (2022), yüksek Zn düzeylerinde oksidatif hasarın artabileceğini göstermiştir. Bu nedenle biyofortifikasyon uygulamalarında hedef, yenilebilir dokuda mümkün olan en yüksek mineral konsantrasyonuna ulaşmak yerine güvenli ve agronomik olarak sürdürülebilir bir zenginleştirme düzeyinin belirlenmesi olmalıdır. Bu konu sebze bitkileri açısından ayrıca önemlidir; çünkü birçok sebze taze veya minimum düzeyde işlenerek tüketilmektedir. Bununla birlikte mineral elementlerin tüketiciye gerçek katkısının belirlenebilmesi için toplam mineral konsantrasyonunun yanında biyolojik erişilebilirlik, biyoyararlılık, antinutrisyonel bileşiklerle etkileşimler, tüketilen porsiyon miktarı ve hasat sonrası depolama ile işleme süreçlerinde meydana gelen kayıplar da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle gelecekteki sebze biyofortifikasyonu araştırmalarının yalnızca toplam Zn veya Fe konsantrasyonlarının belirlenmesiyle sınırlı kalmaması; agronomik performans, ürün kalitesi, mineral elementler arası etkileşimler ve in vitro sindirim temelli biyolojik erişilebilirlik ölçümlerinin insan beslenmesine ilişkin göstergelerle bütünleştirilmesi gerekmektedir (Cannata et al., 2025).

9. Doz, Uygulama Zamanı ve Uygulama Yönteminin Etkileri

Yapraktan mikro besin elementi uygulamalarının etkinliği; doz, bitkinin gelişme dönemi, besin elementinin kimyasal formu ve formülasyonu, uygulama sıklığı ve uygulama sırasındaki çevresel koşullardan önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu faktörler, uygulanan elementin yaprak yüzeyinde tutulmasını, yaprak dokularına penetrasyonunu, absorpsiyonunu ve bitki içerisindeki taşınımını belirleyerek uygulamanın agronomik etkinliğini değiştirebilmektedir (Fernández & Eichert, 2009).

Doz özellikle önemlidir; çünkü mikro besin elementlerinde noksanlık, yeterlilik ve toksisite arasındaki aralık genellikle dardır. B, Zn, Fe veya Mn'nin aşırı konsantrasyonlarda uygulanması fitotoksisiteye, besin elementi dengesizliklerine veya bitki performansında azalmaya neden olabilmektedir. Bu nedenle tek bir uygulama dozunun değerlendirildiği çalışmalar yerine, farklı dozların karşılaştırıldığı doz-yanıt

deneyleri optimum uygulama düzeyinin belirlenmesi açısından daha açıklayıcı sonuçlar sağlamaktadır. Nitekim Ahmed et al. (2023), domateste farklı konsantrasyonlarda yapraktan Zn ve ZnO nanopartikül uygulamalarını karşılaştırmış ve büyüme, fizyolojik özellikler, verim, besin elementi alımı ve meyve kalitesinin uygulama dozuna bağlı olarak değiştiğini bildirmiştir. Çalışmada ZnO nanopartiküllerinin 75, 100 ve 125 mg L^{-1} dozları arasında 100 mg L^{-1} uygulamasının birçok büyüme, verim ve kalite özelliği bakımından daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, mikro besin elementi uygulamalarında daha yüksek dozun her zaman daha güçlü bir agronomik yanıt oluşturmadığını göstermektedir.

Uygulama zamanı da benzer şekilde kritik öneme sahiptir. Mal et al. (2025), domateste dikim sırasında toprağa B uygulanmasının çiçeklenme öncesi yapraktan B uygulamasıyla birleştirilmesinin alternatif uygulama programlarına kıyasla meyve kalitesinde daha güçlü genel yanıtlar oluşturduğunu göstermiştir. Araştırmada, dikim sırasında toprağa 2.0 kg ha^{-1} B ile çiçeklenme öncesinde yapraktan 0.125 kg ha^{-1} B uygulamasının birlikte kullanıldığı program en etkili uygulama olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, besin elementi uygulamasının bitkinin fizyolojik gereksiniminin yüksek olduğu gelişme dönemleriyle eş zamanlı hale getirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Uygulama sıklığı da toplam uygulama dozu kadar önemli olabilmektedir. Tombuloglu et al. (2024), kiraz domatesinde 500 mg L^{-1} Fe_3O_4 nanopartikül süspansiyonunu haftada bir, iki, üç veya dört kez yapraktan uygulamış ve uygulama sıklığına bağlı belirgin fizyolojik farklılıklar saptamıştır. Haftada bir kez gerçekleştirilen uygulama fotosentetik parametreler ve büyüme özellikleri üzerinde olumlu etkiler oluştururken, daha sık tekrarlanan uygulamalar mineral element homeostazını bozmuş, fotosentetik performansı baskılamış ve büyüme geriliğine neden

olmuştur (Tombuloglu et al., 2024). Bu bulgular, yapraktan mikro besin elementi uygulamalarında yalnızca konsantrasyonun değil, uygulama sıklığı ve buna bağlı toplam maruziyetin de optimizasyon açısından dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Besin elementinin formülasyonu da uygulama etkinliğini belirleyen başlıca faktörlerden biridir. İnorganik tuzlar, sentetik şelatlar, biyolojik olarak parçalanabilir şelatlar, peptit esaslı kompleksler ve diğer yeni formülasyonlar; kimyasal stabilite, yapraktan absorpsiyon, bitki içerisindeki hareketlilik ve fizyolojik etkiler açısından önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Leporino et al. (2025), alkali koşullarda EDTA ve peptit esaslı mikro besin elementi formülasyonlarının mineral birikimi ve metabolik yanıtlar bakımından farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, bitki dokularında en yüksek mineral element birikimini sağlayan formülasyonun her zaman en güçlü fizyolojik veya metabolik yanıtı oluşturmayabileceğini göstermektedir.

Yapraktan uygulama sırasındaki çevresel koşulların da ayrıntılı biçimde değerlendirilmesi ve raporlanması gerekmektedir. Yaprak yüzeyine uygulanan çözeltinin penetrasyonu; yaprak ve kutikula özelliklerinin yanı sıra püskürtme çözeltisinin fizikokimyasal özellikleri, kullanılan yardımcı maddeler ve uygulama sırasındaki çevresel koşullardan etkilenmektedir (Fernández & Eichert, 2009). Özellikle sıcaklık ve bağıl nem, püskürtülen damlacıkların yaprak yüzeyinde kalma ve kuruma süresini değiştirerek besin elementlerinin penetrasyonunu etkileyebilmektedir. Yaprak yaşı ve yüzey özellikleri, püskürtme hacmi, yüzey aktif maddelerin kullanımı ve uygulama sonrasındaki yağış veya sulama koşulları da yapraktan besin elementi alımının etkinliğini değiştirebilecek faktörlerdir. Dolayısıyla yapraktan mikro besin elementi uygulamalarına ilişkin önerilerin yalnızca uygulanan besin elementinin konsantrasyonuna dayandırılması yeterli değildir. Çalışmalarda kullanılan kimyasal form ve formülasyon, uygulama dozu, püskürtme hacmi, uygulama sıklığı, gelişme dönemi ve uygulama sırasındaki çevresel koşulların açık biçimde raporlanması gerekmektedir. Bu değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi, farklı araştırmaların karşılaştırılabilirliğini ve sonuçların ticari sebze yetiştiriciliğine aktarılabilirliğini artıracaktır.

10. Gelecek Perspektifleri

Yapraktan mikro besin elementi yönetimine yönelik gelecekteki araştırmaların yalnızca “uygulama yapılan ve yapılmayan” bitkilerin karşılaştırılmasının ötesine geçerek mekanistik, nicel ve bitki türüne özgü optimizasyon yaklaşımlarına yönelmesi gerekmektedir.

İlk olarak, genotipe özgü doz-yanıt çalışmalarına gereksinim bulunmaktadır. Mal et al. (2025) tarafından domates genotiplerinin B uygulamasına verdikleri yanıtlarda belirlenen önemli farklılıklar, belirli bir genotip için optimize edilen gübreleme programının başka bir genotip için aynı düzeyde etkili olmayabileceğini göstermektedir. İkinci olarak, mikro besin elementleri arasındaki etkileşimlere daha fazla önem verilmelidir. B uygulamasının meyvelerde Zn ve Cu konsantrasyonlarını değiştirebilmesi, mikro besin elementi uygulamalarının yalnızca uygulanan elementi değil, bitkinin genel mineral homeostazını da etkileyebileceğini göstermektedir. Üçüncü olarak, peptit esaslı biyoşelatlar, biyolojik olarak parçalanabilir şelatlayıcı maddeler ve kontrollü salım sistemleri gibi yeni besin elementi formülasyonlarının bütünleşik fizyolojik ve moleküler yaklaşımlarla değerlendirilmesi gerekmektedir. Leporino et al. (2025) tarafından kullanılan multi-omik yaklaşım; fenotipleme, mineral analizleri, metabolomik ve transkriptomik yöntemlerin birlikte kullanılmasının yalnızca biyokütle veya verim ölçümleriyle belirlenemeyecek uygulama etkilerinin ortaya çıkarılmasındaki önemini göstermektedir. Dördüncü olarak, biyofortifikasyon araştırmalarında bitki besleme ile insan beslenmesine ilişkin göstergelerin bütünleştirilmesi gerekmektedir. Toplam mineral element konsantrasyonu önemli bir başlangıç noktası olmakla birlikte, biyolojik erişilebilirlik, biyoyararlılık ve gıda işleme uygulamalarıyla etkileşimler, biyofortifiye sebzelerin gerçek besinsel değerinin belirlenmesinde dikkate alınmalıdır. Son olarak, agronomik yanıtlar ekonomik ve çevresel analizlerle birlikte değerlendirilmelidir. Yapraktan mikro besin elementi uygulama programlarının ticari üretim koşullarında uygulanabilir olabilmesi için verim, kalite, besinsel değer veya gübre kullanım etkinliğinde sağlanan kazanımların ek uygulama maliyetini ve çevresel yükü karşılayabilecek düzeyde olması gerekmektedir.

11. Sonuç

Yapraktan mikro besin elementi gübrelemesi, özellikle yüksek toprak pH'sı, besin elementi fiksasyonu, elverişsiz çevresel koşullar veya mineral elementler arasındaki antagonistik etkileşimler nedeniyle kök bölgesindeki besin elementi yarayışlılığının sınırlandığı durumlarda, sebze yetiştiriciliğinde besin elementi yönetiminin önemli bir bileşenidir. Zn, Fe, B ve Mn birbirinden farklı ancak birbiriyle ilişkili fizyolojik işlevler üstlenmekte ve bitki büyümesi, generatif gelişim, ürün kalitesi, mineral bileşim ve fitokimyasal metabolizmayı etkileyebilmektedir. Mevcut bilimsel bulgular, mikro besin elementi yönetiminin yalnızca görünür noksanlık belirtilerinin giderilmesiyle sınırlı olmadığını göstermektedir. Uygun besin elementi dozu, formülasyonu ve gelişme dönemine göre belirlenen uygulama zamanı; meyve kalitesini, mineral bileşimi, sekonder metabolizmayı ve besinsel değeri değiştirebilmektedir. Bununla birlikte bu yanıtlar; bitki türü, genotip, başlangıçtaki beslenme durumu, besin elementinin kimyasal formu, uygulama dozu ve zamanı ile çevresel koşullara önemli ölçüde bağlıdır. Sonuç olarak, yapraktan mikro besin elementi uygulamaları her dozda ve her gelişme döneminde yararlı olan standart bir uygulama olarak değerlendirilmemelidir. Gelecekte geliştirilecek mikro besin elementi yönetim stratejilerinin; bitki verimliliği, ürün kalitesi, besin elementi kullanım etkinliği, besinsel biyofortifikasyon, ekonomik uygulanabilirlik ve çevresel sürdürülebilirliği bütüncül biçimde dikkate alması gerekmektedir. Bu yaklaşım, yoğun ve kontrollü sebze üretim sistemleri için hassas ve sürdürülebilir mikro besin elementi yönetim programlarının geliştirilmesinde temel öneme sahip olacaktır.

Kaynaklar

Ahmed, N., Zhang, B., Chachar, Z., Li, J., Xiao, G., Wang, Q., Hayat, F., Deng, L., Narejo, M.-U.-N., Bozdar, B., & Tu, P. (2024). Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. *Scientia Horticulturae, 323*, 112512. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512

Ahmed, R., Uddin, M. K., Quddus, M. A., Abd Samad, M. Y., Hossain, M. A. M., & Haque, A. N. A. (2023). Impact of foliar application of zinc and zinc oxide nanoparticles on growth, yield, nutrient uptake and quality of tomato. *Horticulturae, 9*(2), 162. https://doi.org/10.3390/horticulturae9020162

Azeem, A., Khan, S., Zia Ul Haq, M., Shafiq, S., Aslam, M. T., Munir, S., & Zaman, M. S. (2025). Biofortification strategies for enhancing crop nutritional value: A review of methods, challenges, and future directions. *Discover Plants, 2*, 185. https://doi.org/10.1007/s44372-025-00276-3

Babanjeet, Talwar, D., Singh, K., Jindal, S. K., Thangavel, M., Singh, P., & Kumar, V. (2026). Multifaceted characterization of mineral biofortified tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits with emphasis on nutritional composition, antioxidant activity and structural properties. *Food Chemistry, 508*(Pt B), 148564. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.148564

Behtash, F., Abedini, F., Ahmadi, H., Mosavi, S. B., Aghaee, A., Morshedloo, M. R., & Lorenzo, J. M. (2022). Zinc application mitigates copper toxicity by regulating Cu uptake, activity of antioxidant enzymes, and improving physiological characteristics in summer squash. *Antioxidants, 11*(9), 1688. https://doi.org/10.3390/antiox11091688

Cannata, C., Mei, L., Mauro, R. P., Fichera, G., Pepe, G., Aquino, G., Sabatino, L., Vultaggio, L., & Leonardi, C. (2025). Effects of foliar applications of zinc on fruit biofortification and quality traits of greenhouse mini plum tomato cultivars. *Journal of Agriculture and Food Research, 21*, 101978. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101978

da Silva, V. B., Ribera, L. M., Medelo, M. J. Y., de Almeida, H. J., & Cecílio Filho, A. B. (2024). Effects of Fe and Zn on growth, biofortification and quality of lettuce grown in hydroponics. *Revista Caatinga, 37*. https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3712187rc

de Moraes, C. C., Silveira, N. M., Mattar, G. S., Sala, F. C., Mellis, E. V., & Purquerio, L. F. V. (2022). Agronomic biofortification of lettuce with zinc under tropical conditions: Zinc content, biomass production and oxidative stress. *Scientia Horticulturae, 303*, 111218. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111218

Fernández, V., & Eichert, T. (2009). Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences, 28*(1–2), 36–68. https://doi.org/10.1080/07352680902743069

Gadallah, F. M., El-Sawah, N. A., Belal, H. E. E., et al. (2022). Nitrogen-molybdenum-manganese co-fertilization reduces nitrate accumulation and enhances spinach (*Spinacia oleracea* L.) yield and its quality. *Saudi Journal of Biological Sciences, 29*(4), 2238–2246. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.036

Garza-Alonso, C. A., Juárez-Maldonado, A., González-Morales, S., Cabrera-De la Fuente, M., Cadenas-Pliego, G., Morales-Díaz, A. B., Trejo-Téllez, L. I., Tortella, G., & Benavides-Mendoza, A. (2023). ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce. *Heliyon, 9*(1), e12787. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12787

Gavassi, M. A., Alves, F. R. R., Monteiro, C. C., Gaion, L. A., Alves, L. R., Prado, R. M., Gratão, P. L., & Carvalho, R. F. (2023). Photomorphogenic tomato mutants high-pigment 1 and aurea responses to iron deficiency. *Scientia Horticulturae, 307*, 111502. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111502

Gupta, N., Jain, S. K., Tomar, B. S., et al. (2022). Impact of foliar application of ZnO and Fe_3O_4 nanoparticles on seed yield and physio-biochemical parameters of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seed under open field and protected environment vis a vis during seed germination. *Plants, 11*(23), 3211. https://doi.org/10.3390/plants11233211

Leporino, M., Bonini, P., Cardarelli, M., Rouphael, Y., & Colla, G. (2025). Biochelate as an eco-friendly alternative to synthetic chelate for micronutrients supply in tomato grown under alkaline conditions: A multi-omics approach. *Scientia Horticulturae, 346*, 114166. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114166

Lodovici, A., Buoso, S., Miras-Moreno, B., Lucini, L., Tomasi, N., García-Pérez, P., Pinton, R., & Zanin, L. (2024). A multi-omics insight on the interplay between iron deficiency and N forms in tomato. *Frontiers in Plant Science, 15*, 1408141. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1408141

Lu, Q., Xu, Z., Zhang, Q., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhang, T., Li, J., & Wang, X. (2024). Foliar application of Fe-fulvic acid: A strategy to reduce heavy metal accumulation and enhance nutritional quality. *Food Chemistry: X*, *24*, 101904. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101904

Mal, S., Sarkar, D., Mandal, B., Basak, P., et al. (2025). Improving quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits for fresh consumption and processing with optimised boron application. *Journal of Food Composition and Analysis*, *140*, 107255. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107255

Mazhar, M. W., Akram, R., & Shahid, A. (2022). Foliar application of iron glutamate improves yield and growth of tomatoes compared to iron sulphate and L-glutamate. *International Journal of Vegetable Science*, *28*(6), 511–520. https://doi.org/10.1080/19315260.2022.2046673

Nas, Y., & Duman, İ. (2024). The effect of zinc fertilization on yield and quality of commercial processing tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, *61*(3), 285–296. https://doi.org/10.20289/zfdergi.1460963

Pagard, A., Zare-Bavani, M. R., & Eftekhari, S. A. (2024). Impact of some boron application methods on yield and nutritional status of pepper plants in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition*, *47*(15), 2467–2480. https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2354184

Preciado-Rangel, P., Campos-Ortiz, A., Sánchez Chávez, E., Reyes-Gonzalez, A., Ruiz-Espinoza, F., Ojeda-Barrios, D., & Hernandez-Montiel, L. (2021). Zinc biofortification improves yield, nutraceutical quality and antioxidant capacity in lettuce. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *24*(3). https://doi.org/10.56369/tsaes.3844

Stoeva, V., Atanasova, V., Marovska, G., Grozeva, S., & Tringovska, I. (2026). Agronomic biofortification in tomato: Balancing micronutrient enrichment, yield, and fruit quality. *Frontiers in Plant Science*, *17*, 1835095. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1835095

Tombuloglu, G., Tombuloglu, H., Slimani, Y., Almessiere, M. A., Baykal, A., Bostancioglu, S. M., Kirat, G., & Ercan, I. (2024). Effects of foliar iron oxide nanoparticles (Fe_3O_4) application on photosynthetic parameters, distribution of mineral elements, magnetic behaviour, and photosynthetic genes in tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *210*, 108616. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108616

Tran, L. T., Sugimoto, K., Kasozi, M., Mitalo, O. W., & Ezura, H. (2023). Pollination, pollen tube growth, and fertilization independently contribute to fruit set and development in tomato. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1205816. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1205816

ROBOTİK ÇİLEK HASADINDA YENİDEN DENEME EŞİKLERİ: KOŞULLU BAŞARI VE ZAMAN MALİYETİNE DAYALI PARAMETRİK ANALİZ

Osman ECEOĞLU, PhD

Akdeniz University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electronics and Automation, Antalya, Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-5778-6655

ÖZET

Robotik çilek hasadında başarısız bir girişimin ardından uygulanan yeniden deneme, toplam hasat başarısını artırabilmektedir. Ancak yeniden denemenin operasyonel açıdan avantaj sağlaması, koşullu başarı olasılığı ile ek süre maliyeti arasındaki dengeye bağlıdır. Bu çalışmada girişim/tur indeksli koşullu başarı olasılıklarını, girişim sürelerini ve çalışma birimi başına başlangıçta oluşan sabit çevrim yükünü birleştiren analitik bir eşik modeli geliştirilmiştir. Bir sonraki girişimin etkin üretkenliği artırma koşulu $p_{k+1}/t_{k+1} > S_k/E[T_k]$ olarak elde edilmiş; iki girişimli durumda $\gamma=c/t_1$ ve $\rho_2=t_2/t_1$ tanımlarıyla kritik süre oranı $\rho_2^*=(p_2/p_1)(1+\gamma)$ biçiminde türetilmiştir. Yayımlanmış iki çilek hasat çalışmasındaki hedef düzeyindeki ve tekrarlanan tarama/hasat verileri kendi gözlem birimleri korunarak yeniden yapılandırılmıştır. Hedef düzeyindeki yeniden denemeler ile aynı yatak konumundaki ardışık tarama turları ayrı analiz katmanlarında değerlendirilmiş, tur süreleri ilgili turda kalan meyve sayısına göre normalize edilmiştir. $\gamma=0$ alt sınırında hedef düzeyindeki vakaların ρ_2^* nokta kestirimleri 0,44–3,16, tarama turu verilerinin meyve başına normalize edilmiş kestirimleri 0,69–1,39 aralığında bulunmuştur. Fiziksel tur süresi tabanına dönüşüm yapıldığında karşılık gelen eşikler 0,15–1,15 aralığındadır. Koşullu olasılıklardaki örnekleme belirsizliği Monte Carlo ile ρ_2^* oranına taşınmış ve küçük kalan örneklemlerde kritik süre oranına ilişkin aralıkların belirgin biçimde genişlediği görülmüştür. Üçüncü tur için koşullu başarı olasılığı ile ilk iki turun zaman bileşenlerini birleştiren üçüncü tur kritik süre oranı da tanımlanmıştır. Çerçeve, saha tablolarındaki başarı verilerini robot üzerinde ölçülebilir zaman bileşenleriyle eşleştirerek yeniden deneme için nicel kritik süre oranları üretmektedir. Etkin üretkenlik ölçütü zaman açısından izin verilebilir yeniden deneme bölgesini tanımlarken, ürün hasarı ve kalite kısıtlarının birlikte değerlendirilmesi agronomik durdurma noktasının belirlenmesini desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Tarım robotları, çilek hasadı, yeniden deneme, koşullu başarı, çevrim süresi, kritik süre oranı

RETRY THRESHOLDS IN ROBOTIC STRAWBERRY HARVESTING: A PARAMETRIC ANALYSIS BASED ON CONDITIONAL SUCCESS AND TIME COST

ABSTRACT

In robotic strawberry harvesting, a retry following a failed attempt can increase the overall harvesting success rate. However, its operational benefit depends on the balance between the conditional probability of success and the additional time cost. This study develops an analytical threshold model combining attempt/round-indexed conditional success probabilities, attempt durations, and the fixed cycle overhead incurred at the beginning of a work unit. The condition for an additional attempt to increase effective throughput is $p_{k+1}/t_{k+1} > S_k/E[T_k]$, and for two attempts the definitions $\gamma=c/t_1$ and $\rho_2=t_2/t_1$ yield the critical time ratio $\rho_2^*=(p_2/p_1)(1+\gamma)$. Target-level retry data and repeated scan/harvest round data from two published strawberry-harvesting studies were reconstructed while preserving their original observation units, and repeated-round durations were normalized by the number of fruits remaining at the beginning of each round. At the $\gamma=0$ lower bound, point estimates of ρ_2^* ranged from 0.44 to 3.16 for target-level cases and from 0.69 to 1.39 on the fruit-normalized basis for repeated-round data. Converting the latter to the physical round-duration basis yielded thresholds of 0.15–1.15.

Sampling uncertainty in the conditional probabilities was propagated to ρ_2^* by Monte Carlo simulation, showing substantially wider intervals when few fruits remained. A third-round critical time ratio was also defined by combining conditional success with the timing components of the first two rounds. The framework converts field-table success data into quantitative critical retry-time ratios that can be paired with measurable robot timing components. The productivity threshold defines the time region in which a retry can remain beneficial, while fruit damage and quality constraints can impose an earlier agronomic stopping point.

Keywords: Agricultural robots, strawberry harvesting, retry, conditional success, cycle time, critical time ratio

1. GİRİŞ

Robotik hasat sistemlerinde performans; hasat başarı oranı, çevrim süresi, ürün hasarı ve operasyonel süreklilik gibi birbirini tamamlayan göstergelerle değerlendirilmektedir (Bac et al., 2014). Güncel seçici hasat robotları ise algı, robot tasarımı, hareket planlama ve kontrol bileşenlerinin bütünleşik çalışmasına dayanmaktadır (Rajendran et al., 2024). Saha uygulamalarında toplam çevrim süresine manipülatör hareketinin yanı sıra platform ilerlemesi, görüntüleme, ürün boşaltma ve hedefler arası geçiş gibi lojistik bileşenler de önemli katkı yapabilmektedir. Örneğin Arad et al. (2020), ticari sera koşullarındaki tatlı biber hasat robotunda çevrim süresinin yaklaşık yarısının lojistik işlemlerden kaynaklandığını göstermiştir. Bu yapı, başarısız bir girişim sonrasında yeniden deneme kararının başarı olasılığı, ek zaman maliyeti ve çalışma birimi başına sabit çevrim yükünün ortak etkisiyle değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Yeniden deneme davranışının başarı-zaman dengesi farklı hasat platformlarında gözlenmiştir. van Henten et al. (2003), hıyar hasat robotunda aynı ürüne farklı robot konumlarından yapılan birden çok girişimin başarı oranını belirgin biçimde artırdığını; tek başarılı çevrim için 65,2 s ölçülürken başarısız girişimler dahil pratik koşullarda hasat edilen ürün başına sürenin 124 s'ye yükseldiğini raporlamıştır. Xiong et al. (2019) çilek hasadında saha başarı oranı ile çevrim süresini birlikte değerlendirmiş; Xiong et al. (2020) ise ilk girişim başarısız olduğunda ikinci girişimi uygulayarak büyüme durumuna bağlı ek başarılar raporlamıştır. Tituaña et al. (2024), açık tarla sisteminde aynı yatak konumunda erişilebilir meyveleri hasat ettikten sonra yeni görüntü alarak işlemi üç tura kadar tekrarlamış ve her turda hasat edilen meyve yüzdelerini ayrı raporlamıştır. Bu saha örnekleri, yeniden deneme kararının koşullu başarı kazancı ile zaman maliyetini ortak bir ölçekte değerlendiren bir eşik yaklaşımını gerekli kılmaktadır.

Güncel çalışmalar yeniden deneme davranışını hata teşhisi ve kendini kurtarma stratejileriyle de bütünleştirmektedir. Sun et al. (2026), çilek hasadında kayma vakaları için yeniden kavrama temelli bir kurtarma yaklaşımı uygulamış ve kurtarma performansı ile çevrim süresindeki değişimi birlikte raporlamıştır. Marjinal kazanç hızını mevcut ortalama kazanç hızıyla karşılaştıran karar mantığının kuramsal temeli ise daha genel oran optimizasyonu problemlerine uzanmaktadır. Charnov'un (1976) Marjinal Değer Teoremi, marjinal kazanç oranı ile ortalama kazanç oranını ve geçiş maliyetini birlikte ele alan klasik bir örnektir. Bu çalışma söz konusu karar mantığını robotik çilek hasadına uyarlayarak girişim indeksli saha başarı verilerini ölçülebilir yeniden deneme için kritik süre oranlarına dönüştürmektedir.

Bu çalışmanın amacı, robotik çilek hasadında girişim/tur indeksli koşullu başarı olasılıkları ile deneme süreleri arasındaki kritik süre oranlarını (kırılma noktalarını) analitik olarak tanımlamak ve yayımlanmış saha tablolarından eşiklerin olasılık bileşenini yeniden yapılandırmaktır. Katkı üç bileşenden oluşmaktadır: (i) çalışma birimi başına politika-bağımsız sabit süreyi de içeren açık bir çevrim süresi modeli, (ii) Xiong et al. (2020) hedef düzeyindeki ve Tituaña et al. (2024) tarama turu sonuçlarından koşullu yeniden deneme olasılıklarının kendi deney birimleri içinde yeniden hesaplanması ve (iii) bu olasılıkların robot tasarımı ve politika ayarı açısından yorumlanabilir kritik süre oranlarına dönüştürülmesi. Böylece iki farklı saha protokolü, özgün gözlem yapıları korunarak ortak bir analitik çerçevede karşılaştırılabilir hale getirilmektedir.

2. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Bu bölüm analitik modeli, saha verilerinin yeniden yapılandırılmasını ve kritik süre oranlarını sırasıyla sunmaktadır.

2.1. Problem tanımı ve değişkenler

Bir çalışma birimi için j. girişimin, önceki j-1 girişimin tamamı başarısız olduğunda ulaşılan koşullu başarı olasılığı p_j olarak tanımlanmıştır. Xiong et al. (2020) için çalışma birimi tek hedef meyvedir ve t_j doğrudan hedef başına girişim süresidir. Tituaña et al. (2024) için yayımlanan yüzdeler aynı yatak konumundaki meyve kohortuna aittir. Bu nedenle p_j, kalan meyvelerin j. turda hasat edilme koşullu olasılığı; t_1, ilk turun başlangıçtaki meyve sayısına amortize edilmiş süresi; t_j ($j \geq 2$) ise ilgili turun başlangıcında kalan meyve sayısına amortize edilmiş süre olarak tanımlanmıştır. Modelde kullanılan temel semboller ve birimler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Modelde kullanılan temel semboller ve tanımlar.

Sembol	Tanım	Birim	Kullanım
p_j	j. girişimin koşullu başarı olasılığı	-	Önceki girişimler başarısız olduğunda
c	Başlangıçta bir kez oluşan sabit yük	s	Xiong: hedef başına; Tituaña: başlangıç meyve sayısına amortize; ilk tur görüntüleme/işleme yükünü içerir
t_1	İlk girişim/turun beklenen tam süresi	s	Xiong: hedef başına; Tituaña: başlangıç meyve sayısına amortize
t_j	$j \geq 2$ girişim/turun ulaşıldığında oluşan tam süresi	s	Xiong: hedef başına; Tituaña: ilgili turda kalan meyve sayısına amortize
S_k	En fazla k girişim sonunda kümülatif başarı	-	Politika başarı olasılığı
$E[T_k]$	Beklenen toplam çevrim süresi	s	c ve erişim olasılığıyla ağırlıklandırılmış girişim/turlar
Q_k	Etkin üretkenlik	başarılı birim h^{-1}	Tüm zaman bileşenleri ölçüldüğünde
γ, ρ_j	c/t_1 ve t_j/t_1 boyutsuz süre oranları	-	Kritik süre oranı analizi

Başlangıçta çalışma birimi başına bir kez oluşan sabit yük c, Tituaña katmanında başlangıçtaki meyve sayısına amortize edilerek aynı zaman tabanına getirilmiştir; ilk turun görüntüleme ve görüntü işleme yükü c içinde temsil edilmektedir. Tituaña et al. (2024) protokolünde izleyen her hasat turundan önce yeni görüntü işlenmekte ve saha sisteminde görüntü başına ortalama işlem süresi 6,4 s olarak bildirilmektedir. Her turda yinelenen bu görüntüleme yükü, ulaşılan turun t_j bileşeni içinde temsil edilmektedir. Kalan kohort küçüldükçe meyve başına amortize edilen t_j ve ρ_j değerleri değişmektedir; dolayısıyla Tituaña katmanındaki ρ_j, ilgili turdaki kalan meyve sayısına bağlı operasyonel bir orandır.

2.2. Kümülatif başarı ve beklenen çevrim süresi

En fazla k girişime izin verilen bir politikada hedefin en az bir kez başarıyla hasat edilme olasılığı Eşitlik (1) ile tanımlanmıştır:

$$S_k = 1 - \prod_{j=1}^{k} (1 - p_j) \quad (1)$$

İkinci ve sonraki girişimler yalnız önceki girişimlerin tamamı başarısız olduğunda çalıştırıldığından, beklenen çevrim süresi sabit çalışma birimi yükü c ile girişim sürelerinin erişim olasılıklarıyla ağırlıklandırılmış toplamından oluşmaktadır ve Eşitlik (2) ile hesaplanmıştır:

$$E[T_k] = c + t_1 + \sum_{j=2}^{k} t_j \prod_{i=1}^{j-1}(1 - p_i) \quad (2)$$

Etkin üretkenlik, başarıyla tamamlanan çalışma birimi sayısının beklenen çevrim süresine oranı olarak tanımlanmış ve saatlik ölçeğe Eşitlik (3) ile dönüştürülmüştür. Aynı platform üzerinde c ve tüm t_j bileşenleri birlikte ölçüldüğünde Q_k, doğrudan saatlik üretkenlik karşılaştırmasına olanak vermektedir. Mevcut saha tablolarında ortak ayrıntı düzeyinde girişim/tura özgü mutlak süreler yerine başarı verileri yer aldığından, ampirik sayısallaştırma Q_k'yi türeten boyutsuz kritik süre oranları üzerinden yürütülmüştür; robot üzerinde ölçülecek süreler bu eşiklerle doğrudan eşleştirilebilmektedir.

$$Q_k = \frac{3600\, S_k}{E[T_k]} \quad (3)$$

2.3. Marjinal yeniden deneme ölçütü

Mevcut k girişimli politikaya bir ek girişim eklenmesinin etkin üretkenliği artırması için $Q_{k+1} > Q_k$ koşulu sağlanmalıdır. Cebirsel sadeleştirme sonucunda karar kuralı Eşitlik (4)'teki biçime indirgenmektedir:

$$\frac{p_{k+1}}{t_{k+1}} > \frac{S_k}{E[T_k]} \quad (4)$$

Bu eşitsizlik, yeni girişimin birim zamanda sağladığı koşullu başarı kazancının mevcut politikanın ortalama başarı hızını aşması gerektiğini göstermektedir. $\gamma=c/t_1$ ve $\rho_2=t_2/t_1$ tanımlarıyla iki girişimli özel durumda kritik süre oranı $\rho_2^*=(p_2/p_1)(1+\gamma)$ olmaktadır. $\gamma=0$ durumundaki $\rho_{2,0}^*=p_2/p_1$ değeri sabit çevrim yükünün dışlandığı alt sınırı vermektedir; γ arttıkça izin verilebilir yeniden deneme süresi doğrusal olarak genişlemektedir. Marjinal ölçüt bir sonraki girişim için tek adımlı karar bilgisini sağlamaktadır. Belirli c ve t_j değerleri mevcut olduğunda Q_1, Q_2 ve Q_3 gibi aday politikaların doğrudan karşılaştırılması etkin üretkenliği global olarak en yüksek yapan girişim sayısını belirlemektedir.

2.4. Yayımlanmış saha verilerine uygulama

Xiong et al. (2020) çalışmasının Şekil 17'sinde büyüme sınıfları tanımlanmış, Tablo 2'sinde ise ilk girişim ve iki girişim sonundaki kümülatif hasat başarıları raporlanmıştır. A–E sınıfları sırasıyla izole olgun meyveyi; birbirine yakın iki olgun meyveyi; olgunlaşmamış meyvelerle kısmen çevrili tek olgun meyveyi; kısmen çevrili iki olgun meyveyi; tamamen çevrili tek olgun meyveyi temsil etmektedir. Tituaña et al. (2024)'ün Tablo 3'ü beş saha tipindeki birinci, ikinci ve üçüncü tur yüzdelerini vermektedir. Tip 1–5 sırasıyla izole ve çoğunlukla açık; yakın gruplu ve açık; izole ve kısmen örtülü; gevşek gruplu ve kısmen örtülü/engelli; yakın gruplu ve kısmen örtülü/engelli meyveleri göstermektedir.

Xiong verileri hedef düzeyinde yeniden deneme, Tituaña verileri ise aynı meyve kohortundaki ardışık tarama/hasat turları olarak analiz edilmiştir. p_1 doğrudan, p_2 ve p_3 önceki girişim veya turlarda hasat edilemeyen meyveler üzerinden yeniden hesaplanmıştır. Her p_j için %95 Wilson aralığı verilmiştir. Kritik süre oranı $\rho_{2,0}^*=p_2/p_1$ üzerindeki örnekleme belirsizliği, her koşullu binom olasılığı için Beta(s+0,5, n-s+0,5) dağılımından 2.000.000 çekiliş yapılarak Monte Carlo yöntemiyle yayılmıştır. Hesaplamalar Python 3.13.5 ve NumPy 2.3.5 ile, sabit 20260912 tohumu kullanılarak yürütülmüş; %2,5–%97,5 yüzdelikleri %95 yayılım aralığı olarak raporlanmıştır.

2.5. Saha vakaları üzerinden kritik süre oranları

Xiong et al. (2020) verilerinde ikinci girişimin koşullu başarı olasılığı, ek başarı sayısının ilk girişimde başarısız kalan hedef sayısına bölünmesiyle yeniden oluşturulmuştur. Tituaña et al. (2024) için aynı hesap ikinci ve üçüncü tarama turlarına uygulanmıştır. Her iki veri kümesi kendi gözlem birimi içinde değerlendirilmiş; Xiong hedef düzeyindeki sonuçları Tablo 2'de, Tituaña tarama turu sonuçları ise Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 2. Xiong et al. (2020) hedef düzeyindeki koşullu olasılıkları ve γ=0 kritik süre oranı için belirsizlik yayılımı.

Vaka (bkz. §2.4)	p_1: başarı/toplam (%95 Wilson)	p_2: ek başarı/kalan (%95 Wilson)	ρ2,0* [%95 yayılım]	İkinci girişime kalan n
A	33/34 = 0,971 [0,85–1,00]	1/1 = 1,000 [0,21–1,00]	1,03 [0,15–1,09]	1
B	32/44 = 0,727 [0,58–0,84]	8/12 = 0,667 [0,39–0,86]	0,92 [0,53–1,30]	12
C	28/37 = 0,757 [0,60–0,87]	3/9 = 0,333 [0,12–0,65]	0,44 [0,14–0,90]	9
D	20/40 = 0,500 [0,35–0,65]	10/20 = 0,500 [0,30–0,70]	1,00 [0,55–1,65]	20
E	1/20 = 0,050 [0,01–0,24]	3/19 = 0,158 [0,06–0,38]	3,16 [0,46–33,54]	19

Tablo 2'deki hedef düzeyindeki nokta kestirimleri $\rho_{2,0}^{*}=p_2/p_1$ için 0,44–3,16 arasında değişmektedir. Monte Carlo yayılımı seyrek vakaların belirsizliğini daha görünür hale getirmiştir; örneğin E vakasında 3,16 nokta kestiriminin %95 aralığı 0,46–33,54'tür, A vakasındaki p_2 ise yalnız 1/1 kalan hedefe dayanmaktadır. Beş vakanın yeniden yapılandırılmış toplamı 139/175 olup Tituaña et al. (2024)'ün karşılaştırma tablosunda Xiong sistemi için aktardığı %79,43 toplam başarıyla uyumludur.

Tablo 3. Tituaña et al. (2024) koşullu tarama turu olasılıkları ve γ=0 kritik süre oranı.

Tip (bkz. §2.4)	p_1: başarı/toplam (%95 Wilson)	p_2: ek başarı/kalan (%95 Wilson)	p_3: ek başarı/kalan (%95 Wilson)	ρ2,0* meyve [%95 yayılım]
1	155/200 = 0,775 [0,71–0,83]	24/45 = 0,533 [0,39–0,67]	9/21 = 0,429 [0,25–0,64]	0,69 [0,50–0,88]
2	27/58 = 0,466 [0,34–0,59]	20/31 = 0,645 [0,47–0,79]	2/11 = 0,182 [0,05–0,48]	1,39 [0,93–2,01]
3	71/131 = 0,542 [0,46–0,63]	27/60 = 0,450 [0,33–0,58]	5/33 = 0,152 [0,07–0,31]	0,83 [0,59–1,12]
4	33/93 = 0,355 [0,27–0,46]	17/60 = 0,283 [0,19–0,41]	5/43 = 0,116 [0,05–0,25]	0,80 [0,48–1,27]
5	20/144 = 0,139 [0,09–0,21]	23/124 = 0,185 [0,13–0,26]	11/101 = 0,109 [0,06–0,19]	1,34 [0,77–2,32]

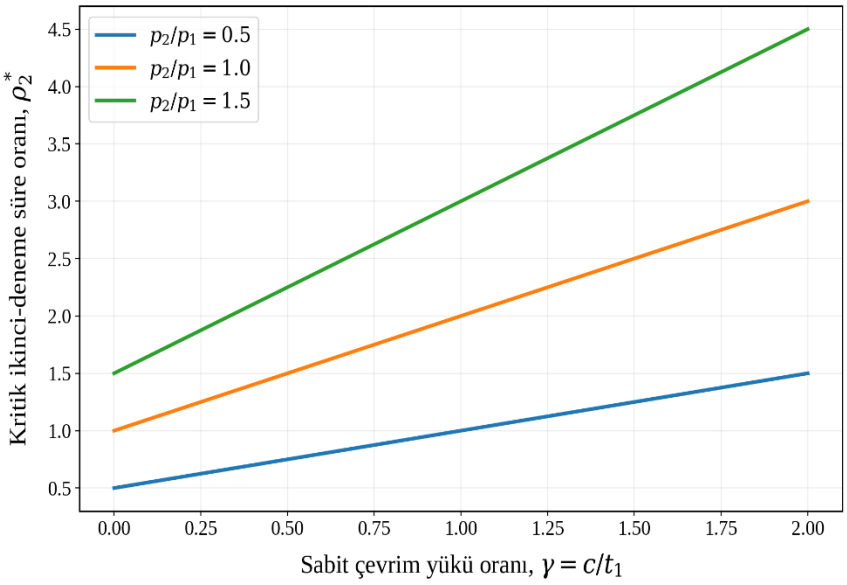
Tablo 3'te meyve başına normalize edilmiş $\rho_{2,0}^{*}$ nokta kestirimleri 0,69–1,39 aralığındadır. Fiziksel tur süreleri için dönüşüm $\rho_{2,tur}^{*}=(1-p_1)\rho_{2,meyve}^{*}$ olup Tip 1–5 eşikleri sırasıyla 0,15, 0,74, 0,38, 0,52 ve 1,15'dir. Her turda yinelenen görüntüleme süresi ilgili t_j bileşenine dahil edildiğinden, fiziksel tur oranı kalan meyve sayısına göre ölçülmekte ve aynı turdaki kritik süre oranıyla karşılaştırılmaktadır. Böylece meyve başına olasılık analizi ile robot üzerinde ölçülen tur süreleri aynı kritik süre oranı üzerinden eşleştirilebilmektedir.

Tituaña et al. (2024) verilerinde üçüncü turun koşullu başarı olasılığı 0,109–0,429 aralığındadır. Üçüncü tur kararı, ilk iki turun süreleri ile sabit çevrim yükünü birlikte içermektedir. Aynı marjinal karar kuralı kullanıldığında üçüncü tur için meyve başına normalize edilmiş kritik süre oranı Eşitlik (5) ile elde edilmektedir. Tituaña katmanında fiziksel üçüncü tur süresi için aynı amortisman mantığı $\rho_{3,tur}^{*}=(1-S_2)\rho_{3,meyve}^{*}$ dönüşümünü vermektedir. Bu kritik süre oranı, p_3 değerlerini aynı robot üzerinde ölçülecek

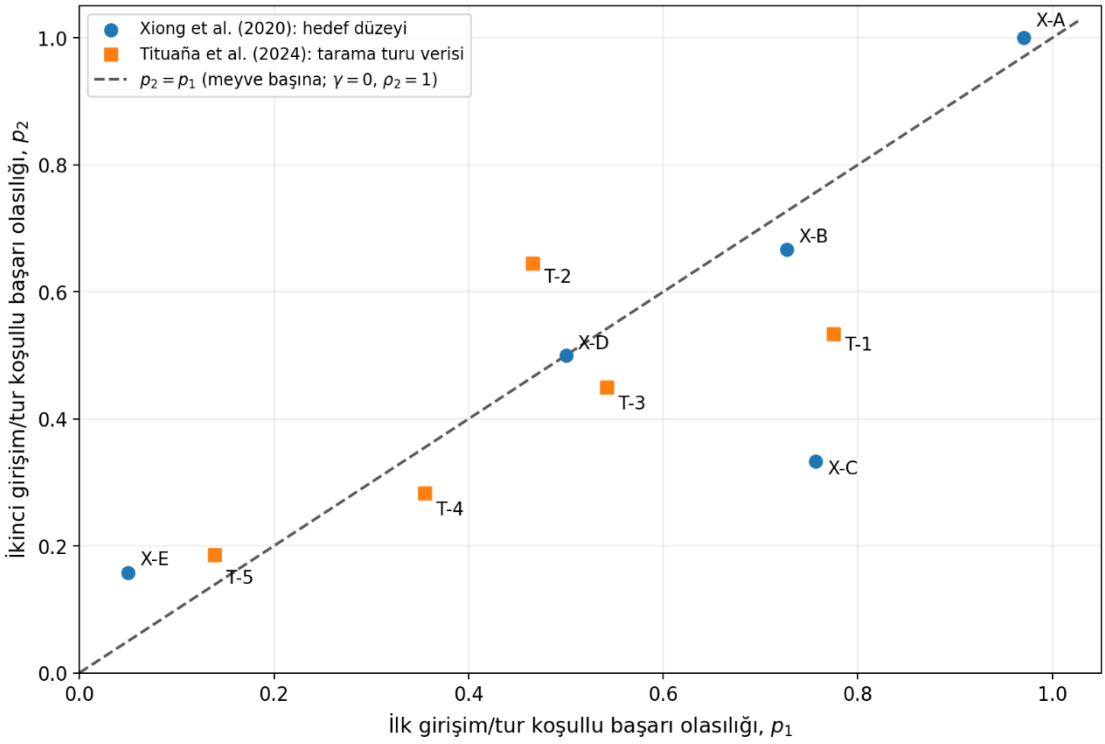
tura özgü sürelerle eşleştirmekte ve en fazla üç turlu politikaların Q_1, Q_2 ve Q_3 değerleri üzerinden doğrudan karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

$$\rho_3^* = \frac{p_3(1+\gamma+\rho_2(1-p_1))}{s_2} \quad (5)$$

İkinci girişime ilişkin sabit çevrim yükü duyarlılığı Şekil 1'de, yeniden yapılandırılan p_1-p_2 çiftleri ise Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sabit çevrim yükü oranının ($\gamma=c/t_1$) ikinci girişim kritik süre oranına etkisi. Eğriler farklı p_2/p_1 düzeylerini göstermektedir.



Şekil 2. Yeniden yapılandırılan p_1-p_2 çiftlerinin olasılık düzlemindeki konumu. Kesikli gri $p_2=p_1$ doğrusu yalnız meyve başına normalize edilmiş zaman tabanında $\gamma=0$ ve $\rho_2=1$ özel durumundaki kritik

süre oranını göstermektedir; Tituaña vakalarının fiziksel tur süresi eşikleri $\rho_{2,tur}^{*}=(1-p_1)\rho_{2,meyve}^{*}$ dönüşümüyle değerlendirilmektedir.

2.6. Belirsizlik ve agronomik yorum

$\rho_{2,0}^{*}$ için hesaplanan yayılım aralıkları, yeniden denemeye kalan örnek sayısı küçüldükçe kritik süre oranının belirsizliğinin genişlediğini göstermektedir. Xiong A'daki ikinci girişim 1/1 gözleme, Tituaña Tip 2'deki üçüncü tur ise 2/11 gözleme dayanmaktadır. Bu nedenle tasarım kararı, nokta kestirimi ile birlikte ilgili yayılım aralığı ve kalan örnek sayısı üzerinden okunmalıdır. Tituaña katmanında meyve başına normalize edilmiş eşik olasılık analizi için, tur süresi eşdeğeri ise fiziksel robot zamanlaması için kullanılmaktadır.

Analitik amaç fonksiyonu üretkenlik bileşenini nicelleştirirken, agronomik uygulamada ürün hasarı, kalite kaybı ve tarlada bırakılan ürün ek karar ölçütleri olarak birlikte değerlendirilmelidir. Xiong et al. (2020), kırılgan çileklerde ikiden fazla girişimin hasar riskini artırabileceğini belirtmiştir. Tituaña et al. (2024) ise ayrı saha testinde 34 hasadın 2'sinde hasar gözleyerek %5,9 hasar oranı raporlamıştır. Bu değer, Bac et al. (2014)'ün yüksek değerli ürün hasat robotları için bildirdiği yaklaşık %5 ortalama meyve hasarıyla aynı mertebededir. Bu nedenle etkin üretkenlik ölçütü yeniden denemenin zaman açısından izin verilebilir bölgesini, kalite ve hasar kısıtları ise agronomik durdurma noktasını belirlemektedir. Ampirik kapsam iki çilek platformuna dayanmaktadır; farklı ürün ve robotlara aktarım, p_j, t_j, c ve hasar göstergelerinin aynı ölçüm mantığıyla elde edilmesiyle gerçekleştirilebilmektedir.

3. SONUÇ

Bu çalışmada robotik çilek hasadında yeniden deneme kararının olasılık ve zaman bileşenlerini ortak bir kritik süre oranı çerçevesinde birleştiren analitik yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışma birimi başına sabit çevrim yükü c modele dahil edildiğinde ikinci girişim için $\rho_2^{*}=(p_2/p_1)(1+\gamma)$ kritik süre oranı elde edilmektedir. $\gamma=0$ altında hedef düzeyindeki vakaların nokta kestirimleri 0,44–3,16, tarama turu verilerinin meyve başına normalize edilmiş kestirimleri 0,69–1,39 aralığındadır; fiziksel tur süresi tabanındaki karşılıklar 0,15–1,15 aralığına dönüşmektedir. ρ_2^{*} üzerine taşınan %95 belirsizlik aralıkları, özellikle küçük kalan örneklemlerde nokta kestirimlerinin geniş bir olası karar bölgesi taşıdığını göstermiştir.

Yayımlanmış saha verilerinden yeniden oluşturulan koşullu başarı olasılıkları, robot üzerinde ölçülebilir çevrim bileşenleriyle eşleştirilebilecek kritik süre oranlarına dönüştürülmüştür. Hedef düzeyindeki ve tarama turu verileri kendi deney yapılarını korurken aynı marjinal karar mantığında değerlendirilebilmektedir. Uygulamada etkin üretkenlik ölçütünün ürün hasarı, kalite kaybı ve tarlada bırakılan ürün göstergeleriyle birlikte kullanılması, yeniden deneme politikasının agronomik ve operasyonel açıdan dengeli ayarlanmasını desteklemektedir. Ampirik değerlendirme iki çilek hasat platformunu kapsamaktadır; farklı ürün ve robotlara aktarım, aynı ölçüm yapısının yeniden kurulmasını gerektirmektedir. Aynı robot üzerinde c, t_j, p_j ve hasar göstergelerinin birlikte ölçülmesi, çerçevenin gerçek zamanlı politika seçimine taşınması için doğrudan doğrulama adımını oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Arad, B., Balendonck, J., Barth, R., Ben-Shahar, O., Edan, Y., Hellström, T., Hemming, J., Kurtser, P., Ringdahl, O., Tielen, T., & van Tuijl, B. (2020). Development of a sweet pepper harvesting robot. *Journal of Field Robotics*, *37*(6), 1027-1039. https://doi.org/10.1002/rob.21937

Bac, C. W., van Henten, E. J., Hemming, J., & Edan, Y. (2014). Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. *Journal of Field Robotics*, *31*(6), 888-911. https://doi.org/10.1002/rob.21525

Charnov, E. L. (1976). Optimal foraging, the marginal value theorem. Theoretical Population Biology, 9(2), 129-136. https://doi.org/10.1016/0040-5809(76)90040-X

Rajendran, V., Debnath, B., Mghames, S., Mandil, W., Parsa, S., Parsons, S., & Ghalamzan-E., A. (2024). Towards autonomous selective harvesting: A review of robot perception, robot design, motion planning and control. *Journal of Field Robotics*, *41*(7), 2247-2279. https://doi.org/10.1002/rob.22230

Sun, M., Zhao, C., Yang, L., Liu, H., Hu, S., & Xiong, Y. (2026). Vision-based early fault diagnosis and self-recovery for strawberry harvesting robots. *Artificial Intelligence in Agriculture. Advance online publication.* https://doi.org/10.1016/j.aiia.2026.05.009

Tituaña, L., Gholami, A., He, Z., Xu, Y., Karkee, M., & Ehsani, R. (2024). A small autonomous field robot for strawberry harvesting. *Smart Agricultural Technology*, *8*, 100454. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100454

van Henten, E. J., van Tuijl, B. A. J., Hemming, J., Kornet, J. G., Bontsema, J., & van Os, E. A. (2003). Field test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*, *86*(3), 305-313. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.002

Xiong, Y., Ge, Y., Grimstad, L., & From, P. J. (2020). An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation. *Journal of Field Robotics*, *37*(2), 202-224. https://doi.org/10.1002/rob.21889

Xiong, Y., Peng, C., Grimstad, L., From, P. J., & Isler, V. (2019). Development and field evaluation of a strawberry harvesting robot with a cable-driven gripper. *Computers and Electronics in Agriculture*, *157*, 392-402. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.009

FIRLATMA ARACI ÇEVRESEL ŞARTLARI ALTINDA HELİSEL YAY TABANLI PASİF BİR UYDU TİTREŞİM İZOLATÖRÜNÜN ANALİTİK TASARIMI VE SAYISAL DOĞRULANMASI

Doç. Dr. Ahmet ATAK

Ostim Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-7320-0623

ÖZET

Fırlatma araçları, uyduları fırlatma sırasında geniş bantlı rastgele titreşim, sinüs titreşim, sanki statik ivmeler ve yüksek frekanslı piroşok yüklerine maruz bırakmaktadır. Özellikle SpaceX Falcon 9® fırlatma aracı, yüksek itki seviyeleri ve yeniden kullanılabilirlik gereksinimleri nedeniyle belirgin titreşim ve şok çevresel şartlarına sahiptir. Bu çalışma, Falcon 9 çevresel şartları temel alınarak geliştirilen helisel yay tabanlı pasif bir titreşim izolasyon sisteminin analitik ölçülendirilmesini ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile doğrulanmasını sunmaktadır. Analitik tasarım sürecinde yay rijitliği, doğal frekans, statik sehim ve gerilme sınırları hesaplanmış; ardından sinüs, rastgele titreşim ve şok analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, pasif izolasyon sisteminin Falcon 9 çevresel yükleri altında yeterli titreşim azaltımı sağladığını ve yapısal güvenliği sağladığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Uydu titreşim izolasyonu, pasif izolatör, helisel yay, rastgele titreşim, şok yanıt spektrumu (SRS), sonlu elemanlar analizi (FEA), Falcon 9 fırlatma aracı çevresel yükleri

ANALYTICAL DESIGN AND NUMERICAL VERIFICATION OF A HELICAL SPRING-BASED PASSIVE SATELLITE VIBRATION ISOLATOR UNDER LAUNCH VEHICLE ENVIROMENTAL CONDITIONS

ABSTRACT

Launch vehicles subject satellites to broadband random vibration, sinusoidal vibration, quasi-static accelerations, and high-frequency pyroshock loads during launch. In particular, the SpaceX Falcon 9® launch vehicle exhibits pronounced vibration and shock environmental conditions due to its high thrust levels and reusability requirements. This study presents the analytical sizing and finite element method (FEM) verification of a helical spring–based passive vibration isolation system developed based on Falcon 9 environmental conditions. In the analytical design process, spring stiffness, natural frequency, static deflection, and stress limits were calculated; subsequently, sinusoidal, random vibration, and shock analyses were performed. The results demonstrate that the passive isolation system provides sufficient vibration attenuation under Falcon 9 environmental loads and ensures structural safety.

Keywords: Satellite vibration isolation, passive isolator, helical spring, random vibration, shock response spectrum (SRS), finite element analysis (FEA), Falcon 9 launch vehicle environmental loads

1. GİRİŞ

Uydu sistemleri, fırlatma süreci boyunca görev ömrü ve performans açısından belirleyici olan son derece zorlu mekanik çevresel şartlara maruz kalmaktadır. Bu şartlar; düşük frekanslı sinüs titreşimleri, geniş bantlı rastgele titreşimler, yarı-statik ivmeler ve piroteknik ayrılmalar sonucunda oluşan yüksek frekanslı şok (pyroshock) yüklerini içermektedir [1–4]. Özellikle optik yükler, hassas elektronik kartlar ve mekanik hassasiyet gerektiren alt sistemler bu yüklerden doğrudan etkilenmekte, yapısal rezonanslar ve aşırı ivmeler görev başarısını tehdit etmektedir.

Modern ticari fırlatma araçları arasında yer alan SpaceX Falcon 9®, yüksek itki profili ve yeniden kullanılabilir tasarımı nedeniyle özgün dinamik karakteristiklere sahiptir. Falcon 9 Payload User's Guide dokümanlarında sinüs titreşim, rastgele titreşim güç spektral yoğunluğu (PSD=Power Spectral Density) ve şok yanıt spektrumu (SRS=Shock Response Spectrum) çevreleri ayrıntılı biçimde tanımlanmıştır [5–7]. Bu çevresel tanımlar, uydu yapısal tasarımının ve yeterlilik testlerinin temel girdisini oluşturmaktadır.

Literatürde, fırlatma kaynaklı titreşimlerin azaltılmasına yönelik başlıca üç yaklaşım tanımlanmaktadır:

1. Yapısal rijitliğin artırılması yoluyla çevresel yüklerin doğrudan taşınması,
2. pasif titreşim izolasyonu kullanılarak uyarım ile yapı arasındaki aktarımın sınırlandırılması ve
3. yarı-aktif veya aktif kontrol sistemleri ile adaptif titreşim bastırma [8–11].

Aktif ve yarı-aktif sistemler düşük frekanslarda yüksek performans sunabilse de, güç gereksinimi, kontrol karmaşıklığı ve güvenilirlik riskleri nedeniyle uzay görevlerinde sınırlı kullanım alanı bulmaktadır.

Bu bağlamda, helisel yaylar ve elastomerik elemanlar kullanan pasif titreşim izolatörleri; basit yapıları, öngörülebilir doğrusal davranışları ve yüksek güvenilirlikleri nedeniyle yaygın biçimde tercih edilmektedir [12–14]. Helisel yay tabanlı pasif izolasyon sistemlerinin tasarımı, klasik titreşim teorisine dayanmaktadır. Inman [15] ve Den Hartog [16], yay–kütle sistemlerinin dinamik davranışını ve doğal frekans kavramını detaylı olarak açıklamıştır.

Rastgele titreşim analizlerinde, güç spektral yoğunluğu tabanlı yöntemler temel alınmakta olup Piersol ve Paez [17] ile Wijker [18], uzay yapıları için rastgele titreşim yanıtlarının hesaplanması ve yeterlilik seviyelerinin belirlenmesine yönelik kapsamlı yaklaşımlar sunmuştur. Şok yüklerinin değerlendirilmesinde ise SRS yöntemi yaygın olarak kullanılmakta; Irvine [19] ve Harris [20] bu yöntemin teorik temellerini ve mühendislik uygulamalarını ortaya koymaktadır.

Falcon 9 çevresel şartları altında pasif izolasyon sistemlerinin etkinliğini inceleyen çalışmalar görece sınırlıdır. Bronowicki ve Hanks [21] ile Zhang ve arkadaşları [22], tüm-uydu seviyesinde pasif izolasyon kavramlarının fırlatma yüklerini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir. Mata-Machuca [23] ise helisel yay parametrelerinin optimizasyonuna odaklanmıştır. Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı Falcon 9 özelinde ayrıntılı analitik ölçülendirme ve FEM doğrulamasını bir arada sunmamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Falcon 9 fırlatma aracı çevresel şartlarını esas alarak helisel yay tabanlı pasif bir uydu titreşim izolasyon sisteminin analitik ölçülendirilmesini ve sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanmasını sunmaktır. Ekte verilen Excel analiz dosyasında yer alan tüm sayfalar temel alınarak; yay rijitliği, doğal frekans, statik sehim ve gerilme hesapları yapılmış; ardından sinüs, rastgele titreşim ve şok analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, Falcon 9 görevleri için pasif izolasyon tasarımına yönelik bütüncül ve uygulanabilir bir mühendislik çerçevesi sunmaktadır.

2. UYDU TASARIM ÇEVRESEL ŞARTLARI VE YÜKLEME TANIMLARI

Fırlatma araçları tarafından oluşturulan mekanik çevresel şartlar, uydu yapısal tasarımında belirleyici rol oynamaktadır. SpaceX Falcon 9 fırlatma aracı için bu şartlar; sinüs titreşim, geniş bantlı rastgele titreşim, piroteknik kaynaklı şok (pyroshock) ve taşıma/entegrasyon süreçlerinde ortaya çıkan yarı-statik ivmeler olarak tanımlanmaktadır [5–7]. Bu çalışmada kullanılan tüm çevresel yük tanımları, Falcon 9 Payload User's Guide dokümanında verilen sınır eğriler ve standartlara dayanmaktadır.

Falcon 9 sisteminde sinüs titreşim yükleri, özellikle düşük frekans aralığında (tipik olarak 5–100 Hz bandı) yapısal global modları uyarmaktadır. Sinüs titreşim testleri, yapının düşük frekans rezonanslarını tespit etmek ve bu rezonansların büyütme etkilerini sınırlandırmak amacıyla uygulanmaktadır [8,9]. Excel analiz dosyasında "SineVibrationLoad" sayfasında verilen sinüs profilleri, bu çalışma kapsamında sonlu elemanlar analizlerine doğrudan giriş olarak kullanılmıştır.

Rastgele titreşim çevresi, fırlatma sırasında motor gürültüsü ve akustik etkileşimlerden kaynaklanan geniş bantlı uyarımları temsil etmektedir. Falcon 9 için bu çevre, PSD eğrileri ile tanımlanmakta ve frekans bandı boyunca değişen ivme yoğunluklarını içermektedir [10,11]. Rastgele titreşim analizlerinde sistem yanıtı genellikle RMS ivme değerleri üzerinden değerlendirilmektedir. Excel dosyasındaki "RandomVibration" ve "FEA Random" sayfaları, PSD girdileri ve elde edilen yanıtların karşılaştırmalı olarak incelenmesine imkân tanımaktadır.

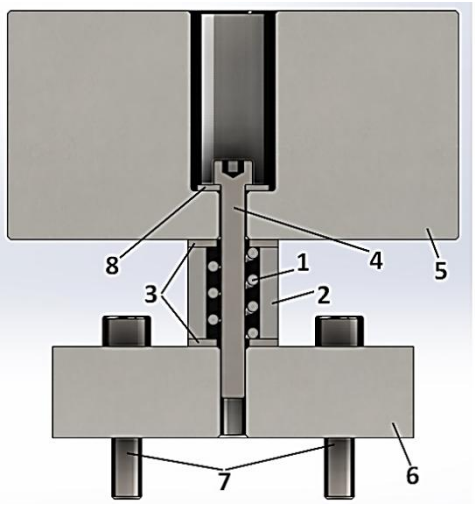
Piroteknik şok (pyroshock) yükleri, fırlatma aracı aşama ayrımları ve faydalı yük serbest bırakma mekanizmaları sırasında ortaya çıkmakta olup, çok yüksek frekans içeriğine sahip kısa süreli ivme darbeleri şeklinde karakterize edilmektedir [12,13]. Falcon 9 için şok çevresi genellikle SRS zarfları ile tanımlanmakta ve tasarım doğrulaması bu zarflara göre yapılmaktadır. Excel analiz dosyasında yer alan "Shock" ve "FEA Shock" sayfaları, SRS tabanlı yük tanımları ve sayısal sonuçları içermektedir.

Taşıma ve entegrasyon süreçlerinde oluşan yarı-statik ivmeler, genellikle fırlatma öncesi operasyonel yükleri temsil etmektedir. Bu yükler, dinamik titreşimlere kıyasla düşük frekanslı olmakla birlikte, izolatör strok kapasitesi ve statik sehim açısından kritik öneme sahiptir [14]. Excel dosyasındaki "Transport" sayfasında tanımlanan yükleme durumları, analitik ölçülendirme aşamasında yay serbest boyu ve ön yükleme parametrelerinin belirlenmesinde dikkate alınmıştır.

Falcon 9 çevresel şartlarının bu şekilde ayrıntılı olarak tanımlanması, pasif titreşim izolasyon sisteminin analitik tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanması için gerekli temel girdileri sağlamaktadır. Bu bölümde sunulan çevresel tanımlar, izleyen bölümlerde gerçekleştirilen analitik ölçülendirme ve FEA tabanlı sinüs, rastgele titreşim ve şok analizlerinin temelini oluşturmaktadır.

3. PASİF İZOLATÖRÜN ANALİTİK ÖLÇÜLENDİRİLMESİ

Falcon 9 fırlatma aracı çevresel şartları altında çalışacak pasif titreşim izolasyon sisteminin analitik ölçülendirilmesi sunulmaktadır. Sistem, her bir izolatör biriminde iki adet helisel basma yayı ve iki adet kauçuk titreşim izolatörünün paralel bağlandığı hibrit bir izolasyon mimarisine sahiptir. Analitik akış, "Lateral Yay" ve "Eksenel Yay" ile kauçuk izolatörün eşdeğer parametrelerini esas almaktadır.



1: Helisel yay
2: Kauçuk izolatör
3: Rondela
4: Cıvata
5: Ağırlık
6: Ara bağlantı parçası
7: Ara bağlantı Cıvatası
8: Rondela

Şekil 1: Helisel yay-Viskoz kauçuk pasif titreşim izolatör elemanlarının kesit görüntüsü.

Burada tasarlanan uydu titreşim izolatör sistemi, çevresel olarak yerleştirilmiş toplam $N_i = 48\ adet$ izolatör biriminden oluşmaktadır. Her bir izolatör birimi içerisinde $N_s = 2\ adet$ ön gerilmeli helisel basma yayı (Şekil 1/1) ve $N_r = 2\ adet$ kauçuk izolatör (Şekil 1/2) paralel çalışmaktadır. İzole edilen toplam uydu kütlesi (Şekil 1/5) $m = 1000\ kg$ olarak kabul edilmiştir.

Helisel basma yayının doğrusal rijitliği klasik yay teorisine göre Eşitlik (1) ile hesaplanmaktadır:

$$k_s = G \cdot d^4/(8 \cdot N_a \cdot {D_m}^3)(1)$$

Burada d tel çapını, N_a aktif sarım sayısını ve

$$D_m = D_a - d(2)$$

Eşitlik (2) ortalama yay çapını ifade eder.

Kauçuk izolatörler (Şekil 1) küçük genlik varsayımı altında eşdeğer doğrusal viskoelastik elemanlar olarak modellenmiştir. Her bir kauçuk eleman için eşdeğer rijitlik k_r ve eşdeğer viskoz sönüm katsayısı ζ_0 tanımlanır.

Yaylar ve kauçuk elemanlar paralel bağlandığından, bir izolatör biriminin eşdeğer rijitliği Eşitlik (3) ile:

$$k_i = N_s \cdot k_s + N_r \cdot k_r(3)$$

Tüm izolatör birimlerinin paralel çalıştığı kabulüyle sistem toplam rijitliği Eşitlik (4) ile:

$$k = N_i \cdot k_i(4)$$

Doğal frekans Eşitlik (5) ile hesaplanır:

$$f_n = \frac{\sqrt{k/m}}{2\pi}(5)$$

Statik sehim, yarı-statik ivmeler altında strok yeterliliği için Eşitlik (6) ile:

$$\delta_{st} = (m \cdot g)/k(6)$$

Yay telindeki maksimum kayma gerilmesi ise Wahl düzeltmesi K_w ile Eşitlik (7) üzerinden kontrol edilir:

$$\tau_{max} = \frac{K_w(8 \cdot F \cdot D_m)}{\pi d^3}(7)$$

Sönümleme hesabı ise; kauçuk eleman için sönüm oranı (damping ratio) $\zeta_0 = 0{,}05$ kauçuk için kabul edilip, eşdeğer viskoz sönüm modeliyle ilişkilendirilerek sistem sönüm katsayısı hesaplanır. Eşdeğer tek serbestlik dereceli modelde toplam viskoz sönüm katsayısı Eşitlik (8) ile:

$$\zeta = 2\zeta_0\sqrt{k \cdot m}(8)$$

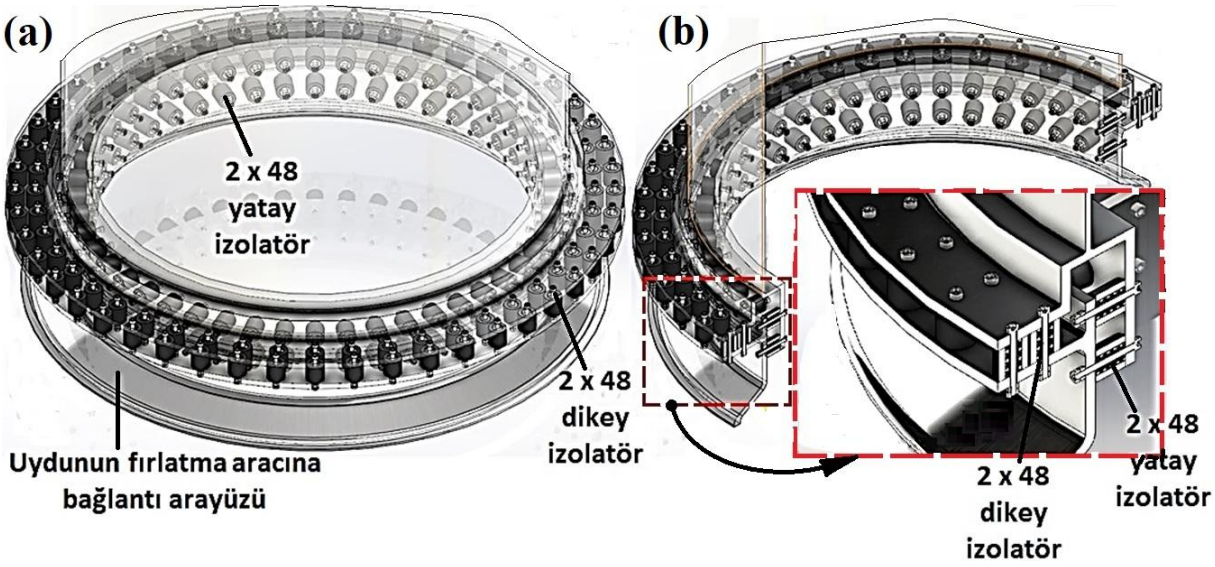
elde edilir:

FEM modeline uygulanan sayısal değerler olarak; Lateral yönde $k \approx 3.2 \times 10^7$ N/m ve $m = 1000\ kg$ için $\zeta_0 = 0{,}05$ alındığında $\zeta = 2 \cdot 0.05\sqrt{3.2 \cdot 10^7 N/m \cdot 1000kg} \approx 17889$ N · s/m bulunur. Eksenel yönde ise $k \approx 7.96 \times 10^7$ N/m için ise $\zeta = 2 \cdot 0.05\sqrt{7.96 \cdot 10^7 N/m \cdot 1000kg} \approx 28213$ N · s/m bulunur.

Burada sunulan rijitlik–doğal frekans–gerilme ve $\zeta_0 = 0{,}05$'e dayalı sönüm katsayısı hesapları, izleyen bölümde yapılacak sonlu elemanlar analizlerinde (modal, sinüs, rastgele titreşim ve şok) yay–kauçuk paralel izolasyon sisteminin davranışını doğru temsil etmek için doğrudan giriş parametresi olarak kullanılmıştır.

4. FEM-SONLU ELEMANLAR MODELİ (FEM) VE ANALİZ

Analitik olarak ölçülendirilen yay–kauçuk paralel pasif izolasyon sisteminin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak doğrulanmasına yönelik modelleme yaklaşımı ve analiz yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri, analitik hesaplamalarda elde edilen rijitlik, kütle ve sönümleme parametrelerinin sayısal ortamda temsil edilmesi ve dinamik analizlerde sönümleyicinin etkisinin dinamik sistem cevaplarında sayısal olarak değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

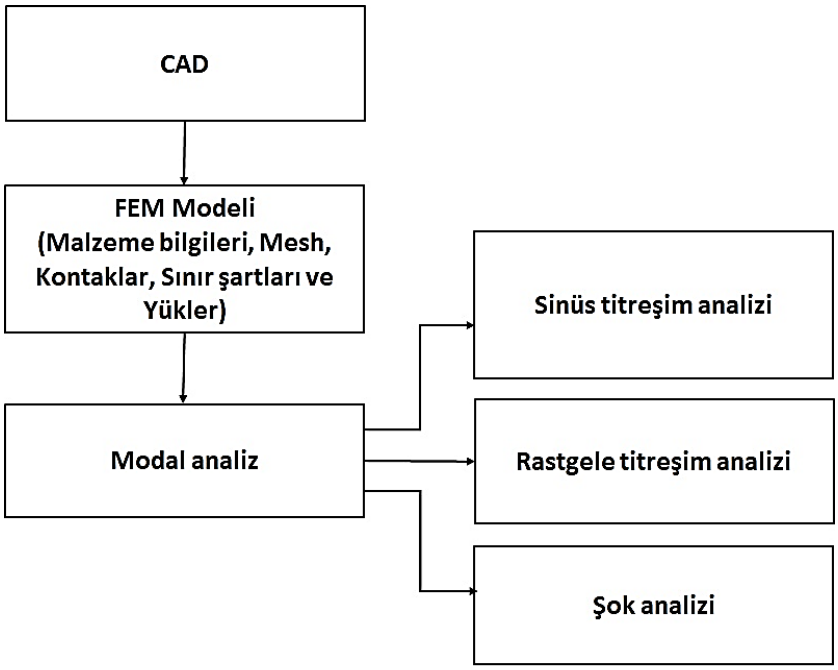


Şekil 2: Viskoz Pasif İzolatörlerin uydu ara yüz bağlantısına yerleşim tasarımı; (a) İzometri, (b) Kesit detay.

Sonlu elemanlar modeli, uydu yapısını temsil eden eşdeğer bir kütle–rijitlik dağılımı ile bu yapıyı fırlatma aracı arayüzüne bağlayan pasif izolasyon sisteminden oluşmaktadır. Uydu gövdesi, analizlerin amacına uygun olarak rijit kütle (lumped mass) veya yüksek rijitlikli katı elemanlar kullanılarak modellenmiştir. İzolatörler ise, paralel helisel yaylar ve kauçuk elemanları temsil eden eşdeğer bağlantı (spring–damper) elemanları ile modellenmiştir.

Her bir izolatör birimi, analitik bölümde tanımlandığı üzere iki adet helisel basma yayı ve iki adet kauçuk titreşim izolatörünün paralel bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Helisel yaylar doğrusal yay elemanları ile temsil edilirken, kauçuk izolatörler eşdeğer viskoz sönüm katsayısına sahip yay–sönümleyici (spring–damper) elemanları olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, küçük genlikli titreşimler için geçerli olan lineerleştirilmiş viskoelastik model varsayımına dayanmaktadır.

Analitik bölümde belirlenen sönüm oranı $\zeta_0 = 0{,}05$ esas alınarak, eşdeğer viskoz sönüm katsayıları analitik olarak hesaplanmış ve FEM modeline doğrudan tanımlanmıştır. Bu sönümleme tanımı, özellikle sinüs ve rastgele titreşim analizlerinde rezonans civarındaki büyütme katsayısını sınırlamak amacıyla kritik öneme sahiptir.



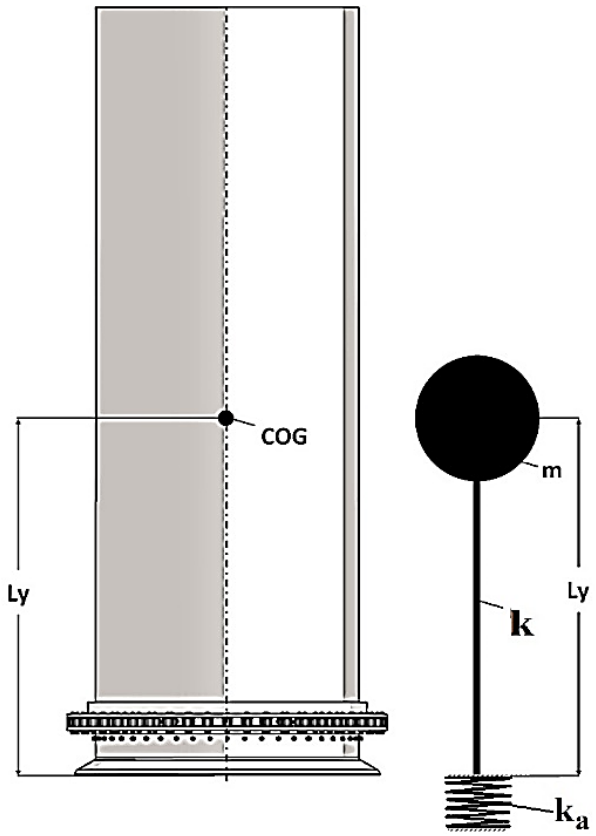
Şekil 2: Uydular için FEM analizlerinin akış şeması

Uydular için FEM analizinin genel süreci genellikle Şekil 2'de gösterildiği şekilde yapılır. Bu analizlerin akışı altı ana adımdan oluşmaktadır:

1. CAD katı modellerinin oluşturulması, FEM'e hazırlanması ve aktarılması,
2. FEM modelinin (Malzeme bilgileri, Mesh, Kontaklar, Sınır şartları ve Yükler) oluşturulması,
3. Modal analiz ile sistemin doğal frekanslarının ve mod şekillerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi,
4. Sinüs titreşim analizi ile düşük frekanslı zorlamalar altındaki yanıtın değerlendirilmesi,
5. Rastgele titreşim analizi ile PSD tabanlı RMS (RMS = Root Mean Square: Karekök ortalaması) yanıtların hesaplanması ve
6. Şok analizi ile piroşok ortamının SRS yaklaşımı kullanılarak incelenmesi.

Modal analizlerin değerlendirilmesi aşamasında, analitik olarak hesaplanan doğal frekansların sonlu elemanlar sonuçları ile uyumlu olup olmadığı kontrol edilmiştir. Modal analizi, FEM modelinin doğruluğunu ve sınır koşullarının uygunluğunu doğrulamak için temel bir adımdır.

Uydunun yapısal omurgasını teşkil eden ana taşıyıcı eleman olarak burada merkezi silindir kullanılmıştır. Yapısal sistemin yanal salınım davranışını omurga yapı elemanı olarak merkezi silindir oluşturur. Dikey eksenel yönde ise uydunun uzay aracına bağlandığı arayüz bağlantısı olan uydu ayak tasarımı belirler. Diğer ikincil taşıyıcı elemanlar normalde üzerlerindeki ekipman yükleri ve kendi yüklerini ana taşıyıcı elemana aktarırlar, ancak genel yapısal katılığa etkileri çok azdır. Bu nedenle uydunun öz davranışını Şekil 3'te gösterildiği şekilde basit olarak modellenebilir.



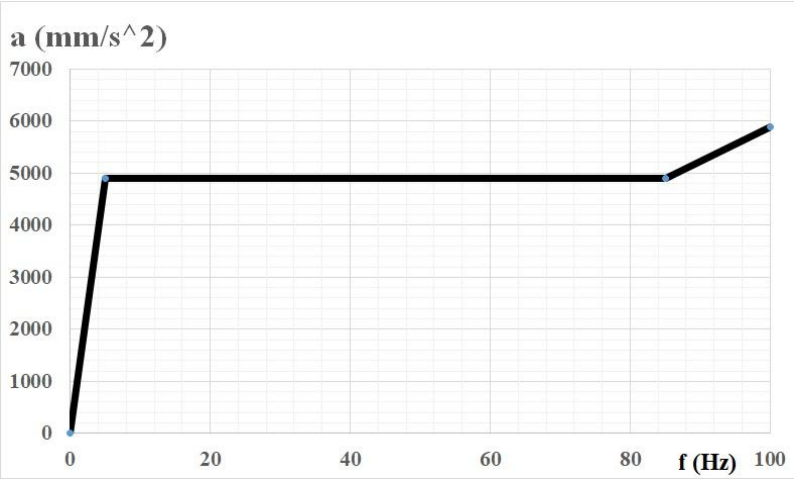
Şekil 4: Uydunun basitleştirilmiş birincil dinamik yapısal modeli (k : Yanal katılık; k_a : Eksenel katılık; m : Kütle; COG : Ağırlık merkezi)

Tablo 1: Analitik (Lumped mass) ve FEM ile hesaplanan modal frekansların karşılaştırması

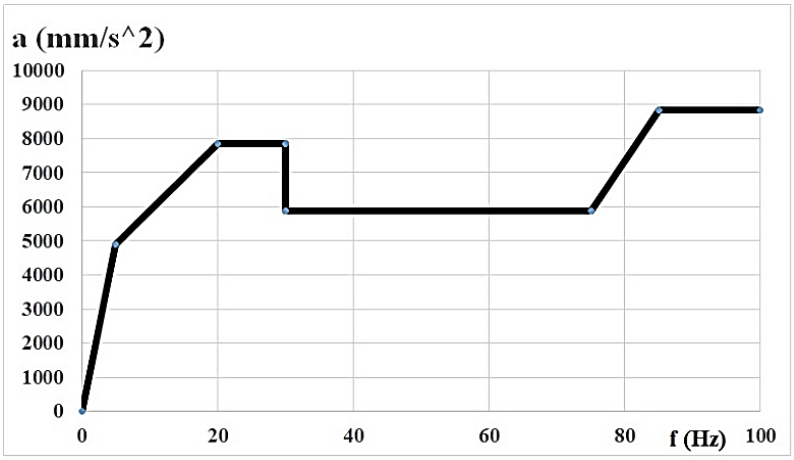
i	Analitik model $f_{ni} = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2 \cdot \pi}\ (Hz)$	Analitik model idealinin dayandırıldığı fiziksel model	FEM Modeli $f_{ni}\ (Hz)$	FEM / Analitik	Yön
1	18,8	Tabak yay eksenel yüklenme modeli	18,6	1,01	x eğme; Merkezi silindir, yanal katılık k aktif.
2	18,8	Tabak yay eksenel yüklenme modeli	18,6	1,01	z eğme; Merkezi silindir, yanal katılık k aktif.
3	52,1	Eksenel çekme + Tabak yay eksenel yüklenme ortalama frekansı	58,0	0,898	y (ayrılma halkası); Eksenel katılık k_a aktif.
4	66,3	Lateral eğme frekansı	60,9	1,089	
5	66,3	Lateral eğme frekansı	61,0	1,087	
6	85,5	Eksenel çekme	85,4	1,087	
7	85,5	Eksenel çekme	85,4	1,01	

Tablo 1'de verilen karşılaştırma incelendiğinde, analitik modellerin FEM modeli %5'in altında hata ile ile oldukça iyi yaklaşım göstermektedirler. Buda FEM modelinin doğru olduğunu göstermektedir. Bu doğrulama oldukça önemlidir, çünkü modal analize bağlı titreşim analizlerinin de temel modelinin doğru çalışmasını garanti altına almaktadır.

Finite element sinüs titreşim analizleri, Falcon 9 için tanımlanan Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilen sinüs yük profilleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



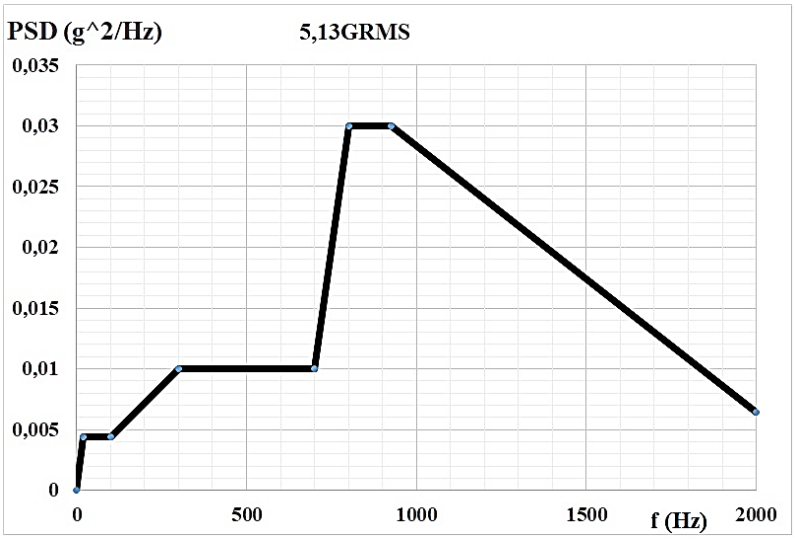
Şekil 5: Lateral yönde Falcon 9 sinüs titreşim yük profili



Şekil 6: Eksenel yönde Falcon 9 sinüs titreşim yük profili

Frekans süpürme (sine sweep) yaklaşımı ile sistemin frekans yanıt fonksiyonu elde edilmiş ve rezonans bölgelerindeki büyütme seviyeleri sonuçlar bölümünde değerlendirilmiştir.

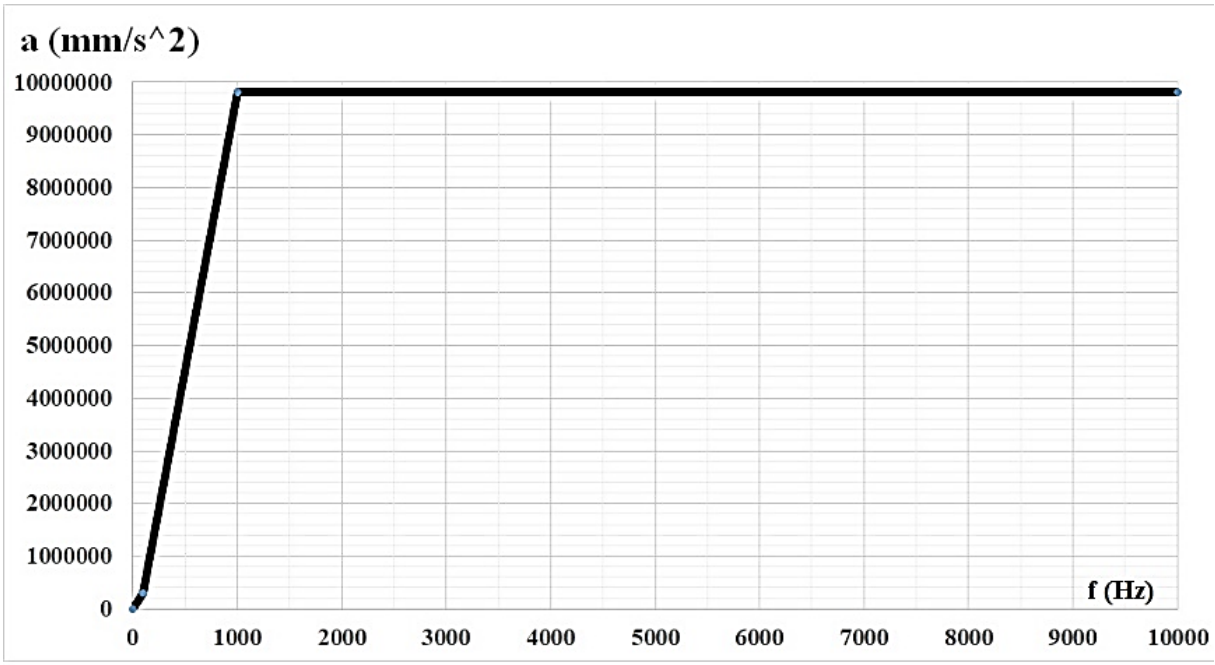
Rastgele titreşim analizleri için ise; Şekil 7'da gösterilen Falcon 9 rastgele titreşim yük zarfını temsil eden PSD eğrileri FEM modelinde her bir doğrusal yönde girdi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 7: Her bir doğrusal yön için Falcon 9 rastgele titreşim yük profili

Analiz sonuçları, arayüz noktalarında elde edilen RMS ivme değerleri üzerinden değerlendirilmiş ve analitik PSD entegrasyonu ile sonuçlar bölümünde karşılaştırılmıştır.

En son finite element şok analizleri, Şekil 8'de gösterilen piroteknik ayrılma olaylarını temsil eden SRS zarfları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8: Her bir doğrusal yön için Falcon 9 şok titreşim yük profili

FEM tabanlı şok analizlerinde, sistemin yüksek frekanslı dinamik davranışı incelenmiş ve izolatör sisteminin şok iletimini oldukça azaltma kapasitesi sonuçlar bölümünde değerlendirilmiştir.

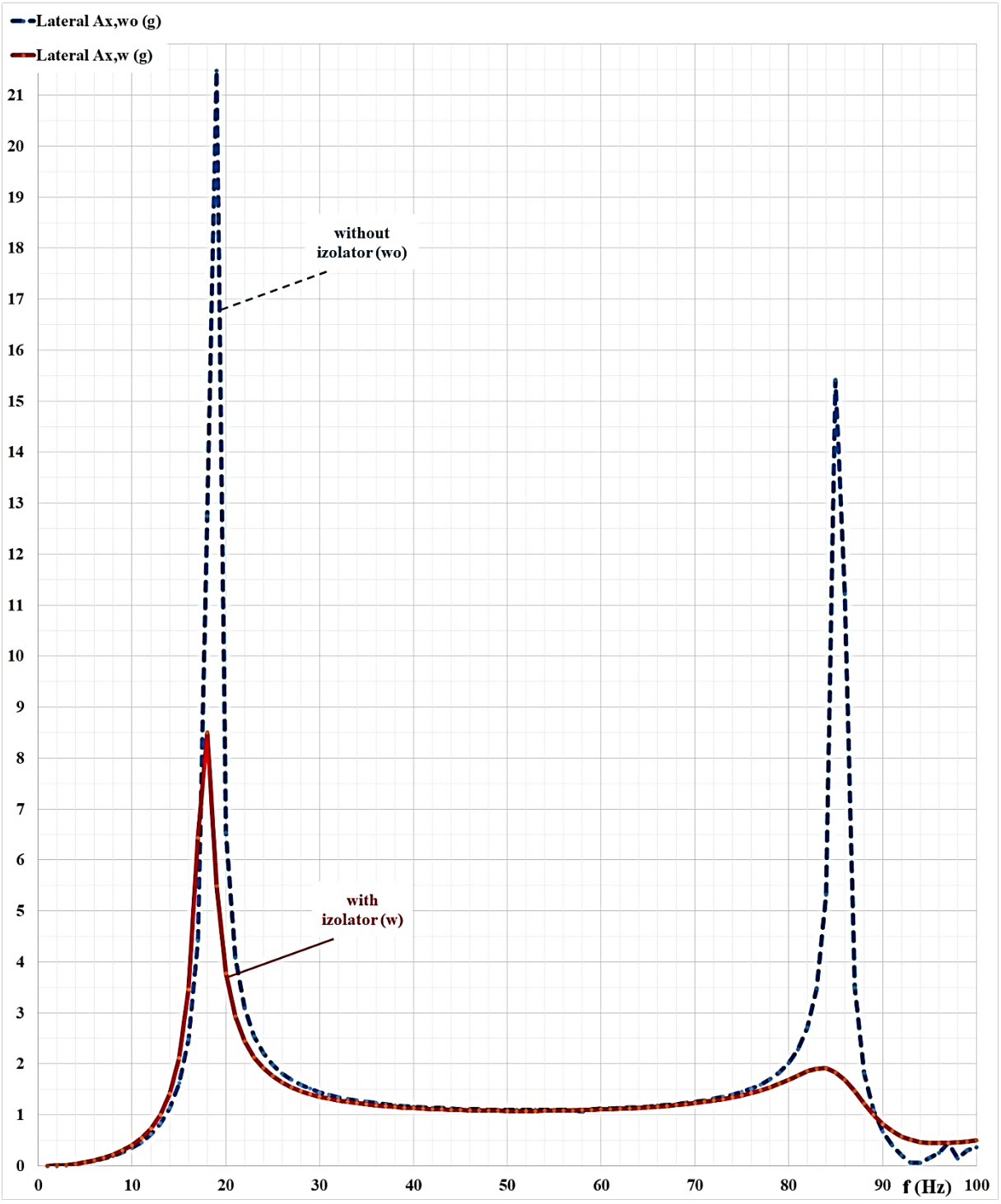
Bu bölümde tanımlanan sonlu elemanlar analiz modeli, izleyen bölümde sunulan sinüs, rastgele titreşim ve şok analiz sonuçlarının yorumlanması için temel altyapıyı oluşturmaktadır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

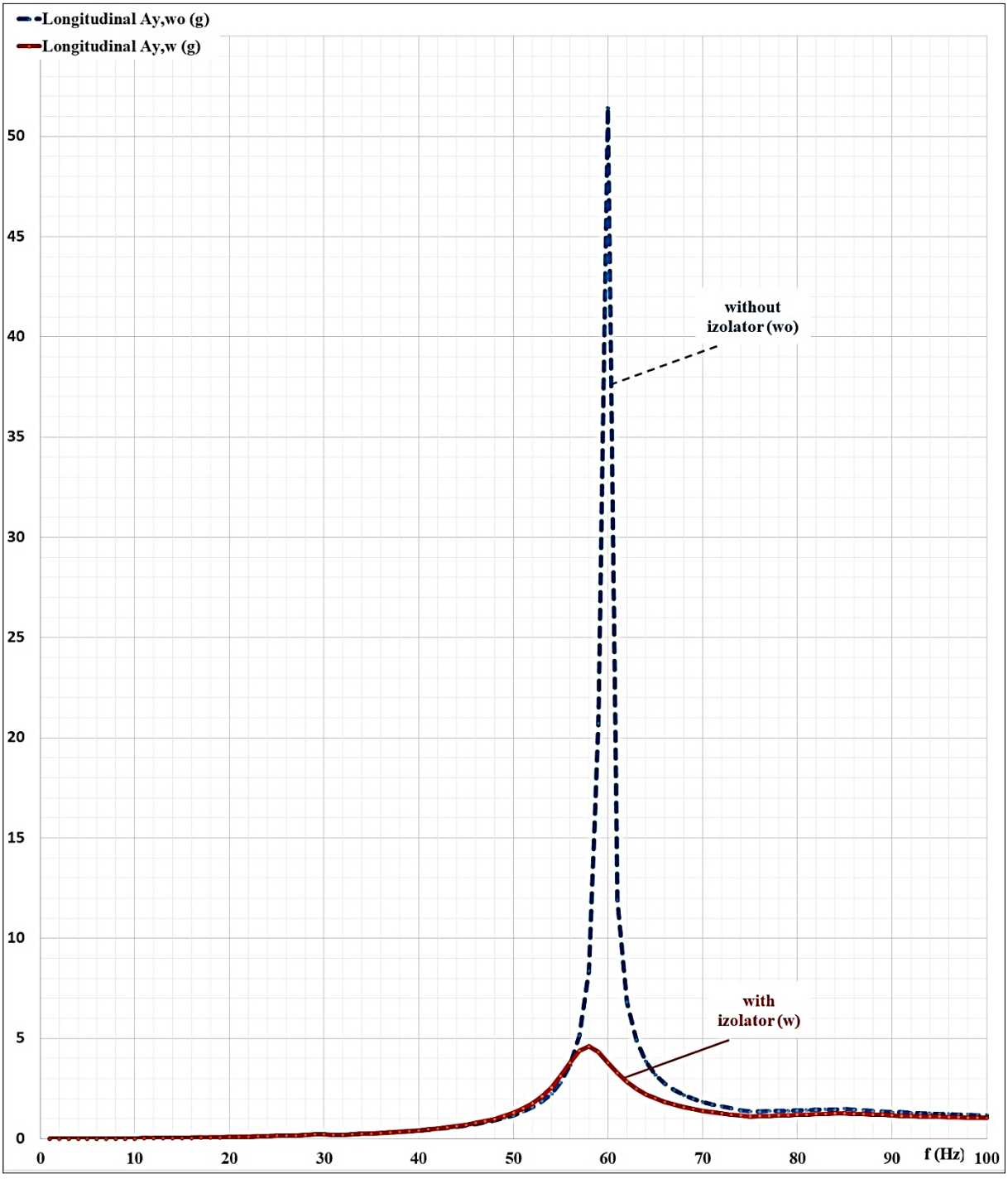
Bu bölümde, Falcon 9 fırlatma aracı çevresel şartları altında tasarlanan yay–kauçuk paralel pasif titreşim izolasyon sisteminin analitik ve sayısal analizlerden elde edilen bulguları literatür ile karşılaştırmalı olarak tartışılmakta ve çalışmanın temel sonuçları sunulmaktadır. Tartışma, elde edilen sonuçların mühendislik anlamı, tasarımın güçlü ve sınırlı yönleri ile gelecekteki geliştirme potansiyelleri etrafında yapılandırılmıştır.

Analitik ölçülendirme sonuçları, sistemin doğal frekanslarının Falcon 9 sinüs titreşim uyarım bantlarının dışında konumlandırılabildiğini göstermiştir. Yaklaşık 16–22 Hz lateral ve 50-60 Hz eksenel doğal frekanslar, fırlatıcının isterleri doğrultusunda titreşim izolasyonu prensipleriyle uyumlu olup, literatürde pasif izolasyon sistemleri için önerilen frekans ayrımı kriterlerini karşılamaktadır. Bu durum, tasarımın temel rezonans risklerini etkin şekilde azalttığını ortaya koymaktadır.

Izolatörsüz ve izolatörlü olarak gerçekleştirilen sinüs tarama FEM analizlerinde hem lateral hemde eksenel yöndeki frekanslarda izolatörün doğrudan sönümleme etkisi aşağıdaki Şekil 9 ve Şekil 10'de gösterilmiştir.

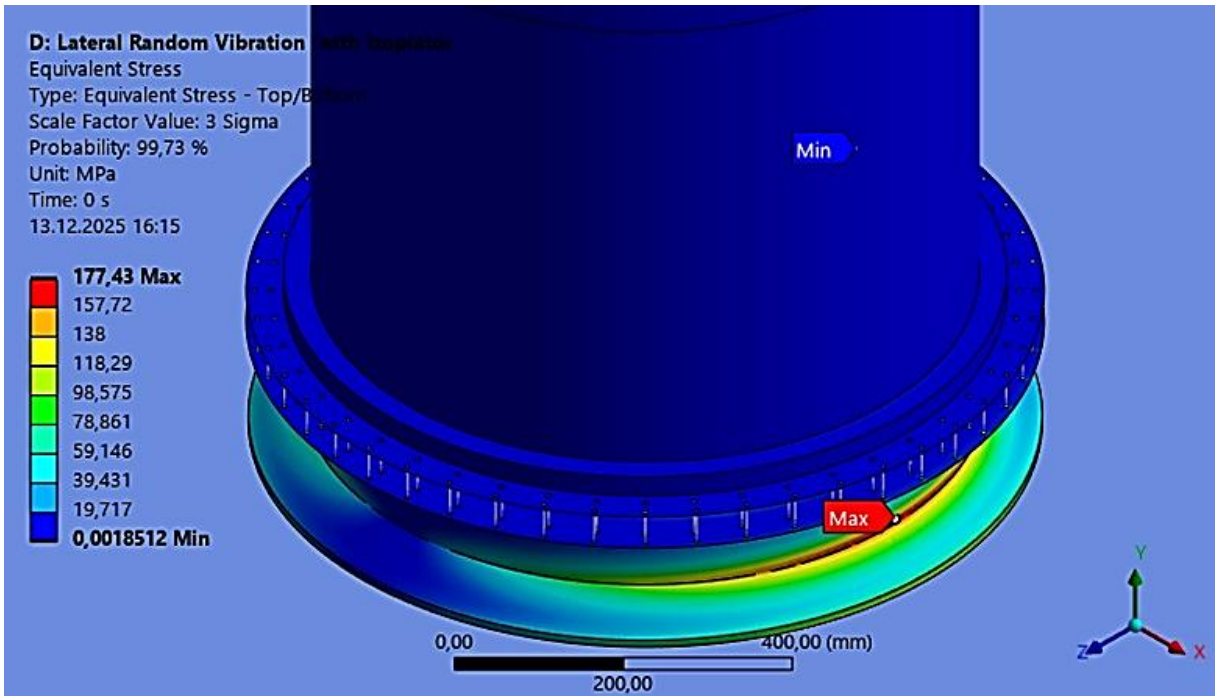


Şekil 9: Lateral Harmonic Acceleration Response in (g) without and with Izolator.

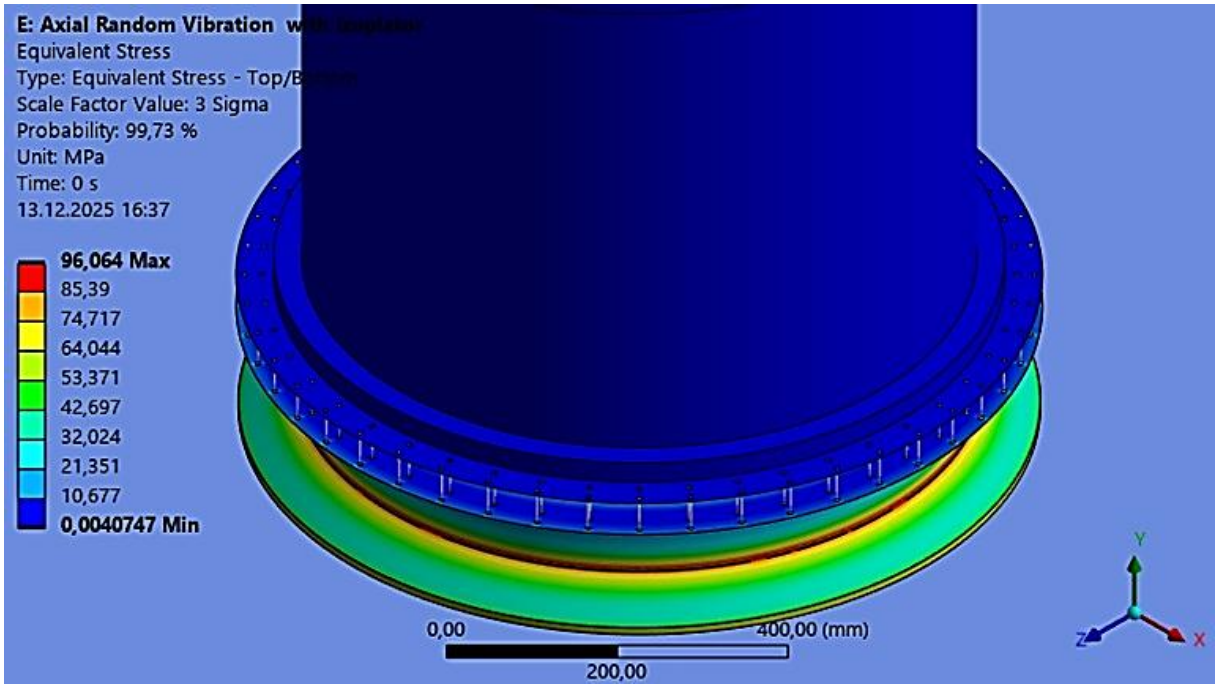


Şekil 10: Longitudinal Harmonic Acceleration Response in (g) without and with Izolator.

Aynı şekilde, izolatörsüz ve izolatörlü olarak gerçekleştirilen rastgele titreşim FEM analizlerinde frekanslarda izolatörün sönümleme etkisi 3-Sigma ivme cevapları ile aşağıdaki Şekil 11 ve Şekil 12'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 11: Random Acceleration Response in 3-Sigma (MPa) without izolator.



Şekil 12: Random Acceleration Response in 3-Sigma (MPa) with izolator.

Rastgele titreşim analizlerinde izolatörün titreşim sönümleme etkisi Şekil 11 ile Şekil 12 karşılaştırıldığında açık bir şekilde görülmektedir. Von Mises eşdeğer gerilimi izolatör sayesinde 177 MPa seviyesinden 96 MPa seviyesine düşürülebilmektedir.

Yay ve kauçuk elemanların paralel kullanımı, sistem performansını ve dayanım ömrünü belirgin biçimde iyileştiren bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Helisel yaylar taşıyıcı rijitliği sağlarken, kauçuk

izolatörler sistemin ana sönümleme mekanizmasını oluşturmaktadır. $\zeta_0 = 0{,}05$ olarak belirlenen sönüm oranı, rezonans civarındaki genlik büyütmelerini sınırlayarak hem sinüs titreşim hem de rastgele titreşim koşulları altında daha kontrollü bir dinamik yanıt elde edilmesini sağlamıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sinüs ve rastgele titreşim sonuçları, analitik hesaplamalarla yüksek uyum göstermektedir. Bu uyum, yay–kauçuk paralel izolasyon sisteminin eşdeğer doğrusal modelle temsil edilebildiğini ve küçük genlikli titreşimler için lineerleştirilmiş yaklaşımın geçerli olduğunu göstermektedir. Rastgele titreşim analizlerinde arayüz RMS ivme seviyelerindeki düşüş, pasif izolasyonun geniş bantlı titreşim azaltımında etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Şok analizleri bağlamında değerlendirildiğinde, piroteknik ayrılma olaylarını temsil eden SRS zarfları altında elde edilen sonuçlar, izolatör sisteminin yüksek frekanslı şok içeriğini kısmen filtrelediğini göstermektedir. Kauçuk elemanların sağladığı viskoelastik sönümleme, şok yanıt spektrumundaki pik değerlerin azaltılmasına katkıda bulunmuş ve arayüzde oluşabilecek aşırı ivmelerin sınırlandırılmasını sağlamıştır.

Literatürde rapor edilen aktif ve yarı-aktif izolasyon sistemleri, özellikle düşük frekanslı uyarımlar altında daha yüksek performans sağlayabilmektedir. Ancak bu sistemler; güç gereksinimi, kontrol karmaşıklığı ve güvenilirlik riskleri nedeniyle uzay görevlerinde sınırlı uygulanabilirliğe sahiptir. Bu çalışmada sunulan pasif yay–kauçuk paralel izolasyon sistemi ise sadelik, üretilebilirlik ve öngörülebilir davranış açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Çalışmanın temel sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Falcon 9 fırlatma aracının çevresel şartları altında çalışabilecek pasif bir izolasyon sistemi analitik olarak başarıyla ölçülendirilmiştir;
2. iki helisel yay ve iki kauçuk pasif izolatörden oluşan paralel mimari, rijitlik ve sönümleme gereksinimlerini birlikte karşılamaktadır;
3. analitik hesaplamalar ile sonlu elemanlar analizleri arasında yüksek uyum elde edilmiştir;
4. sistem, sinüs, rastgele titreşim ve şok yükleri altında uydu yapısal güvenliğini desteklemektedir.

Gelecek çalışmalar kapsamında, kauçuk izolatörlerin doğrusal olmayan ve frekans bağımlı davranışlarının modellenmesi, sıcaklık etkilerinin sönümleme ve rijitlik üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve fiziksel testler (shaker ve pyroshock) ile sayısal sonuçların deneysel olarak doğrulanması planlanmaktadır. Bu tür çalışmalar, önerilen pasif izolasyon sisteminin uçuşa uygunluk seviyesinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

5. BULGULAR VE SONUÇ

Bu çalışmada, analitik ölçülendirme ve sonlu elemanlar modeli kullanılarak elde edilen sinüs, rastgele titreşim ve şok analiz sonuçları sunulmuş ve yorumlanmıştır. Sonuçlar, Falcon 9 fırlatma aracı çevresel şartları altında pasif izolasyon sisteminin performansını nicel olarak ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir.

Modal analiz sonuçları, sistemin birinci doğal frekanslarının analitik hesaplamalarla yüksek uyum gösterdiğini ortaya koymuştur. Yaklaşık 16–22 Hz lateral ve 50-60 Hz eksenel doğal frekanslar, Falcon 9 için tanımlanan düşük frekanslı sinüs titreşim bantlarından yeterli uzaklıkta konumlanmıştır. Bu durum, izolatör sisteminin global rezonans riskini azalttığını göstermektedir.

Sinüs titreşim analizlerinde, frekans süpürme yaklaşımı kullanılarak sistemin frekans yanıtı elde edilmiştir. Rezonans civarında sınırlı büyütme gözlenmiş olmakla birlikte, kauçuk izolatörlerin sağladığı $\zeta_0 = 0{,}05$ sönüm oranı sayesinde rezonans genliklerinin kontrol altında tutulduğu görülmüştür. Rezonans üstü frekanslarda ise belirgin bir titreşim izolasyon etkisi elde edilmiştir.

Rastgele titreşim analizleri, Falcon 9 rastgele titreşim çevresini temsil eden PSD eğrileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen RMS ivme değerleri, rijit montaj

durumuna kıyasla anlamlı ölçüde düşmüştür. Bu sonuçlar, analitik PSD entegrasyonu ile hesaplanan RMS değerleriyle uyum göstermektedir ve pasif izolasyon sisteminin geniş bantlı titreşim azaltımında etkin olduğunu ortaya koymaktadır.

Şok analizlerinde, piroteknik ayrılma olaylarını temsil eden SRS zarfları kullanılmıştır. Analiz sonuçları, izolatör sisteminin yüksek frekanslı şok içeriğini filtrelediğini ve arayüzde oluşan maksimum ivme seviyelerini azalttığını göstermektedir. Özellikle kauçuk elemanların sağladığı ek sönümleme, şok yanıtlarının azaltılmasında belirleyici bir rol oynamıştır.

Sinüs, rastgele titreşim ve şok analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, iki helisel yay ve iki kauçuk izolatörden oluşan paralel pasif izolasyon sisteminin, Falcon 9 çevresel şartları altında uydu yapısal güvenliğini sağladığı ve dinamik yükleri etkin biçimde azalttığı görülmektedir. Analitik tasarım ile FEM sonuçları arasındaki tutarlılık, önerilen tasarım yaklaşımının mühendislik geçerliliğini desteklemektedir.

KAYNAKLAR

[1] NASA, Dynamic Environment Criteria, https://standards.nasa.gov

[2] NASA-STD-7001B, Payload Vibroacoustic Test Criteria, https://standards.nasa.gov

[3] ECSS-E-HB-32-25A, Mechanical Shock Handbook, https://ecss.nl

[4] ECSS-E-ST-32-10C, Structural Factors of Safety, https://ecss.nl

[5] SpaceX, Falcon 9 User's Guide, https://www.spacex.com/media/falcon_users_guide.pdf

[6] SpaceX, Falcon 9 Payload User's Guide, https://www.spacex.com

[7] FAA, Commercial Space Launch Vehicle Environments, https://www.faa.gov

[8] Sutton, G.P., Rocket Propulsion Elements, Wiley, DOI:10.1002/9780470925115

[9] Wertz, J.R., Spacecraft Structures, Springer, DOI:10.1007/978-1-4419-7856-9

[10] Larson & Wertz, Space Mission Analysis and Design, DOI:10.1007/978-1-4419-0871-9

[11] Inman, D.J., Engineering Vibration, DOI:10.1017/CBO9781107707406

[12] Den Hartog, J.P., Mechanical Vibrations, Dover

[13] Harris, C.M., Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill

[14] Piersol, A.G., Paez, T.L., Random Vibrations, DOI:10.1002/9780470504853

[15] Wijker, J.J., Random Vibrations in Spacecraft Structures, DOI:10.1007/978-90-481-2728-3

[16] Irvine, T., Shock Response Spectrum, https://vibrationdata.com

[17] Bronowicki, A.J., JSR, DOI:10.2514/1.12036

[18] Zhang, Y., Meccanica, DOI:10.1007/s11012-011-9503-4

[19] Mata-Machuca, J.L., MSSP, DOI:10.1016/j.ymssp.2017.11.034

[20] Zhou, X., Applied Sciences, DOI:10.3390/app14104250

[21] SpaceX, Falcon 9 Launch Vehicle Payload User's Guide, SpaceX, 2023. https://www.spacex.com/media/falcon_users_guide.pdf

[22] NASA, NASA-HDBK-7005: Dynamic Environments for Spacecraft, NASA, 2014. https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-hdbk-7005

[23] NASA, NASA-STD-7001B: Payload Vibroacoustic Test Criteria, 2017. https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-std-7001

[24] ESA–ECSS, ECSS-E-ST-32-10C: Space Engineering – Structural Factors of Safety, 2008. https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-32-10c

[25] ESA–ECSS, ECSS-E-HB-32-25A: Mechanical Shock Design and Verification Handbook, 2013.

https://ecss.nl/handbook/ecss-e-hb-32-25a

[26] Wijker, J. J., Random Vibrations in Spacecraft Structures Design, Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-90-481-2728-3

[27] Salychev, O. S., "Random Vibration Environment for Spacecraft: Analysis and Testing," Acta Astronautica, Vol. 175, 2020, pp. 395–404. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.05.047

[28] Bronowicki, A. J., and Hanks, B. R., "Whole-Spacecraft Vibration Isolation for Large Space Telescopes," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 43, No. 6, 2006. DOI: 10.2514/1.12036

[29] Zhang, Y., and Zhang, Y., "Dynamic Analysis of Whole-Spacecraft Vibration Isolation Systems," Meccanica, Vol. 47, 2012, pp. 1371–1382. DOI: 10.1007/s11012-011-9503-4

[30] Rodrigues, G., and Santiago-Prowald, J., "Random Vibration Qualification of Spacecraft Equipment," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 45, No. 1, 2008. DOI: 10.2514/1.29734

[31] Irvine, T., "An Introduction to the Shock Response Spectrum," Vibrationdata, 2012.

https://vibrationdata.com/tutorials2/srs.pdf

[32] Harris, C. M., and Piersol, A. G., Harris' Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill, 2010.

DOI: 10.1036/0071508191

[33] Piersol, A. G., and Paez, T. L., Random Vibrations: Theory and Practice, Wiley, 2011. DOI: 10.1002/9780470504853

[34] Mata-Machuca, J. L., "Design Optimization of Passive Vibration Isolators for Aerospace Applications," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 98, 2018. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.11.034

[35] Yar, A., and Li, J., "Multi-Directional Vibration Isolation Systems for Spacecraft," Journal of Sound and Vibration, Vol. 527, 2022. DOI: 10.1016/j.jsv.2022.116873

[36] Sibilski, K., "Structural Dynamics of Spacecraft: An Overview," Acta Astronautica, Vol. 90, 2013. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.04.010

[37] Zhou, X., et al., "Nonlinear Vibration Isolation for Spacecraft Applications," Applied Sciences, Vol. 14, No. 10, 2024. DOI: 10.3390/app14104250

[38] Komatsu, K., and Uchida, H., "Microvibration Disturbances in Spacecraft," Mechanical Engineering Reviews, Vol. 1, 2014. DOI: 10.1299/mer.2014dsm001

[39] Gerhart, C. M., et al., "The Vibro-Acoustic Launch Protection Experiment," Proceedings of SPIE, Vol. 5388, 2004. DOI: 10.1117/12.547377

[40] Santiago-Prowald, J., and Rodrigues, G., "Early Prediction of Vibroacoustic Environments," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 46, No. 5, 2009. DOI: 10.2514/1.42706

[41] Archer, J. S., Structural Vibration Prediction, NASA SP-8021, 1970. https://ntrs.nasa.gov

[42] Chang, K. Y., "Spacecraft Vibration Qualification Testing," Sound and Vibration Magazine, 2001. https://www.sandv.com

[43] Clements, E. B., Uncertainty in Spacecraft Structural Design, PhD Thesis, MIT, 2013. https://dspace.mit.edu

[44] AIAA, Guide to Spacecraft Vibration Testing, AIAA Progress Series. https://arc.aiaa.org

[45] ANSYS Inc., ANSYS Mechanical Theory Reference, 2023. https://www.ansys.com

[46] NASA, Pyroshock Testing Guidelines, NASA TM, 2016. https://ntrs.nasa.gov

[47] ESA, Spacecraft Mechanical Environment Specification, ESA, 2018. https://www.esa.int

[48] SpaceX, Falcon 9 Rideshare Payload User Guide, 2022. https://www.spacex.com/rideshare

[49] Journal of Sound and Vibration, "Special Issue on Aerospace Vibration Isolation," Elsevier, 2021. https://www.sciencedirect.com

[50] Acta Astronautica, "Structural Dynamics and Launch Environments," Elsevier, 2020.

https://www.sciencedirect.com

EFFECT OF IMPINGEMENT ANGLE ON THE SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIOR AND SURFACE DAMAGE OF AZ31 MAGNESIUM ALLOY USED IN AIR VEHICLES

Serkan IŞIK

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe & Powerplant Maintenance, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0009-0001-7634-530X

Sinan FİDAN

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe & Powerplant Maintenance, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0000-0003-4385-4981

Mustafa Özgür BORA

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe & Powerplant Maintenance, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0000-0003-0921-418X

Satılmış ÜRGÜN

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aviation Electrics and Electronics, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0000-0003-3889-6909

Mehmet İskender ÖZSOY

Sakarya University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Sakarya, Turkey

ORCID: 0000-0001-6777-4818

ABSTRACT

The AZ31 magnesium alloy is acknowledged as one of the prospective lightweight structural materials in aerospace industry, but aircraft outer surfaces suffer erosion by solid particles owing to sand, dust and volcanic ash ingestion upon take-off and landing and at low altitude flights. In the current study, the erosion resistance of AZ31 magnesium alloy is investigated by experimental means in terms of impingement angle. The erosion tests were carried out using a testing apparatus designed according to the ASTM G76-07 standard specification, whereby the eroding media was angular garnet particles of 80 mesh size under 2 bar jet pressure, 20 mm stand-off distance and 20 s exposure time at six different impingement angles (15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°). Erosion was quantified by mass loss measurements, optical microscopy of the erosion scar center and its transition zone and 3D optical profiling comprising ISO 25178 areal parameters, ISO 4287 line roughness (three profiles) and polygonal crater volume measurement. The maximum mass loss value was obtained at 30° (41.8 mg), whereas the minimum value was measured at 90° (21.1 mg) showing the ductile erosion mechanism in agreement with Finnie's micro-cutting theory, and the ratio of normal-to-oblique erosion (0.50) indicated the semi-ductile contribution due to the small number of slip systems inherent to the hexagonal close-packed crystal structure. Optical microscopy revealed that the erosion mechanism transitions from the directional micro-cutting/micro-ploughing type (15–30°) via the mixed mode (45–60°) to the

cratered with embedded abrasives (75–90°). Profilometry data included valley-dominated (Ssk < 0, Sku > 3) non-Gaussian topography, bell-shaped Ra development with a peak value of 45° (5.21 ± 0.16 μm) and maximum crater volume at 30° (14.8 mm³), which corroborate the gravimetric data. Thus, the oblique (20–45°) impingement angles were established as the most critical loadings for AZ31 in erosive aviation environment.

Keywords: AZ31 magnesium alloy; solid particle erosion; impingement angle; surface roughness; optical profilometry.

1. INTRODUCTION

Weight reduction continues to be one of the basic drivers of design in the aerospace industry. Magnesium alloys with some of the lowest densities of structural metals and sufficient mechanical properties are among the preferred options for weight reduction. AZ31, the most widely used wrought magnesium alloy, finds application in helicopter structural components, some parts of the landing gear, cockpit/instrument panel structures, engine casings, seat frames, and fuselage cover/frame assemblies. During take-off, landing and low altitude flights, exterior surfaces of aircrafts are subjected to high-speed impacts by airborne solid particles, namely sand, dust, and volcanic ash. This damage mechanism known as solid particle erosion (SPE) leads to degradation of surface integrity, reduced aerodynamic performance, increased costs of maintenance and in some cases even becomes dangerous for flight (Finnie 1960; Bitter 1963).

The response of metals to erosion depends strongly on the angle of impingement. While the highest erosion rates for ductile materials can be expected at the oblique impingement angles of about 20–30° because of micro-cutting and micro-ploughing mechanisms promoted by the tangential velocity component, brittle materials show maximum erosion when impacted normally because of crack propagation and chip formation (Finnie 1960; Bitter 1963). Previous studies on the tribology of AZ31 alloys concentrated mostly on sliding wear and protective coatings; it was shown that multilayer DLC/AlN/Al coatings can significantly improve wear and corrosion properties of AZ31 (Wu et al. 2010); it was also found that high strain rates can affect the friction and wear mechanisms of this alloy (He et al.2014). In the studies of polymer composites, the same dependence of erosion rate on impact parameters was observed (Suresh et al. 2018). However, there are no detailed experimental data on the influence of impingement angle on SPE for AZ31. Since magnesium alloys have the hexagonal close packed (HCP) crystal structure with a small number of active slip planes at ambient temperature, the determination of the type of their erosion response – ductile or semi-brittle – can only be done experimentally; this is why the current study was undertaken.

In the current study, the SPE behaviour of AZ31 magnesium alloy was investigated at six impingement angles between 15° and 90° using angular garnet particles. The damage from SPE was estimated by weight loss analysis and measured by optical microscopy and 3D optical profilometry in terms of roughness parameters defined according to ISO 25178 and ISO 4287 standards and volume of craters formed during erosion, with the purpose of determination of dominant erosion mechanisms and loading conditions.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Material

Test materials used were commercial AZ31 magnesium alloy provided by VİG Metal (Turkey). Composition and mechanical characteristics of the material as obtained from the manufacturer are provided in Table 1 and Table 2, respectively. Samples were cut to required dimensions for testing, cleaned, and weighed using an analytical balance (Shimadzu ATX-224, Japan) with an accuracy of 0.1 mg.

Table 1. Chemical composition of the AZ31 magnesium alloy (wt.%)

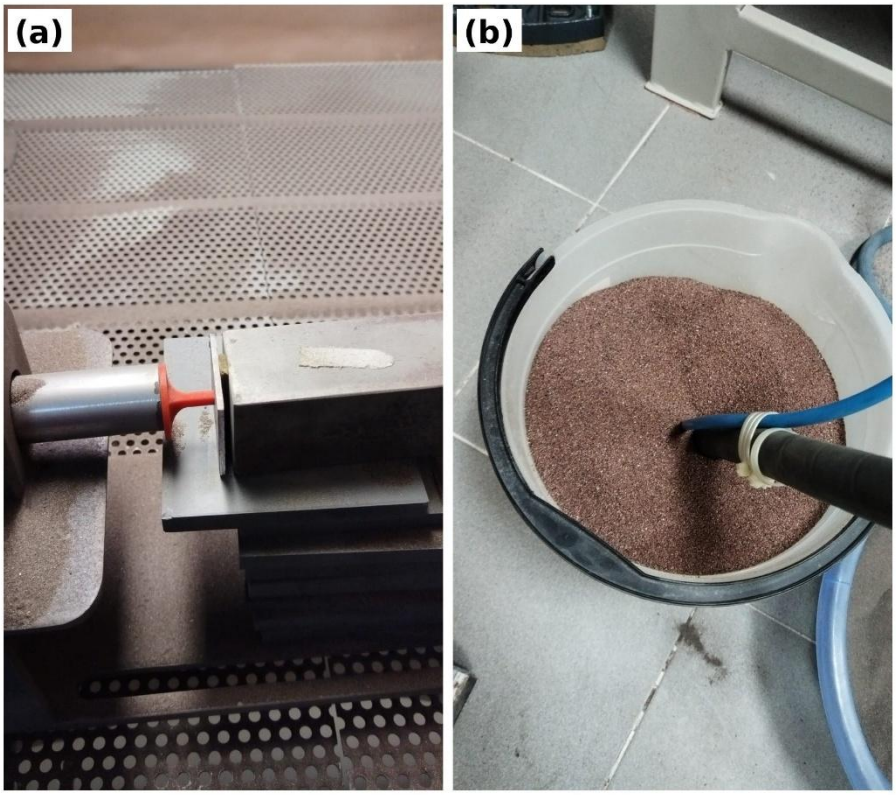
Al	Mn	Zn	Mg
3	0.2	1	Balance

Table 2. Mechanical properties of the AZ31 magnesium alloy

Property	Value
Yield strength (MPa)	220
Tensile strength (MPa)	290
Elongation (%)	15
Shear strength (MPa)	160

2.2. Solid particle erosion tests

Erosion tests were performed on a testing rig designed in conformity with ASTM G76-07 (ASTM G76-07 2007) at the Wear Laboratory of the Faculty of Aeronautics and Astronautics, Kocaeli University. The testing rig consists of the blasting chamber, the air compressor, the abrasive feeding hopper, the nozzle, and the specimen holder (see Fig. 1a). Angular garnet particles of 80-mesh size (see Fig. 1b), which are distinguished by naturally angular shape and very high hardness of about 7.5-8 Mohs scale, were used as erodent material, being representatives of hard mineral particles present in the environment of aerospace equipment operation. The pressure in the jet was kept constant at 2 bar with the help of the pressure regulator, while the stand-off distance was 20 mm and the impingement angles were changed in six steps of 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° using custom-made angled specimen holders. The tests were performed during 20 seconds at the room temperature, after that the specimens were cleaned from dust using compressed air and weighed again.



c

Fig. 1. (a) Nozzle–specimen fixture region of the solid particle erosion test rig and (b) 80 mesh garnet abrasive particles used in the tests

Table 3. Solid particle erosion test parameters

Parameter	**Value**
Erodent type	Garnet
Erodent size	80 mesh
Impingement angle	15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°
Jet pressure	2 bar
Test duration	20 s
Stand-off distance	20 mm
Nozzle diameter	5 mm
Temperature	Room temperature

2.3. Surface characterization

Erosion surfaces were investigated with an Evident-Olympus BX53 MRF scientific optical microscope at 5x magnification to capture images from the center of the erosion cavity and the junction area between the erosion cavity and the intact surface. The 3D topographies of surfaces were measured using a Nanovea PS50 noncontact optical profiler on 25 mm × 30 mm sample size in Mountains software. ISO 25178 areal height parameters were calculated for each surface. Three-line profiles (left, center, and right) were measured from each scanning on 30 mm, and ISO 4287 roughness parameters were calculated using 0.8 mm Gaussian filter. The erosion cavity for each sample was measured by the method of hole/peak volumetry within a certain polygon measurement area.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Mass loss

Mass losses following 20 s of erosion are reported in Fig. 2a. The mass loss reaches its maximum for 30° impingement angle (41.8 mg) and drops monotonically with increasing angle to reach the minimum value of 21.1 mg at 90°, whereas that at 15° angle (33.0 mg) is smaller than that at 30°. Such an angular dependence is typical for ductile erosion as defined by the micro-cutting theory developed by Finnie (1960). In case of oblique impingement, the presence of the tangential velocity component allows material removal via micro-cutting and micro-ploughing, whereas the normal incidence implies disappearance of the cutting component. It is evident that the erosion value at 90° equals about 50% of the maximum value, which means that the fatigue–repeated plastic deformation mechanism (platelet/lip fracture) plays an important role in this case, so AZ31 demonstrates the semi-ductile erosion properties associated with limited slip systems of its HCP structure. Low value of erosion at 15° angle is explained by the rebound of many particles hitting the target surface tangentially and passing its energy partially. The comparison between the volume of removed material calculated based on mass losses ($\Delta m/\rho$, ρ = 1.77 g/cm^3) and the volume of in-boundary crater measured by profilometry is shown in Fig. 2b.

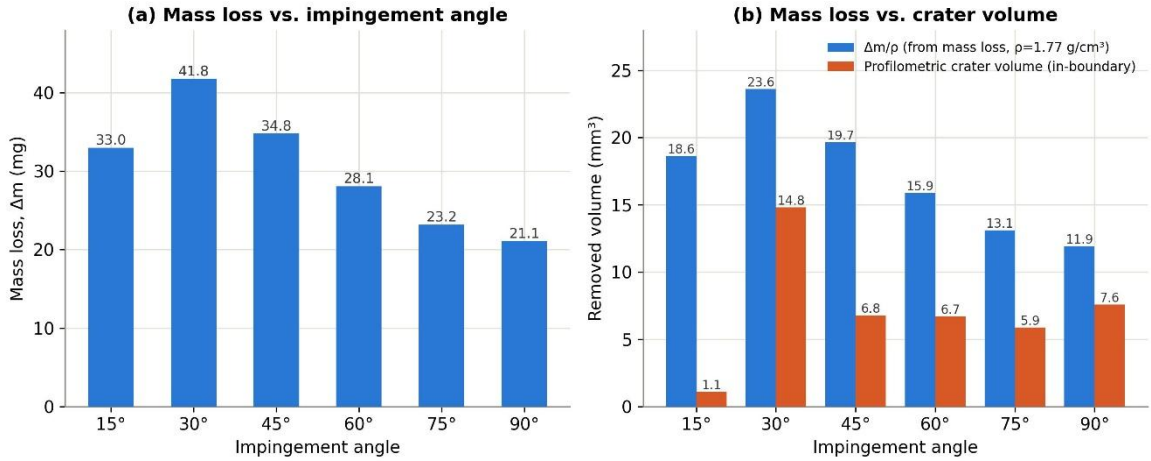


Fig. 2. (a) Mass loss as a function of impingement angle and (b) comparison of the equivalent volume loss (Δm/ρ) with the profilometric in-boundary crater volume

Table 4. Mass loss results of the solid particle erosion tests

Specimen	Angle	Initial mass (g)	Final mass (g)	Δm (mg)
6	15°	5.9885	5.9555	33.0
5	30°	5.6251	5.5833	41.8
4	45°	5.8125	5.7777	34.8
3	60°	5.8189	5.7908	28.1
2	75°	5.7303	5.7071	23.2
1	90°	5.8233	5.8022	21.1

3.2. Optical microscopy of eroded surfaces

The optical micrographs of the erosion scar centers are shown in Fig. 3. At small incidence angles (15-30°, Fig. 3a-b), the surfaces bear long, directional micro-cutting and micro-ploughing lines, along with large areas of bright, newly formed metal reflecting the high-efficiency abrasive-cutting regime of material removal. At medium incidence angles (45-60°, Fig. 3c-d), the cutting marks become shorter and less distinct, whereas impact craters, extrusion lips, and flattened platelets become prominent, indicating the combination of cutting and impact regimes. Particularly notable is the work-hardened fine layer created in the 60° center because of the forging effect of numerous impacts. At high incidence angles (75-90°, Fig. 3e-f), the cutting marks are almost absent, and the surface takes on a homogenous, dull, orange-peel texture made of superimposed micro-craters, where dark spots are considered as imbedded garnet particles. Material removal in this case proceeds through a series of steps, namely, flattening → work-hardening → lip fracturing, which is low-efficiency; the series corresponds to the observed decreasing mass removal rate with the increase of the incidence angle towards normal incidence.

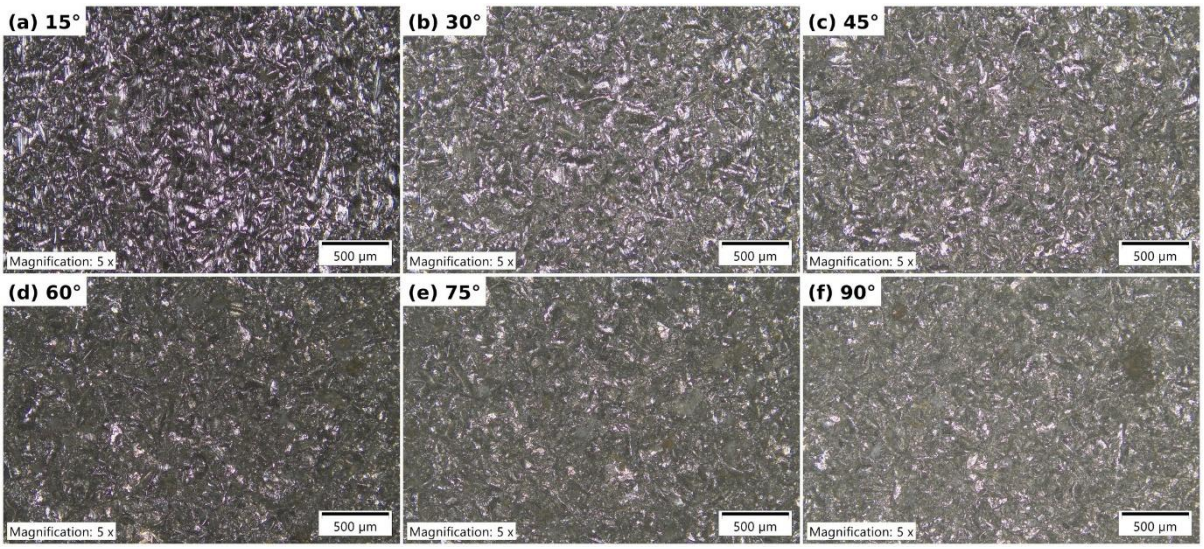


Fig. 3. Optical micrographs of the erosion scar centers of AZ31 eroded at (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 75° and (f) 90° (5×, scale bar 500 µm)

Fig. 4 presents micrographs of the transition zones between the erosion scar and the undisturbed surface. For low angles, the original surface markings created during machining/rolling are gradually overlain by random cutting marks and individual craters, thus confirming the extended, ellipsoidal shape of the inclined jet. The width of the transition zone decreases with the increase in the angle up to 90° when, apart from rebound of particles, the damage due to secondary impacts forms a ring around the crater. The described changes in the morphology of the scar boundary agree completely with the polygonal shapes of the measured boundaries (Section 3.3).

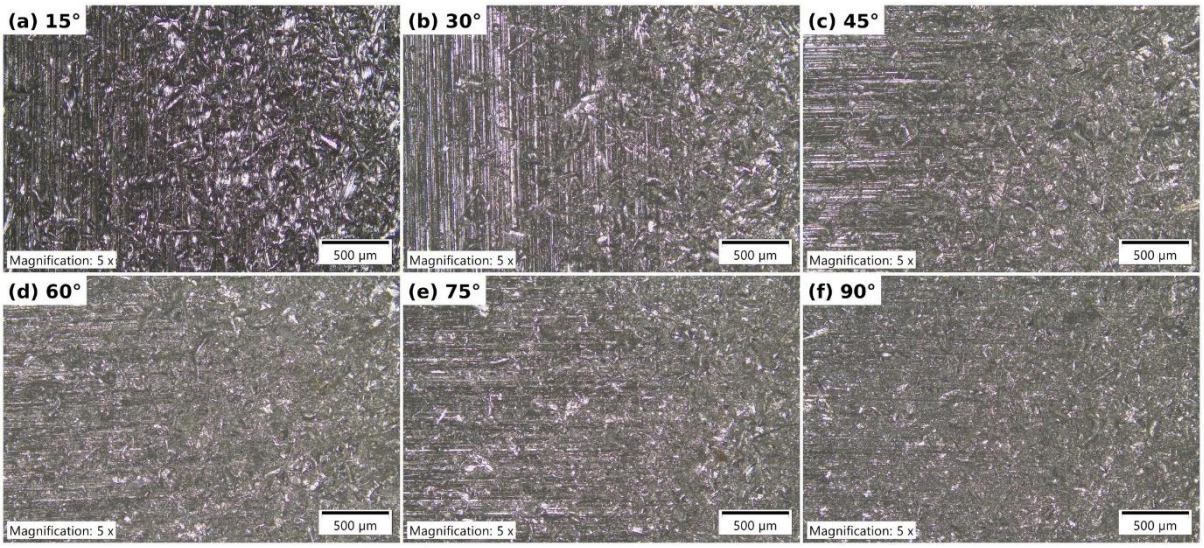


Fig. 4. Optical micrographs of the transition regions at (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 75° and (f) 90° (5×, scale bar 500 µm)

3.3. Profilometric characterization

The 3D plots of the eroded surface topographies are shown in Figure 5. With the incidence angle equal to 15°, there is no central well-defined crater, but the damage is manifested as a shallow scar spread across a large area. Starting from 30°, a definite pit starts to form and grows into an axially symmetric and deep pit up to 90°. The ISO 25178 areal height parameters are listed in Table 5 and plotted in Figure 6. Areal average roughness Sa shows a general decline from 48.9 µm to 22.5 µm between 15° and 90° (Figure 6a), whereby at lower incidence angles the damage effects the topography over almost the whole

scanning area while at higher angles it forms a narrow pit only. The local roughness at 75° (Sa = 45.4 µm) can be attributed to scratches found in the scanning of this angle and local pits. The skewness Ssk is negative for all the angles and becomes increasingly negative when the incidence angle increases (from −0.74 to −2.20, Figure 6b) which points to the presence of valleys where the erosion creates pits below the mean plane rather than peaks. The kurtosis Sku is greater than the Gaussian value 3 for all the angles (Figure 6c) which corresponds to the height distributions being spiky and non-Gaussian, with maxima at 15° (8.83 for scattered deep grooves) and 90° (8.20 for a narrow deep crater). The surface height variance exceedance Sv is larger than Sp for all angles (Figure 6d), proving the dominance of material removal, and Sz declines from 727 µm to 313 µm.

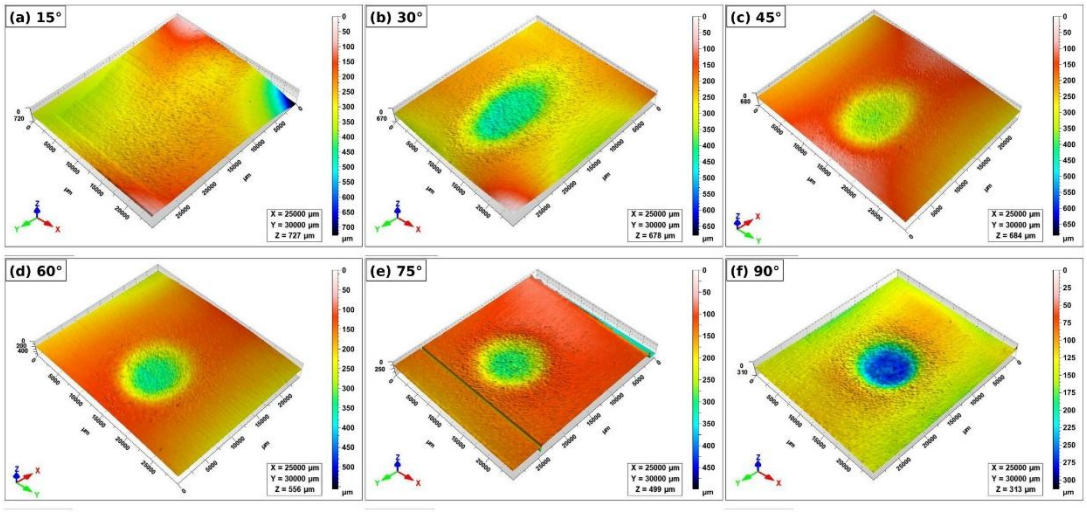


Fig. 5. Three-dimensional surface topographies of AZ31 eroded at (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 75° and (f) 90° (Nanovea PS50)

Table 5. ISO 25178 areal height parameters of the eroded surfaces

Angle	Sq (µm)	Ssk	Sku	Sp (µm)	Sv (µm)	Sz (µm)	Sa (µm)
15°	71.9	-1.07	8.83	269	458	727	48.9
30°	64.3	-0.741	4.20	269	409	678	47.7
45°	55.3	-0.834	3.75	198	486	684	42.9
60°	47.2	-1.50	5.46	182	374	556	35.0
75°	67.2	-2.06	6.76	148	351	499	45.4
90°	33.9	-2.20	8.20	140	173	313	22.5

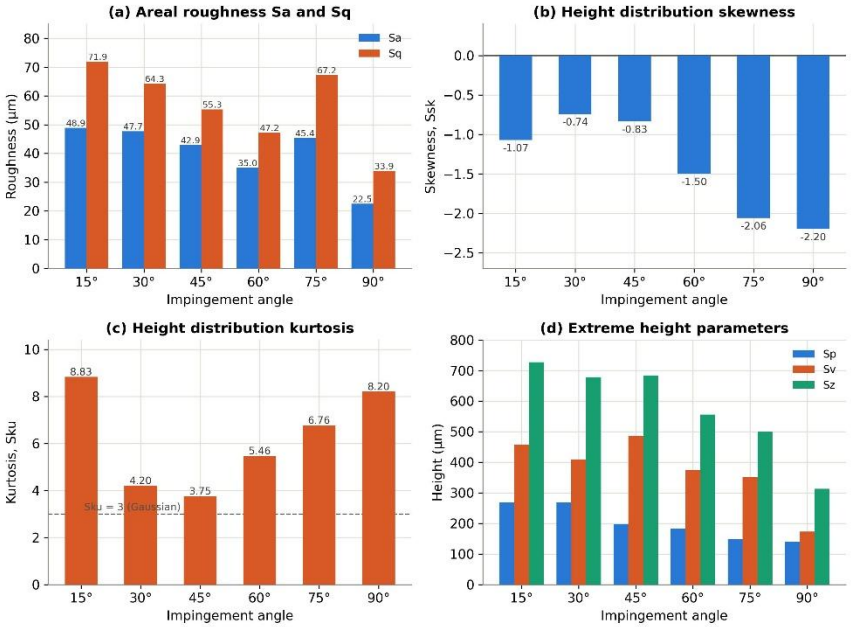


Fig. 6. Angle dependence of the ISO 25178 areal parameters: (a) Sa and Sq, (b) skewness Ssk, (c) kurtosis Sku, (d) extreme height parameters Sp, Sv and Sz.

Values of ISO 4287 line roughness according to Table 6 and Figure 7 are obtained from three profile data (left, middle, right) of each surface. Because the Gaussian filter of 0.8 mm size can exclude the contribution related to the form due to the crater, Ra in this case shows the micro-texture of the erosion scar. The value of Ra shows a bell curve dependence on the incidence angle; it increases from 3.59 ± 0.21 µm at an angle of 15° to a maximum of 5.21 ± 0.16 µm at an angle of 45° and decreases to 3.32 ± 0.14 µm at 90°. This result agrees with microscopy observations; at an approximate angle of 45°, because of the superimposed cutting grooves and impact craters, the micro-texture roughness becomes largest while at angles of 15° and 90° because of the shallow and regular grooves and forging / compaction from repeated normal impacts respectively, smoothest micro-surface appears.

Table 6. ISO 4287 line roughness Ra from three measurement lines and mean ± standard deviation (n = 3)

Angle	Ra – Left (µm)	Ra – Center (µm)	Ra – Right (µm)	Mean ± SD (µm)
15°	3.34	3.73	3.69	3.59 ± 0.21
30°	4.61	4.75	4.84	4.73 ± 0.12
45°	5.36	5.04	5.24	5.21 ± 0.16
60°	4.48	4.48	4.76	4.57 ± 0.16
75°	4.75	4.45	4.18	4.46 ± 0.29
90°	3.27	3.48	3.22	3.32 ± 0.14

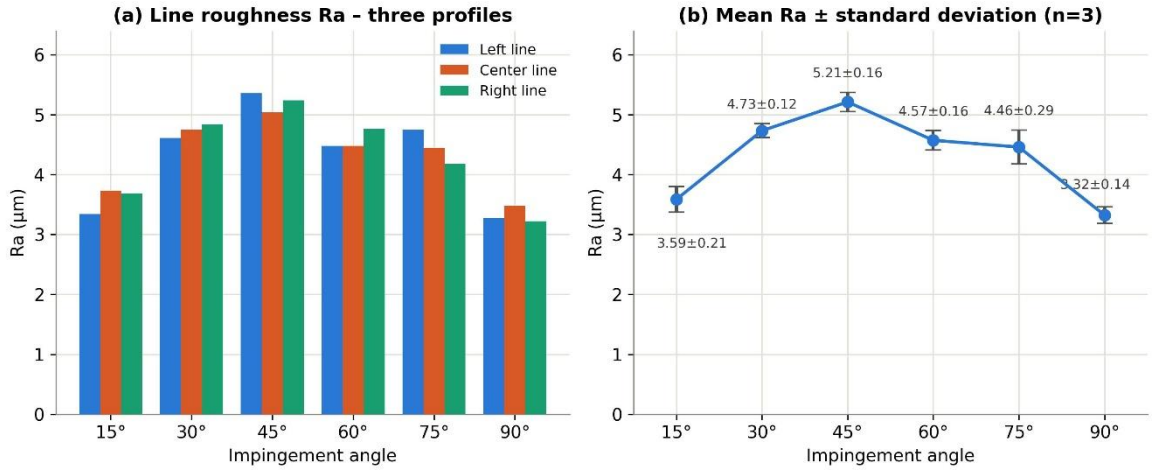


Fig. 7. (a) Line roughness Ra of the three measurement lines and (b) mean Ra ± standard deviation as a function of impingement angle (n = 3)

The polygonal boundary contours used in crater volume measurements are shown in Figure 8, with the calculated crater dimensions listed in Table 7 and presented graphically in Figure 9. The shape of the boundary represents the geometrical effect of the impinging angle on the damage: strongly elongated and narrow elliptical crater footprint for 15°, elliptical crater for 30°, gradually narrowed ovals for 45°-75°, and circular deep crater at 90°. The amount of the removed material reaches a peak value of 14.8 mm^3 at 30° angle, thereby proving the gravimetric maximum using another method of analysis and confirming the dominance of ductility in the process. The depth of the crater is maximal at 45° (423 µm), then falls to 200 µm at 90°, while the mean crater depth is relatively constant at 75.8-92.1 µm in the 30°-90° range. For the 15° angle, the minimum in-boundary crater volume (1.09 mm^3) and the crater depth (72 µm) correspond to the minimal degree of material removal in the form of a shallow depression with a wide footprint. As expected, the comparison in Figure 2b reveals that $\Delta m/\rho$ is larger than the in-boundary crater volume at all angles; furthermore, the same trend appears between 30° and 90°: the polygon makes up only 6% of the loss at 15°, reaching 40-60% at higher angles with the more localized damage.

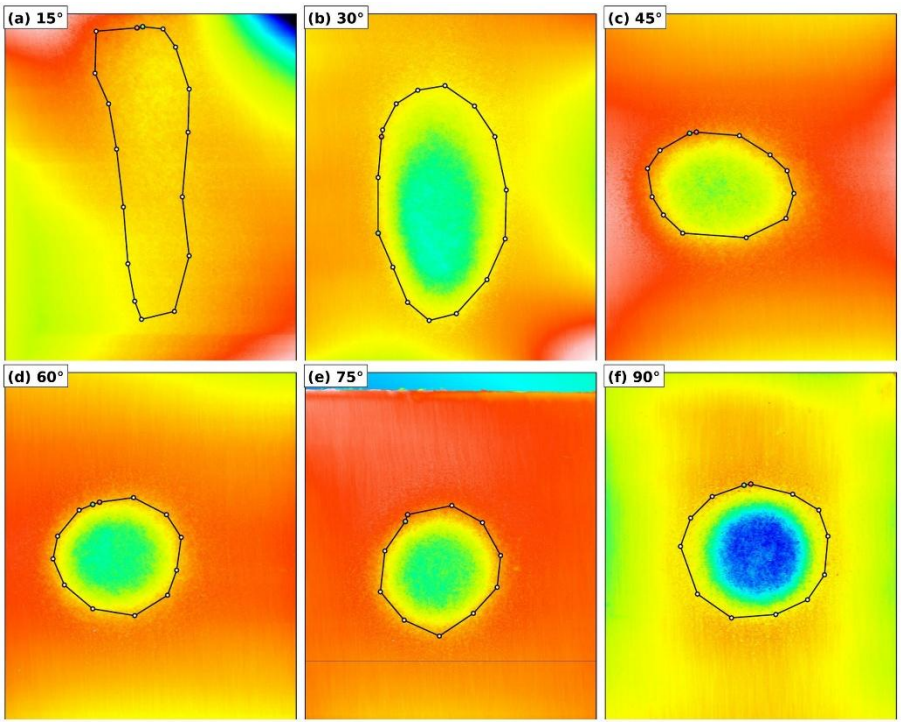


Fig. 8. Polygonal measurement boundaries used in the crater (hole) analysis: (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 75°, (f) 90°

Table 7. Crater (hole) analysis results computed within the polygonal measurement boundaries

Angle	Projected area (mm²)	Volume (mm³)	Max. depth (µm)	Mean depth (µm)
15°	83.3	1.09	72.0	13.1
30°	160	14.8	401	92.1
45°	82.9	6.78	423	81.7
60°	78.7	6.71	337	85.3
75°	76.5	5.87	288	76.8
90°	100	7.59	200	75.8

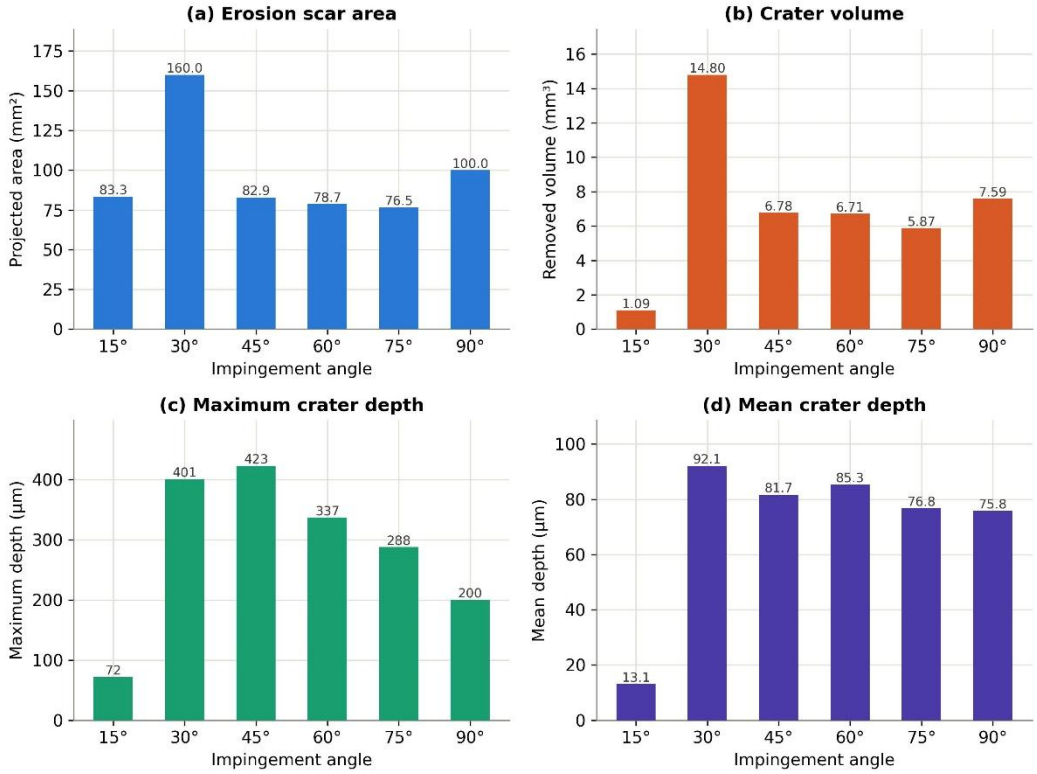


Fig. 9. Angle dependence of the crater metrics: (a) projected scar area, (b) crater volume, (c) maximum crater depth, (d) mean crater depth

4. Conclusions

The solid particle erosion response of AZ31 magnesium alloy was analysed with six different impingement angles by using 80 mesh garnet particles at 2 bar of pressure for 20 s. The damage evaluation involved mass loss tests, optical microscopy analysis, and 3D optical profilometry. The main findings can be summarized as follows:

(1) Angle dependency and ductile nature of the AZ31 erosion was found out in the current work since the maximum value of the mass loss occurred at 30° (41.8 mg) and the minimum one at 90° (21.1 mg) which is accordance with Finnie's micro-cutting theory. The normal to oblique erosion ratio of 0.50

signifies an extra contribution of the deformation-fatigue mechanisms caused by the few slip systems of HCP structure, thus making AZ31 alloy semi-ductile.

(2) In terms of optical microscopy analysis, there is a mechanism transition from the directional micro-cutting and micro-ploughing (15-30°), through the cutting-plus-impact (45-60°) to the forging-type craters with embedded garnet particles (75-90°) with respect to the increasing impingement angle.

(3) From the profilometric study, there is a valley-dominated (Ssk<0) and non-Gaussian (Sku>3) surface topography in all angles; the arithmetic average of the surface roughness (Sa) decreased from 48.9 μm to 22.5 μm due to the localization of the damage. The micro-texture roughness (Ra) exhibited a bell shape behaviour with the peak value at 45° (5.21±0.16 μm), which had high reproducibility on the three measurement lines (coefficient of variation≤6.5%).

(4) Crater volume measurements in the form of polygons revealed the geometrical change of the erosion scar from the elongated ellipse form at 15° to the circular and deep craters at 90°; the maximum removed volume is found at 30° (14.8 mm^3) and the maximum crater depth is at 45° (423 μm). There is good correlation between gravimetric and profilometric results.

(5) In case of aerospace industry, oblique impact of the particles within the range of 20-45° is the most critical erosion scenario for AZ31 components. As a result, the areas which are subjected to low angle sand impingement should be coated and modified surfaces should be tested under oblique erosion conditions.

Acknowledgment

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the 2209-A University Students Research Projects Support Program (TUBITAK PROJECT NO: 1919B012402075). The authors gratefully acknowledge the use of the Wear Laboratory facilities at the Faculty of Aviation and Space Sciences, Kocaeli University.

References

ASTM International. (2007). Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets (Standard No. ASTM G76-07).

Bitter, J. G. A. (1963). A study of erosion phenomena part I. Wear, 6(1), 5-21.

doi.org/10.1016/0043 1648(63)90003-6

Finnie, I. (1960). Erosion of surfaces by solid particles. Wear, 3(2), 87-103.

https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7

He, H., Zhang, L., & Yang, G. M. (2014). The effect of high-strain rate on friction and wear behaviors of AZ31 magnesium alloy. Advanced Materials Research, 1081, 215–219. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1081.215

Suresh, G., Vasu, V., & Raghavendra, G. (2018). Optimization of input parameters on erosion wear rate of PTFE/HNT filled nanocomposites. Materials Today: Proceedings, 5(1), 1462–1469. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.234

Wu, G., Dai, W., Zheng, H., & Wang, A. (2010). Improving wear resistance and corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy by DLC/AlN/Al coating. Surface and Coatings Technology, 205(7), 2067–2073. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.103

FIBER LAZERLE FARKLI GEOMETRILERDE YÜZEY DOKULANDIRILMIŞ AA6061-T6 ALÜMINYUM ALAŞIMININ KATI PARTIKÜL EROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESI

Özkan YILMAZ

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe & Powerplant Maintenance, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0009-0003-2217-2903

Cemile Nur ÖZDEMIR

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe & Powerplant Maintenance, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0009-0008-9572-3522

Mustafa Özgür BORA

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe & Powerplant Maintenance, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0000-0003-0921-418X

Sinan FİDAN

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe & Powerplant Maintenance, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0000-0003-4385-4981

Satılmış ÜRGÜN

Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aviation Electrics and Electronics, Kocaeli, Turkey

ORCID: 0000-0003-3889-6909

Mehmet İskender ÖZSOY

Sakarya University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Sakarya, Turkey

ORCID: 0000-0001-6777-4818

ÖZET

Bu çalışmada, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan AA6061-T6 alüminyum alaşımı yüzeylerinde fiber lazerle dört farklı geometride (daire, altıgen, kare ve eşkenar dörtgen) yüzey dokusu oluşturulmuş ve doku geometrisinin katı partikül erozyon davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yüzey dokulandırma işlemleri, 100 W gücündeki fiber lazer sisteminde 50 W sabit lazer gücü ve üç farklı tarama hızı (250, 500 ve 750 mm/s) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katı partikül erozyon testleri, ASTM G76 standardına uygun olarak garnet aşındırıcı ile 2 bar püskürtme basıncında, 30° ve 90° çarpma açılarında yürütülmüştür. Ayrıca erozyon sonrası hasar izleri, ölçek kalibrasyonlu makro görüntü analizi ile ortak yönelim ve ortak büyütmede karşılaştırılmış, hasar izi alanları eliptik yaklaşımla hesaplanmıştır. Sonuçlar, 30° çarpma açısında tüm dokulu yüzeylerin işlenmemiş referans

numuneye kıyasla daha düşük kütle kaybı sergilediğini göstermiştir; en yüksek iyileşme (%16,2) 500 mm/s tarama hızında daire ve eşkenar dörtgen geometrilerinde elde edilmiştir. Altıgen geometri, her iki çarpma açısında da en düşük ortalama kütle kaybını vererek en kararlı davranışı sergilemiştir. 90° çarpma açısında doku geometrisinin etkisi sınırlı kalmış, en iyi sonuç altıgen geometri ve 750 mm/s koşulunda (%4,7 iyileşme) gözlemlenmiştir. Hasar izi alan analizi, dokulu yüzeylerde çarpma enerjisinin daha geniş bir alana yayıldığını ve buna karşın malzeme kaybının azaldığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: AA6061-T6 alüminyum alaşımı, fiber lazer yüzey dokulandırma, doku geometrisi, katı partikül erozyonu, hasar izi analizi

INVESTIGATION OF SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIOR OF AA6061-T6 ALUMINUM ALLOY WITH DIFFERENT SURFACE TEXTURES USING FIBER LASER

ABSTRACT

In this study, surface textures with four different geometries (circle, hexagon, square, and rhombus) were produced by fiber laser on AA6061-T6 aluminum alloy surfaces, which are widely used in the aerospace industry, and the effect of texture geometry on solid particle erosion behavior was investigated. Surface texturing was performed using a 100 W fiber laser system at a constant laser power of 50 W and three different scanning speeds (250, 500, and 750 mm/s). Solid particle erosion tests were conducted in accordance with the ASTM G76 standard using garnet abrasive at a blasting pressure of 2 bar and impingement angles of 30° and 90°. In addition, post-erosion damage scars were compared at a common orientation and magnification through scale-calibrated macro image analysis, and scar areas were calculated using an elliptical approximation. The results showed that, at the 30° impingement angle, all textured surfaces exhibited lower mass loss than the untreated reference specimen; the highest improvement (16.2%) was obtained for the circle and rhombus geometries at a scanning speed of 500 mm/s. The hexagonal geometry exhibited the most stable behavior, yielding the lowest average mass loss at both impingement angles. At the 90° impingement angle, the effect of texture geometry remained limited, and the best result was observed for the hexagonal geometry at 750 mm/s (4.7% improvement). Damage scar area analysis revealed that the impact energy was distributed over a larger area on the textured surfaces, while the material loss decreased.

Keywords: AA6061-T6 aluminum alloy, fiber laser surface texturing, texture geometry, solid particle erosion, damage scar analysis

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları; düşük yoğunluk, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve iyi korozyon direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv ve savunma sanayisi başta olmak üzere pek çok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Saklakoglu ve ark 2014). Bu alaşımlar arasında AA6061-T6; yüksek çekme mukavemeti, iyi işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik özellikleriyle öne çıkmakta olup uçak gövde panelleri, kanat yapıları ve iniş takımı bileşenleri gibi kritik parçalarda tercih edilmektedir. Ancak AA6061-T6 alaşımının yüzey aşınma direnci bazı uygulamalarda yetersiz kalabilmekte; özellikle çöl kumu, volkanik kül ve pist kaynaklı partiküllere maruz kalan yüzeylerde katı partikül erozyonu önemli malzeme kayıplarına yol açarak bileşenlerin kullanım ömrünü olumsuz etkileyebilmektedir (Acar ve ark. 2017).

Lazerle yüzey dokulandırma (laser surface texturing – LST), malzeme yüzeylerinde kontrollü mikro ve makro ölçekli dokular oluşturarak yüzey özelliklerini iyileştirmeye yönelik ileri bir yüzey mühendisliği tekniğidir (Etsion ve ark. 2015). Fiber lazer sistemleri; yüksek ışın kalitesi, hassas kontrol imkânı ve yüksek tekrarlanabilirlik gibi avantajlarıyla geleneksel yüzey işleme yöntemlerine göre üstün performans sunmaktadır. Lazerle gerçekleştirilen yüzey modifikasyonlarının malzemelerin aşınma, sürtünme ve korozyon davranışlarını önemli ölçüde iyileştirebildiği farklı alaşım sistemlerinde

gösterilmiştir (Mondal ve ark. 2008; Man ve ark. 2007). Ayrıca lazer dokulandırma, yüzeylerin ıslanabilirlik ve kendi kendini temizleme gibi fonksiyonel özelliklerinin kontrolünde de etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Ijaola ve ark. 2020; Liu ve ark. 2022).

Yüzey dokusunun geometrisi, dokulandırılmış yüzeylerin tribolojik performansını belirleyen en kritik parametrelerden biridir. Gachot ve diğ. (2017), sürtünme ve aşınma iyileştirmesine yönelik yüzey dokulandırma çalışmalarını kapsamlı olarak değerlendirdikleri derlemede; doku şekli, yoğunluğu ve derinliğinin temas mekaniği üzerinde belirleyici rol oynadığını vurgulamıştır. Segu ve Hwang (2015), daire, kare ve üçgen gibi farklı şekillerin bir arada kullanıldığı çok-şekilli dokulu yüzeylerin pim-disk deneylerinde sürtünme davranışını iyileştirdiğini raporlamıştır. Zhang ve diğ. (2026), lazerle dokulandırılmış 1045 çeliğinde çukurcuk (dimple) şeklinin tribolojik ve yüzey özellikleri üzerinde belirgin etkisi olduğunu göstermiştir. Farhan ve diğ. (2025) ise Al 6061 yüzeyinde lazerle oluşturulan üçgen geometrik dokuların üretilebilirliğini ve yüzey karakteristiklerini incelemiştir. Bu çalışmalar, doku geometrisinin kayma temaslı aşınma üzerindeki etkisini ortaya koymakla birlikte, geometrinin katı partikül erozyonu altındaki rolü literatürde büyük ölçüde açık bir konu olarak kalmaktadır.

Katı partikül erozyonu, sert partiküllerin bir yüzeye belirli hız ve açıyla çarpması sonucu meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Erozyon davranışını etkileyen başlıca faktörler arasında çarpma açısı, partikül hızı, aşındırıcı türü ve hedef malzemenin yüzey özellikleri yer almaktadır. Oka ve diğ. (2025), sünek metallerde erozyon hasarının çarpma parametrelerine bağlı olarak tahmin edilmesine yönelik geliştirdikleri bağıntıda, maksimum erozyonun düşük çarpma açılarında meydana geldiğini göstermiştir. Acar ve diğ. (2017), AA6061-T6 alaşımının farklı çarpma açısı ve hızlardaki erozyon davranışını inceleyerek düşük açılarda kesme kuvvetlerinin baskın olduğunu ve daha yüksek aşınma oranları elde edildiğini raporlamıştır. Ally (2010), AA 6061, Ti-6Al-4V ve 316 paslanmaz çelik malzemelerin erozyon davranışlarını karşılaştırdığı çalışmasında kütlesel erozyon miktarının en az AA6061 alüminyum alaşımında olduğunu tespit etmiştir. Yıldıran (2013), çarpan parçacık hızının kritik bir değerin üzerine çıkması durumunda yüzeyde plastik deformasyonların oluştuğunu gözlemlemiş; Avcu (2013) ise farklı basınç ve çarpma açılarında yürüttüğü deneylerle erozyon parametrelerinin yüzey hasarı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.

Araştırma grubumuz tarafından yürütülen önceki çalışmada, aynı deneysel altyapı kullanılarak fiber lazer ölçekleme faktörünün (scale factor) AA6061-T6 alaşımının erozyon direnci üzerindeki etkisi incelenmiş ve lazerle dokulandırmanın özellikle 30° çarpma açısında erozyon direncini önemli ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir. Ancak, farklı doku geometrilerinin katı partikül erozyonu altındaki karşılaştırmalı performansına ilişkin sistematik bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu çalışmada; AA6061-T6 alüminyum alaşımı yüzeylerinde fiber lazer ile daire, altıgen, kare ve eşkenar dörtgen olmak üzere dört farklı geometride yüzey dokusu oluşturulmuş ve bu geometrilerin üç farklı tarama hızındaki (250, 500, 750 mm/s) kombinasyonlarının katı partikül erozyon davranışı, ASTM G76 standardına uygun testler ve ölçek kalibrasyonlu hasar izi görüntü analizi ile değerlendirilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda substrat malzeme olarak 4 mm kalınlığında AA6061-T6 alüminyum alaşımı levha kullanılmıştır. Levhalar Seykoç A.Ş. firmasından temin edilmiş olup, sanayi tipi lazer kesim cihazı ile 50 mm × 50 mm × 4 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. AA6061-T6 alaşımı; yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci ve üstün işlenebilirlik özellikleriyle havacılık sektöründe yaygın olarak tercih edilen bir yapısal malzemedir.

2.2. Fiber Lazerle Yüzey Dokulandırma

Yüzey dokulandırma işlemleri, Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Aşınma Laboratuvarı bünyesinde bulunan 100 W gücüne sahip fiber lazer sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmamızdan farklı olarak bu çalışmada lazer gücü 50 W değerinde sabit

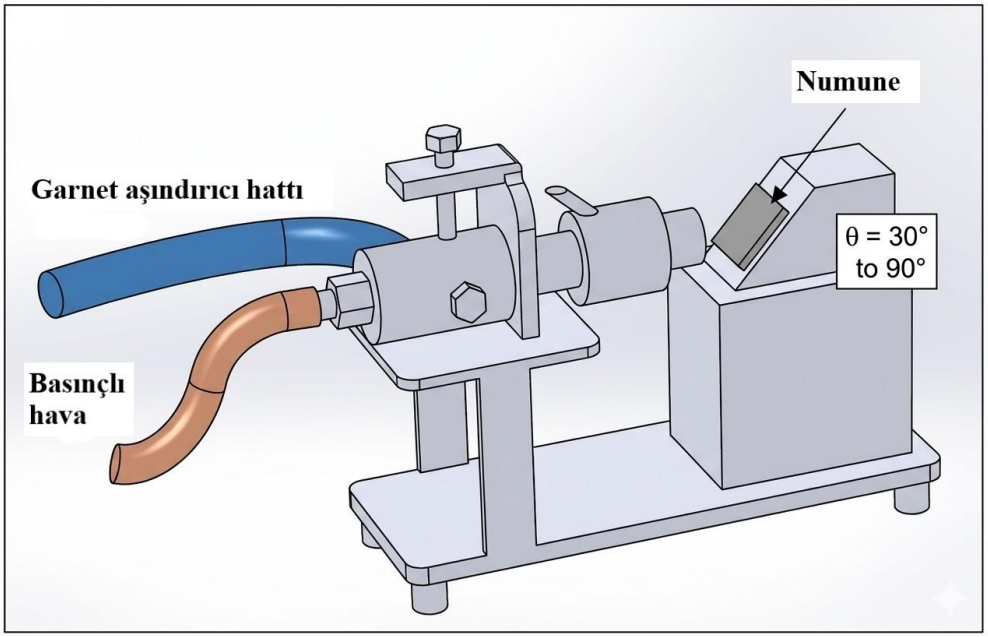
tutulmuş ve deneysel tasarımda iki ana faktör ele alınmıştır: yüzey dokusu geometrisi ve tarama hızı. Doku geometrisi daire, altıgen, kare ve eşkenar dörtgen olmak üzere dört farklı seviyede; tarama hızı ise 250, 500 ve 750 mm/s olmak üzere üç seviyede belirlenmiştir. Bu parametrelerin kombinasyonuyla her çarpma açısı için 12 farklı lazer işleme koşulu oluşturulmuştur. Tablo 1'de yüzey dokulandırma parametreleri verilmiştir.

Tablo 1. Fiber lazer yüzey dokulandırma parametreleri

No	Doku Geometrisi	Güç (W)	Tarama Hızı (mm/s)
1	Daire	50	250
2	Daire	50	500
3	Daire	50	750
4	Altıgen	50	250
5	Altıgen	50	500
6	Altıgen	50	750
7	Kare	50	250
8	Kare	50	500
9	Kare	50	750
10	Eşkenar Dörtgen	50	250
11	Eşkenar Dörtgen	50	500
12	Eşkenar Dörtgen	50	750
Ref	-	-	-

2.3. Katı Partikül Erozyon Testleri

Katı partikül erozyon testleri, ASTM G76 standardına uygun olarak Kocaeli Üniversitesi Aşınma Laboratuvarı'nda bulunan özel olarak tasarlanmış erozyon test kabininde gerçekleştirilmiştir. Testlerde aşındırıcı olarak 80 mesh (180–400 μm) boyut aralığında garnet partikülleri kullanılmıştır. Sıkıştırılmış hava ile hızlandırılan aşındırıcı partiküller, 5 mm çapında bir nozul aracılığıyla numune yüzeyine yönlendirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Düzenekte basınçlı hava hattı ve garnet aşındırıcı hattı karışma odasında birleşerek nozuldan numune yüzeyine yönlendirilmektedir. Numune tutucu, çarpma açısının (θ) 30° ile 90° arasında ayarlanmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 1. Katı partikül erozyon test düzeneğinin şematik görünümü

Tablo 2. Katı partikül erozyon test parametreleri

Parametre	**Değer**
Aşındırıcı malzeme	Garnet (80 mesh, 180–400 μm)
Püskürtme basıncı	2 bar
Çarpma açıları	30°, 90°
Nozul çapı	5 mm
Nozul-numune mesafesi (standoff)	20 mm
Test süresi	20 s
Kütle akış hızı	22,5 g/s
Çarpma hızı	58 m/s
Standart	ASTM G76

Erozyon test parametreleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Erozyon testleri öncesinde ve sonrasında numuneler, 0,1 mg hassasiyetinde yüksek hassasiyetli bir terazi (Shimadzu ATX-224, Kyoto, Japonya) ile tartılmıştır. Erozyon oranı, hedef malzemenin test sırasındaki kütle kaybının (Δm) deneyde kullanılan toplam aşındırıcı garnet partikül kütlesine (M) bölünmesiyle hesaplanmıştır. Erozyon oranı hesabı Denklem (1)'de ifade edilmiştir.

$$\text{Erozyon Oranı} = \Delta m / M \qquad (1)$$

Burada Δm, hedef malzemenin kütle kaybını (g); M ise test süresi boyunca kullanılan toplam aşındırıcı partikül kütlesini (g) temsil etmektedir. Garnet aşındırıcı akışı 22,5 g/s kütle akış hızında ve 58 m/s çarpma hızında çalıştırılmıştır. 20 saniye test süresi boyunca toplam kullanılan aşındırıcı kütlesi M = 22,5 × 20 = 450 g olarak hesaplanmıştır. Lazerle işlenmiş 12 farklı parametre kombinasyonundaki numuneler ile işlenmemiş referans numuneler, hem 30° hem de 90° çarpma açılarında teste tabi tutulmuştur.

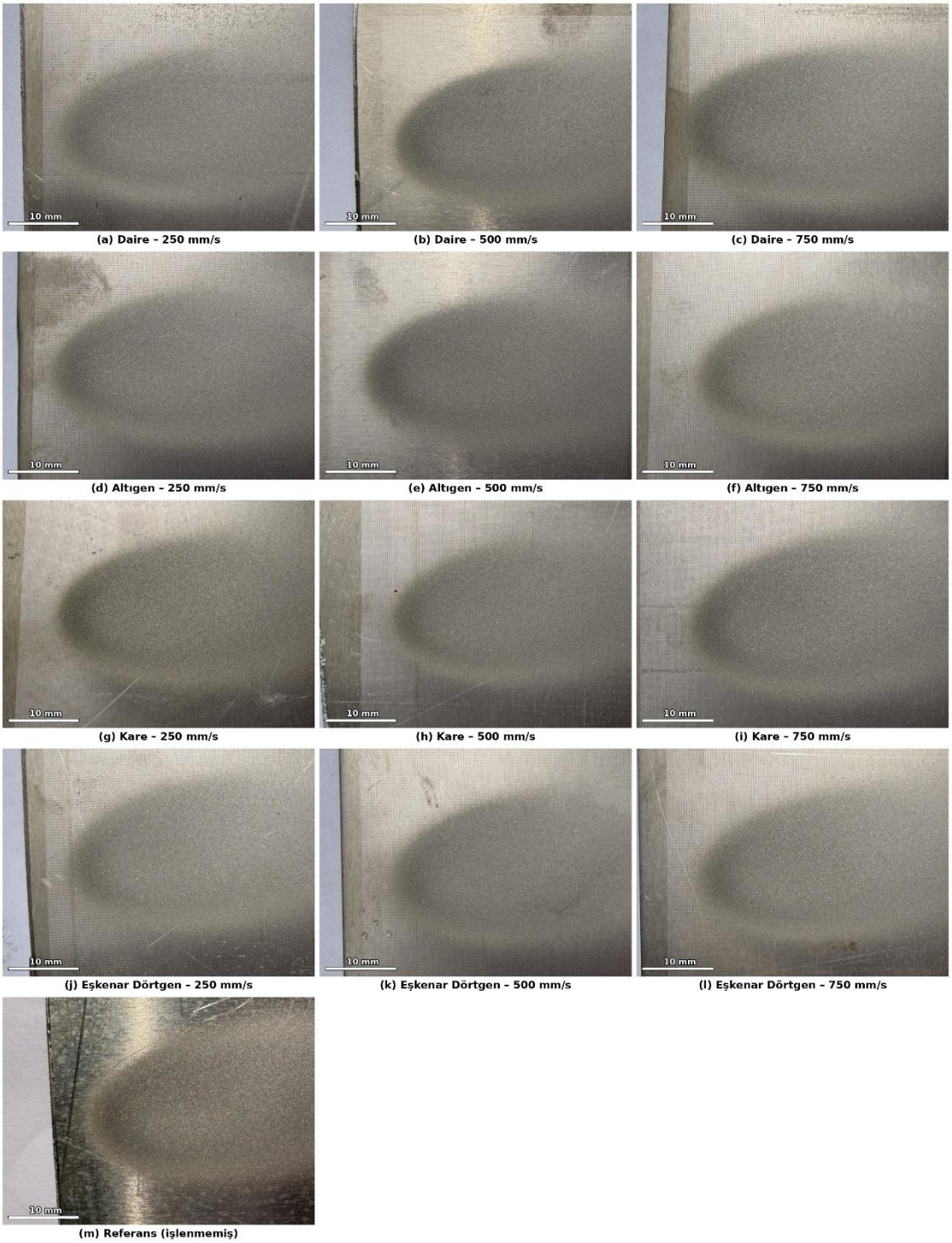
2.4. Hasar İzi Görüntü Analizi

Erozyon testleri sonrasında numune yüzeylerinde oluşan hasar izleri, yüksek çözünürlüklü makro görüntüleme ile belgelenmiş ve sayısal görüntü işleme teknikleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Her görüntüde 50 mm plaka kenar uzunluğu referans alınarak piksel/milimetre ölçek kalibrasyonu yapılmış (görüntüleme mesafesine bağlı olarak 21–28 piksel/mm) ve tüm görüntüler 20 piksel/mm ortak ölçeğe normalize edilmiştir. Karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla tüm hasar izleri ortak yönelime getirilmiş; 30° numunelerinde damla (teardrop) formundaki izin dar ucu solda ve partikül akış yönü soldan sağa olacak şekilde hizalama yapılmıştır. Tüm hasar bölgelerini kapsayan ortak kesit pencereleri 30° için 44 × 32 mm, 90° için 28 × 28 mm olarak belirlenmiştir. Hasar izi boyutları iki seviyede değerlendirilmiştir: (i) plastik deformasyonun yoğunlaştığı belirgin koyu bölge (çekirdek iz) ve (ii) yüzey parlaklığının ve lazer dokusunun kaybolduğu toplam mat bölge. Her iki bölgenin alanları, izlerin eksenel boyutları (L: akış yönü uzunluğu, W: enine genişlik) üzerinden eliptik yaklaşımla ($A = \pi/4 \cdot L \cdot W$) hesaplanmıştır. Difüz iz sınırları nedeniyle alan belirsizliği yaklaşık ±%10 düzeyindedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Erozyon Hasar İzlerinin Morfolojisi

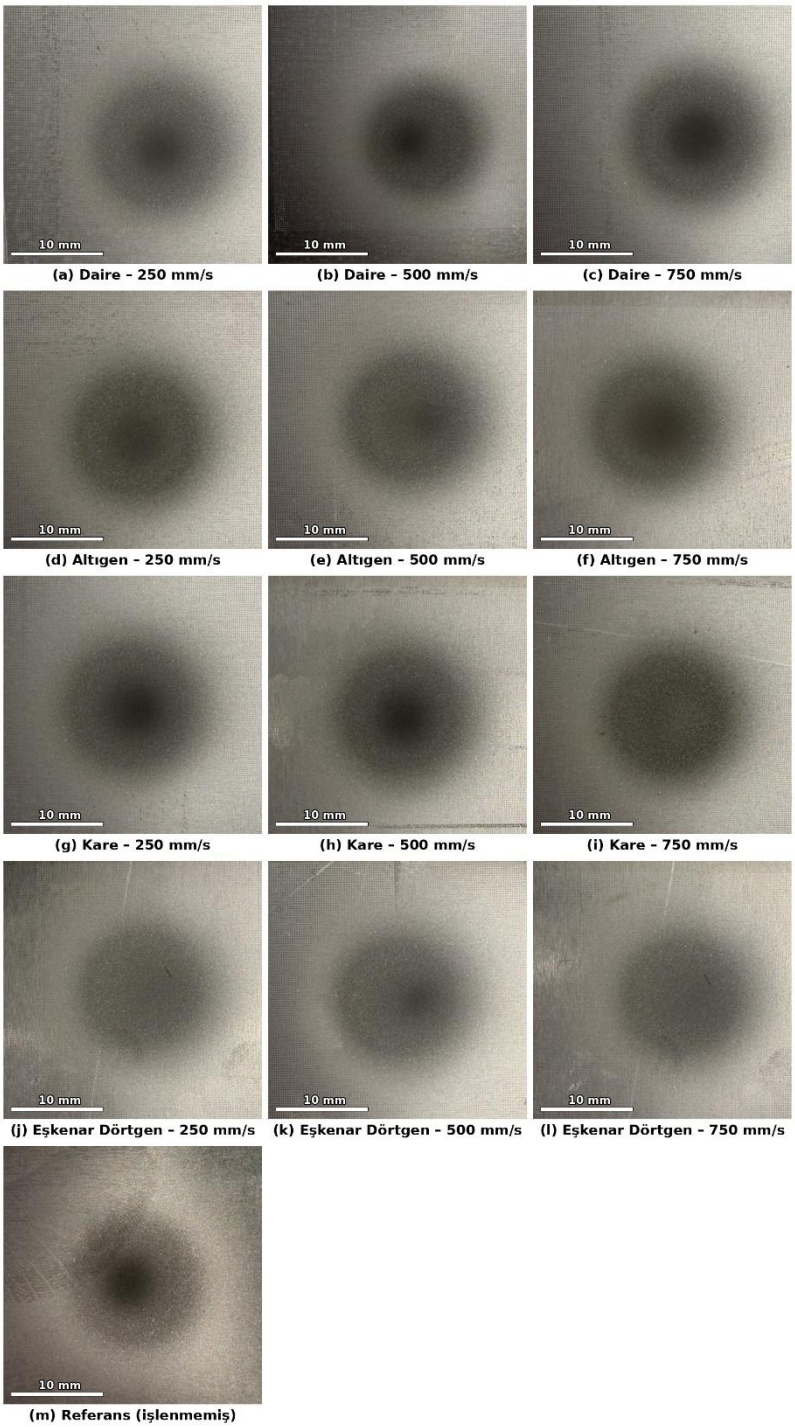
Şekil 2'de 30° çarpma açısında test edilen tüm numunelerin, Şekil 3'te ise 90° çarpma açısında test edilen tüm numunelerin erozyon sonrası hasar izleri; ortak yönelim, ortak ölçek ve ortak kesit boyutlarında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 30° çarpma açısında tüm numunelerde sünek malzeme erozyonuna özgü, akış yönünde uzamış damla (teardrop) formunda hasar izleri oluşmuştur. İzin dar ucu, partikül jetinin yüzeye ilk temas ettiği ve enerji yoğunluğunun en yüksek olduğu bölgeye karşılık gelmekte; akış yönünde ilerledikçe iz genişleyerek ve yüzeysel karaktere bürünerek sönümlenmektedir. Koyu görünümlü çekirdek bölge, mikro-kesme ve mikro-sürme mekanizmalarının yoğunlaştığı ana malzeme kaldırma bölgesini temsil etmektedir. 90° çarpma açısında ise izler, jet eksenine göre yaklaşık eksenel simetrik dairesel formda gelişmiş; merkezde belirgin koyu bir krater bölgesi ve çevresinde partiküllerin saçılmasıyla oluşan mat bir hal gözlemlenmiştir.



Şekil 2. 30° çarpma açısında erozyon hasar izlerinin karşılaştırması (44 × 32 mm ortak kesit, akış yönü soldan sağa): (a-c) Daire, (d-f) Altıgen, (g-i) Kare, (j-l) Eşkenar Dörtgen — 250/500/750 mm/s; (m) Referans

Şekil 2 incelendiğinde, tüm dokulu numunelerde hasar izlerinin genel formunun benzer olduğu; ancak çekirdek bölgenin koyuluğunun ve mat bölgenin yayılımının geometriye ve tarama hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Referans numunede (Şekil 2m) çekirdek iz görece daha kompakt olmasına karşın, kütle kaybının en yüksek bu numunede ölçülmesi, hasarın dar bir bölgede derinlemesine yoğunlaştığına işaret etmektedir. Dokulu yüzeylerde ise lazer dokusunun oluşturduğu periyodik girinti-

çıkıntılar, partikül çarpma enerjisini daha geniş bir alana dağıtarak yerel penetrasyon derinliğini sınırlandırmaktadır.



Şekil 3. 90° çarpma açısında erozyon hasar izlerinin karşılaştırması (28 × 28 mm ortak kesit): (a-c) Daire, (d-f) Altıgen, (g-i) Kare, (j-l) Eşkenar Dörtgen — 250/500/750 mm/s; (m) Referans

Şekil 3'te görüldüğü üzere, 90° çarpma açısında dokulu numunelerin tamamında koyu krater bölgesi ve çevresindeki mat hale belirgin şekilde gelişmişken, referans numunede (Şekil 3m) görünür iz çok daha küçük kalmıştır. Bu durum, dokulu yüzeylerde lazer doku deseninin partikül çarpmalarıyla silinmesinin izi görünür kıldığını; buna karşın parlak referans yüzeyde plastik deformasyonun daha dar bir bölgede yoğunlaştığını göstermektedir. Kütle kayıplarının benzer düzeyde olması, görünür iz alanı ile hacimsel

malzeme kaybının doğrudan orantılı olmadığını, iz derinliğinin belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

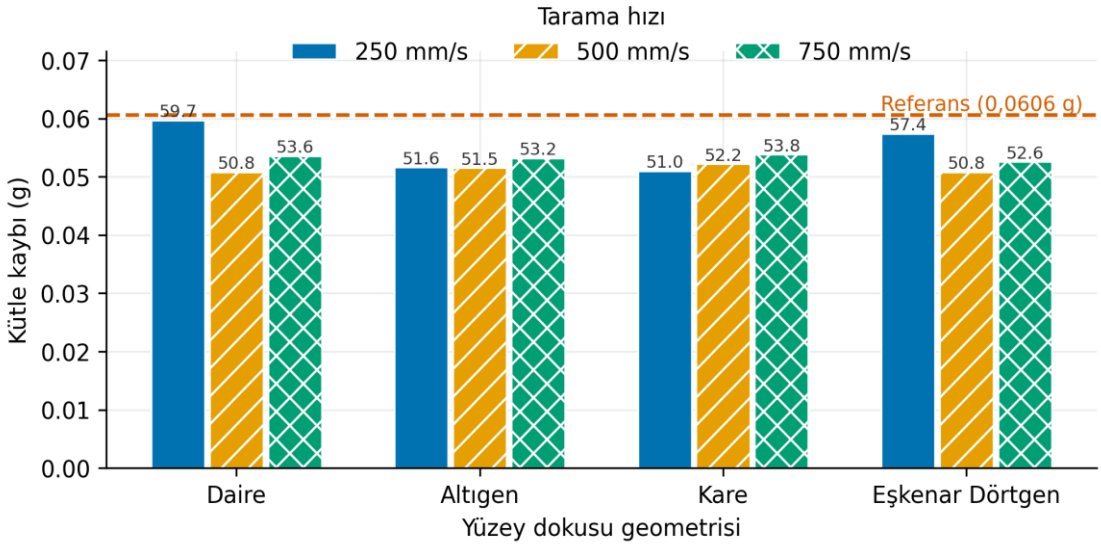
3.2. 30° Çarpma Açısında Erozyon Sonuçları

30° çarpma açısında gerçekleştirilen katı partikül erozyon testlerine ait sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. İşlenmemiş referans numunenin kütle kaybı 0,0606 g olarak ölçülmüş olup, lazerle dokulandırılmış tüm numunelerin kütle kayıpları referans değerin altında kalmıştır.

Tablo 3. 30° çarpma açısında erozyon test sonuçları

No	Geometri	Hız (mm/s)	Başlangıç (g)	Test Sonrası (g)	Kütle Kaybı (g)	Erozyon Oranı (g/g)×10⁻⁵
1	Daire	250	18,1660	18,1063	0,0597	13,27
2	Daire	500	20,5630	20,5122	0,0508	11,29
3	Daire	750	18,2380	18,1844	0,0536	11,91
7	Altıgen	250	18,4940	18,4424	0,0516	11,47
8	Altıgen	500	18,5410	18,4895	0,0515	11,44
9	Altıgen	750	18,7840	18,7308	0,0532	11,82
13	Kare	250	18,5670	18,5160	0,0510	11,33
14	Kare	500	19,7090	19,6568	0,0522	11,60
15	Kare	750	17,8900	17,8362	0,0538	11,96
19	Eşkenar Dörtgen	250	18,4930	18,4356	0,0574	12,76
20	Eşkenar Dörtgen	500	17,9520	17,9012	0,0508	11,29
21	Eşkenar Dörtgen	750	19,2540	19,2014	0,0526	11,69
Ref	-	-	19,0030	18,9424	0,0606	13,47

Tablo 3 incelendiğinde, en düşük kütle kaybının 0,0508 g ile 500 mm/s tarama hızında daire ve eşkenar dörtgen geometrilerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değer, referans numuneye kıyasla %16,2 oranında bir erozyon direnci iyileşmesine karşılık gelmektedir. Geometriler ortalama kütle kaybı üzerinden karşılaştırıldığında; altıgen (0,0521 g) ve kare (0,0523 g) geometriler en düşük ortalama değerleri verirken, bu iki geometrinin tarama hızına karşı duyarlılığının da düşük olduğu (sırasıyla 0,0515–0,0532 g ve 0,0510–0,0538 g aralıkları) tespit edilmiştir. Buna karşın daire ve eşkenar dörtgen geometrilerinde 250 mm/s koşulunda ölçülen görece yüksek kütle kayıpları (sırasıyla 0,0597 g ve 0,0574 g), bu geometrilerin performansının tarama hızına belirgin şekilde bağımlı olduğunu göstermektedir. Düşük tarama hızında birim alana aktarılan lazer enerjisinin artmasıyla doku çizgilerinde daha yoğun ergime ve yeniden katılaşma bölgeleri oluşmakta; bu bölgelerin görece gevrek karakteri, düşük açılı çarpmalarda kesme mekanizmasına karşı direnci azaltabilmektedir. Şekil 4'te 30° çarpma açısındaki kütle kaybı değerleri geometri bazında gruplandırılmış olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Doku geometrisi ve tarama hızına göre kütle kaybı – 30° çarpma açısı (sütun etiketleri mg cinsindendir)

30° çarpma açısında gözlenen yüksek erozyon oranları, sünek malzemelerin karakteristik davranışı ile uyumludur. Sünek malzemelerde düşük açılarda partiküllerin yatay hız bileşeni baskın olmakta ve mikro-kesme (micro-cutting) ile mikro-sürme (micro-ploughing) mekanizmaları ön plana çıkmaktadır [2,12]. Lazerle oluşturulan doku elemanları, aşındırıcı partiküllerin yüzeydeki serbest kayma mesafesini kısaltarak teğetsel kesme mekanizmasının etkinliğini azaltmakta; ayrıca doku çukurları çarpma enerjisinin bir bölümünü absorbe ederek malzeme kaldırma verimini düşürmektedir. Kapalı hücreli geometriler olan altıgen ve kare desenlerin her tarama hızında kararlı iyileşme sağlaması, bu geometrilerin partikül akışını her yönde kesintiye uğratan sürekli hücre duvarlarıyla ilişkilendirilebilir.

3.3. 90° Çarpma Açısında Erozyon Sonuçları

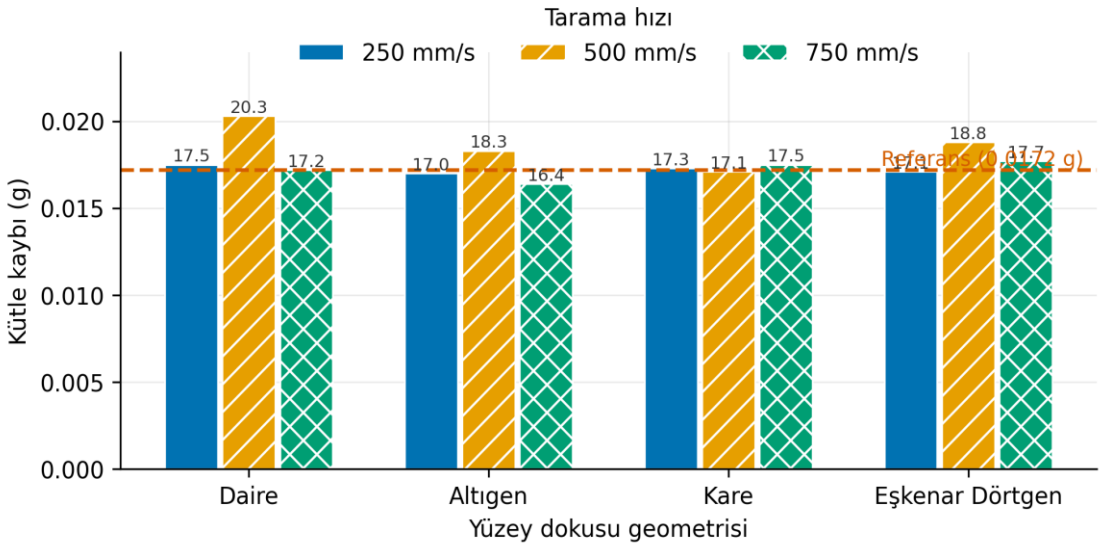
90° çarpma açısında gerçekleştirilen erozyon testlerine ait sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. Normal çarpma açısında referans numunenin kütle kaybı 0,0172 g olarak belirlenmiştir.

Tablo 4. 90° çarpma açısında erozyon test sonuçları

No	Geometri	Hız (mm/s)	Başlangıç (g)	Test Sonrası (g)	Kütle Kaybı (g)	Erozyon Oranı (g/g)×10⁻⁵
4	Daire	250	17,8370	17,8195	0,0175	3,89
5	Daire	500	23,9950	23,9747	0,0203	4,51
6	Daire	750	18,5080	18,4908	0,0172	3,82
10	Altıgen	250	18,1090	18,0920	0,0170	3,78
11	Altıgen	500	18,6050	18,5867	0,0183	4,07
12	Altıgen	750	18,8280	18,8116	0,0164	3,64
16	Kare	250	18,3750	18,3577	0,0173	3,84
17	Kare	500	18,2150	18,1979	0,0171	3,80
18	Kare	750	17,8590	17,8415	0,0175	3,89
22	Eşkenar Dörtgen	250	17,9700	17,9529	0,0171	3,80
23	Eşkenar Dörtgen	500	19,5890	19,5702	0,0188	4,18
24	Eşkenar Dörtgen	750	18,2340	18,2163	0,0177	3,93

Ref	-	-	18,5260	18,5088	0,0172	3,82

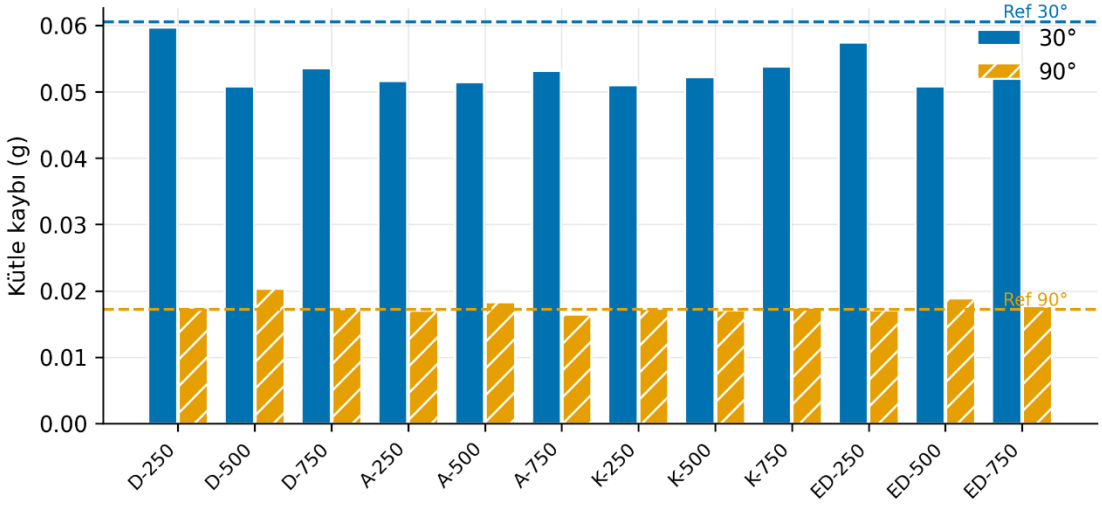
90° çarpma açısında tüm numunelerdeki kütle kayıpları 30°'ye kıyasla önemli ölçüde düşük değerler göstermiştir. Bu koşulda dokulu numunelerin kütle kayıpları referans değere yakın bir bantta (0,0164–0,0203 g) dağılmış olup, doku geometrisinin etkisi sınırlı kalmıştır. En düşük kütle kaybı 0,0164 g ile altıgen geometri ve 750 mm/s koşulunda ölçülmüş olup referansa göre %4,7 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Altıgen geometri, üç tarama hızının ortalaması bakımından da (0,0172 g) en iyi performansı sergilemiştir. Buna karşın daire geometrisinde 500 mm/s koşulunda referansın belirgin üzerinde bir kütle kaybı (0,0203 g) ölçülmüştür. 90° çarpma açısında partiküller yüzeye dik çarpmakta ve dövme-ekstrüzyon (forging-extrusion) mekanizmaları baskın hale gelmektedir; partiküllerin kinetik enerjisinin büyük kısmı plastik deformasyon olarak absorbe edilmekte, tekrarlı çarpmalarla iş sertleşmesi oluşmakta ve kritik deformasyon seviyesine ulaşıldığında yüzeyden malzeme koparılmaktadır. Bu mekanizmada yüzey topografyasının rolü, düşük açıdaki teğetsel kayma senaryosuna göre ikincil düzeyde kalmaktadır. Şekil 5'te 90° çarpma açısındaki kütle kaybı değerleri geometri bazında sunulmuştur.



Şekil 5. Doku geometrisi ve tarama hızına göre kütle kaybı – 90° çarpma açısı (sütun etiketleri mg cinsindendir)

3.4. Çarpma Açısının Karşılaştırmalı Etkisi

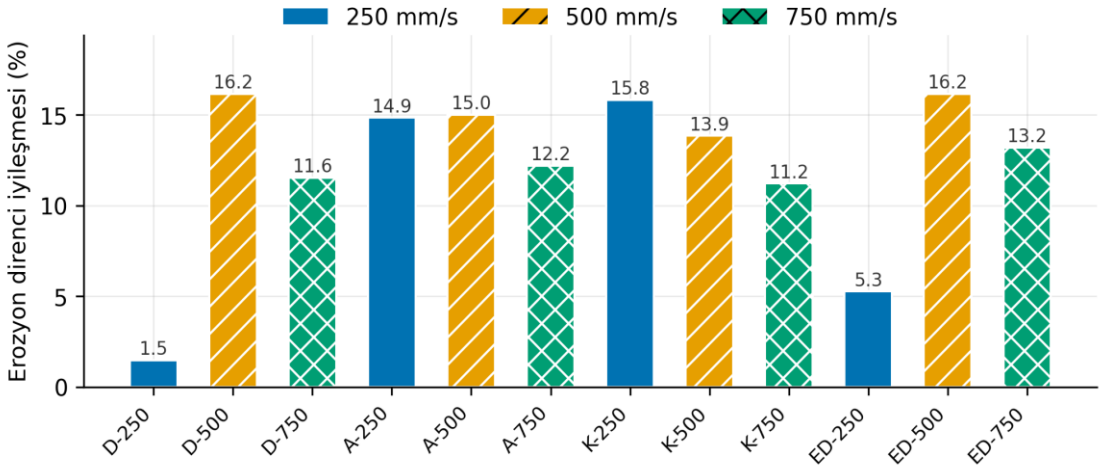
Çarpma açısının erozyon davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, tüm parametre kombinasyonlarının her iki açıdaki kütle kayıpları Şekil 6'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Dokulu numunelerin ortalama kütle kaybı 30° çarpma açısında 0,0532 g iken 90° çarpma açısında 0,0177 g olarak hesaplanmış olup, iki açı arasındaki oran yaklaşık 3,0'tür. Bu sonuç, AA6061-T6 alaşımının tipik sünek malzeme erozyon davranışı sergilediğini doğrulamaktadır; sünek malzemelerde maksimum erozyon 15°–45° aralığında meydana gelirken, gevrek malzemelerde 90°'ye yakın açılarda gözlemlenmektedir (Oka ve ark 2005). Doku geometrisinin iyileştirici etkisinin 30° çarpma açısında belirgin, 90°'de ise sınırlı olması; lazer dokularının erozyona karşı koruma mekanizmasının esas olarak teğetsel kayma ve mikro-kesme süreçlerinin kesintiye uğratılması üzerinden işlediğini göstermektedir.



Şekil 6. 30° ve 90° çarpma açılarında tüm parametre kombinasyonlarının kütle kaybı karşılaştırması (D: Daire, A: Altıgen, K: Kare, ED: Eşkenar Dörtgen)

3.5. Referansa Göre Erozyon Direnci İyileşmesi

Lazerle dokulandırılmış yüzeylerin 30° çarpma açısındaki erozyon direnci iyileşmesini nicel olarak değerlendirmek amacıyla, her bir parametre kombinasyonunun referans numuneye göre yüzdesel iyileşme oranları hesaplanmış ve Şekil 7'de gösterilmiştir. İyileşme oranları %1,5 ile %16,2 arasında değişmektedir. En yüksek iyileşme değerleri 500 mm/s tarama hızında daire ve eşkenar dörtgen geometrilerinde (%16,2), 250 mm/s hızda kare geometride (%15,8) ve 500 mm/s hızda altıgen geometride (%15,0) elde edilmiştir. Dikkat çekici bir bulgu, daire ve eşkenar dörtgen geometrilerinde iyileşmenin tarama hızına güçlü bağımlılık göstermesi (250 mm/s koşulunda sırasıyla yalnızca %1,5 ve %5,3), buna karşın altıgen ve kare geometrilerde tüm hızlarda %11–16 bandında kararlı bir iyileşme elde edilmesidir. Bu davranış, kapalı hücreli çokgen desenlerin işlem parametrelerindeki değişimlere karşı daha tolere edici olduğunu; uygulamada proses kararlılığı açısından altıgen ve kare geometrilerin öne çıktığını göstermektedir.



Şekil 7. Referansa göre erozyon direnci iyileşmesi – 30° çarpma açısı

3.6. Hasar İzi Alan Analizi

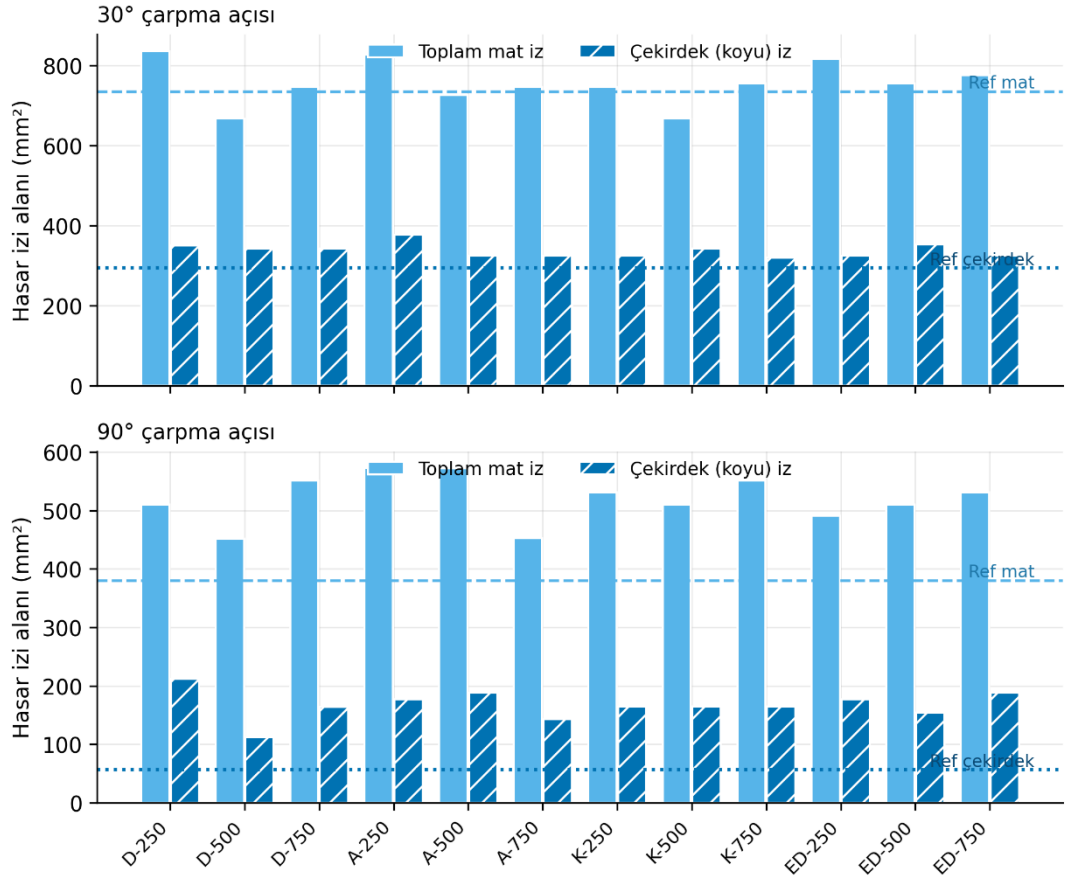
Ölçek kalibrasyonlu görüntü analizi ile belirlenen hasar izi boyutları ve eliptik yaklaşımla hesaplanan iz alanları Tablo 5'te, geometri ve hız bazındaki dağılımları ise Şekil 8'de sunulmuştur.

Tablo 5. Hasar izi boyutları ve alanları (L: akış yönü uzunluğu, W: enine genişlik)

Numune	Geometri	Hız (mm/s)	Açı (°)	Çekirdek İz L×W (mm)	Çekirdek İz Alanı (mm²)	Toplam Mat İz L×W (mm)	Toplam Mat İz Alanı (mm²)
1	Daire	250	30	23,5×19	350,7	38×28	835,7
2	Daire	500	30	23×19	343,2	34×25	667,6
3	Daire	750	30	23×19	343,2	38×25	746,1
7	Altıgen	250	30	24×20	377	39×27	827
8	Altıgen	500	30	23×18	325,2	37×25	726,5
9	Altıgen	750	30	23×18	325,2	38×25	746,1
13	Kare	250	30	23×18	325,2	38×25	746,1
14	Kare	500	30	23×19	343,2	34×25	667,6
15	Kare	750	30	24×17	320,4	37×26	755,6
19	Eşkenar Dörtgen	250	30	23×18	325,2	40×26	816,8
20	Eşkenar Dörtgen	500	30	25×18	353,4	37×26	755,6
21	Eşkenar Dörtgen	750	30	23×18	325,2	38×26	776
Ref	Referans	-	30	22×17	293,7	36×26	735,1
4	Daire	250	90	15×18	212,1	26×25	510,5
5	Daire	500	90	11×13	112,3	23×25	451,6
6	Daire	750	90	13×16	163,4	26×27	551,3
10	Altıgen	250	90	15×15	176,7	27×27	572,6
11	Altıgen	500	90	16×15	188,5	28×26	571,8
12	Altıgen	750	90	13×14	142,9	24×24	452,4
16	Kare	250	90	14×15	164,9	26×26	530,9
17	Kare	500	90	14×15	164,9	25×26	510,5
18	Kare	750	90	14×15	164,9	26×27	551,3
22	Eşkenar Dörtgen	250	90	15×15	176,7	25×25	490,9
23	Eşkenar Dörtgen	500	90	14×14	153,9	26×25	510,5
24	Eşkenar Dörtgen	750	90	15×16	188,5	26×26	530,9
Ref	Referans	-	90	8×9	56,5	22×22	380,1

30° çarpma açısında dokulu numunelerin çekirdek iz alanları 320–377 mm² aralığında yer alırken, referans numunede bu değer 294 mm² olarak ölçülmüştür. Dokulu yüzeylerin çekirdek iz alanlarının referanstan %9–28 daha büyük olmasına karşın kütle kayıplarının %1,5–16,2 daha düşük olması, önemli bir mekanizmaya işaret etmektedir: lazer dokuları, partikül çarpma enerjisini daha geniş bir yüzey alanına yayarak birim alandaki hasar şiddetini ve ortalama iz derinliğini azaltmaktadır. Referans numunede ise hasar dar bir bölgede yoğunlaşmakta ve derinlemesine ilerleyerek daha yüksek hacimsel malzeme kaybına yol açmaktadır. Benzer eğilim 90° çarpma açısında daha belirgin gözlenmiştir; dokulu numunelerin çekirdek iz alanları 112–212 mm² aralığında iken, referans numunenin görünür

çekirdek izi yalnızca 57 mm²'dir. Bu farkta, dokulu yüzeylerde lazer deseninin silinmesinin hasar sınırını görünür kılmasının da payı bulunmakla birlikte; kütle kayıplarının benzer düzeyde kalması, görünür iz alanı (footprint) ile hacimsel kayıp arasında doğrudan bir orantı kurulamayacağını ve iz derinliğinin belirleyici parametre olduğunu doğrulamaktadır. Toplam mat iz alanları ise 30°'de 668–836 mm², 90°'de 452–573 mm² aralığında ölçülmüş olup, difüz sınırlar nedeniyle bu değerler ±%10 belirsizlikle değerlendirilmelidir.



Şekil 8. Çekirdek ve toplam mat hasar izi alanlarının geometri ve tarama hızına göre dağılımı

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AA6061-T6 alüminyum alaşımı yüzeylerinde fiber lazer ile dört farklı geometride (daire, altıgen, kare, eşkenar dörtgen) ve üç farklı tarama hızında (250, 500, 750 mm/s) yüzey dokusu oluşturulmuş; doku geometrisinin katı partikül erozyon davranışı üzerindeki etkisi ASTM G76 standardına uygun testler ve hasar izi görüntü analizi ile incelenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

30° çarpma açısında tüm doku geometrileri, işlenmemiş referans numuneye kıyasla daha düşük kütle kaybı sergilemiştir. En yüksek erozyon direnci iyileşmesi (%16,2), 500 mm/s tarama hızında daire ve eşkenar dörtgen geometrilerinde elde edilmiştir. 90° çarpma açısında doku geometrisinin etkisi sınırlı kalmış; en iyi sonuç altıgen geometri ve 750 mm/s koşulunda (%4,7 iyileşme) gözlemlenmiştir.

Altıgen geometri, her iki çarpma açısında da en düşük ortalama kütle kaybını vererek en kararlı performansı sergilemiştir. Altıgen ve kare gibi kapalı hücreli çokgen desenler tarama hızındaki değişimlere karşı düşük duyarlılık gösterirken; daire ve eşkenar dörtgen geometrilerin performansı tarama hızına güçlü şekilde bağımlı bulunmuştur. Bu bulgu, proses kararlılığının öncelikli olduğu uygulamalarda kapalı hücreli geometrilerin tercih edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

AA6061-T6 alaşımı tipik sünek malzeme erozyon davranışı sergilemiş; 30° çarpma açısındaki ortalama kütle kaybı 90°'dekinin yaklaşık 3,0 katı olarak ölçülmüştür. Doku kaynaklı iyileşmenin düşük açıda belirgin olması, lazer dokularının koruyucu etkisinin esas olarak teğetsel mikro-kesme ve mikro-sürme mekanizmalarının kesintiye uğratılması yoluyla işlediğini göstermektedir.

Hasar izi alan analizi, dokulu yüzeylerde görünür iz alanlarının referanstan daha büyük olmasına karşın kütle kayıplarının daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, lazer dokularının çarpma enerjisini geniş bir alana yayarak hasarın derinlemesine ilerlemesini sınırlandırdığını ve görünür iz alanı ile hacimsel malzeme kaybı arasında doğrudan orantı bulunmadığını göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, hasar bölgelerinin üç boyutlu profilometre ile derinlik analizlerinin yapılması, doku geometrilerinin farklı hatve ve derinlik kombinasyonlarının incelenmesi ve erozyon sonrası yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu ile mikro-mekanizma düzeyinde karakterize edilmesi planlanmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destek Programı kapsamında desteklenmiştir (TÜBİTAK Proje No: 1919B012404905). Yazarlar, Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Aşınma Laboratuvarı olanaklarının kullanımından dolayı teşekkürlerini sunar.

6. KAYNAKLAR

Acar, D., Meriç, D., Budur, A.İ., Gümrük, R., Sofuoğlu, H., Gedikli, H., Cora, Ö.N., Experimental investigations on particle erosion behavior of AA 6061 alloy, 9th Ankara International Aerospace Conference, AIAC-2017-147, Ankara, 2017.

Ally, S., Abrasive Jet Micro-Machining of Metals, Master Thesis, Ryerson University, Canada, 2010.

Avcu, E., Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu İle Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.

Etsion, I., State of the art in laser surface texturing, Journal of Tribology, 127(1), 248-253, 2005. doi:10.1115/1.1828070

Farhan, H., Ishak, M., Rai, R., Mohd Halil, A., Quazi, M.M., A study of laser-induced triangular geometric textures on Aluminum 6061, Journal of Physics: Conference Series, 2933, 012004, 2025. doi:10.1088/1742-6596/2933/1/012004

Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S.M., Costa, H.L., A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement, Wear, 372-373, 21-41, 2017. doi:10.1016/j.wear.2016.11.020

Ijaola, A.O., Bamidele, E.A., Akisin, C.J., Bello, I.T., Oyatobo, A.T., Abdulkareem, A., Farayibi, P.K., Asmatulu, E., Wettability transition for laser textured surfaces: A comprehensive review, Surfaces and Interfaces, 21, 100802, 2020. doi:10.1016/j.surfin.2020.100802

Liu, W., Wang, S., Wang, G., Zhang, J., Zhou, C., Investigation on the differences of surface cleaning properties of series of superhydrophobic aluminum alloys, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 651, 129614, 2022. doi:10.1016/j.colsurfa.2022.129614

Man, H.C., Zhang, S., Cheng, F.T., Improving the wear resistance of AA 6061 by laser surface alloying with NiTi, Materials Letters, 61(19-20), 4058-4061, 2007. doi:10.1016/j.matlet.2007.01.016

Mondal, A.K., Kumar, S., Blawert, C., Dahotre, N.B., Effect of laser surface treatment on corrosion and wear resistance of ACM720 Mg alloy, Surface and Coatings Technology, 202(14), 3187-3198, 2008. doi:10.1016/j.surfcoat.2007.11.030

Oka, Y.I., Okamura, K., Yoshida, T., Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation, Wear, 259(1-6), 95-101, 2005. doi:10.1016/j.wear.2005.01.039

Saklakoglu, N., Gencalp Irizalp, S., Akman, E., Demir, A., Near surface modification of aluminum alloy induced by laser shock processing, Optics & Laser Technology, 64, 235-241, 2014. doi:10.1016/j.optlastec.2014.05.028

Segu, D.Z., Hwang, P., Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test, Tribology International, 91, 111-117, 2015. doi:10.1016/j.triboint.2015.06.028

Yıldıran, Y., 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.

Zhang, W., Zhang, M., Huang, Y., Dong, X., Zeng, L., Cao, S., Effect of dimple shape on the tribological and surface properties of laser-textured 1045 steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 35, 1184-1198, 2026. doi:10.1007/s11665-025-11645-0

EGE BÖLGESİ İÇİN BÖLGESEL YER HAREKETİ TAHMİN MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Soukaina MELLOUK

Muğla Sıtkı Koçman University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 48000 Kötekli, Muğla

ORCID ID: 0000-0002-2211-3722

Doç. Dr. Ebru HARMANDAR

Muğla Sıtkı Koçman University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 48000 Kötekli, Muğla

ORCID ID: 0000-0001-9802-2993

ÖZET

Türkiye'nin Ege Bölgesi, özellikle İzmir metropol alanı, karmaşık tektonik yapısı nedeniyle ciddi sismik tehlikelerle karşı karşıyadır. Yer hareketi tahmin modelleri sismik tehlike analizi ve altyapı tasarımının temelini oluşturur; ancak halihazırda bu bölgeye uygulanan küresel ve pan-Avrupa modelleri sıklıkla yetersiz kalmaktadır. Özellikle, yerel yüksek ısı akışına sahip kabuk yapısından kaynaklanan belirgin yüksek frekanslı azalımı yakalamada başarısız olmaktadırlar. Bu durum, orta büyüklükteki depremler için yakın alan yer hareketlerini (Rjb≤30 km) sistematik olarak gereğinden yüksek tahmin etmelerine neden olmaktadır. Bu sorunu çözmek için, Ege Bölgesi'ne özel olarak tasarlanmış yeni bir ampirik yer hareketi tahmin modeli geliştirildi. Model, Batı Anadolu genelindeki 49 depreme ait 1.702 üç bileşenli ivme kaydından oluşan kapsamlı bir veri setini kullanarak kalibre edildi. En Yüksek Yer İvmesi (PGA) için tahmin denklemleri türetildi. Seçilen fonksiyonel form, Joyner-Boore mesafesini (Rjb) ve ortalama kayma dalgası hızı (VS30) aracılığıyla yerel zemin etkilerini içermektedir. Detaylı artık (residual) analizi aracılığıyla, önerilen bölgeye özgü yer hareketi tahmin modeli, Ege Bölgesi'ndeki olasılıksal sismik tehlike değerlendirmeleri için uygulanabilirliğini ve performansını değerlendirmek üzere mevcut pan-Avrupa ve küresel modellerle karşılaştırıldı.

Anahtar kelimeler: Yer Hareketi Tahmin Modeli, Ege Bölgesi, Sismik Tehlike.

DEVELOPING A GROUND-MOTION MODEL FOR THE AEGEAN REGION

ABSTRACT

Turkey's Aegean Region especially the İzmir metropolitan area faces severe seismic hazards because of its complex tectonic setting. Ground motion prediction models form the basis of seismic hazard analysis and infrastructure design; however, the global and pan-European models currently applied to this region frequently struggle. Specifically, they fail to capture the distinct high-frequency attenuation driven by the local high heat-flow crust. This causes them to systematically overpredict near-field ground motions (Rjb≤30 km) for moderate-magnitude events. To solve this issue, a new empirical ground motion prediction equation tailored specifically to the Aegean Region is developed. The model is calibrated using an extensive dataset of 1,704 three-component accelerograms from 49 earthquakes (Mw 4.5-6.6) across Western Anatolia. Predictive equation is derived for Peak Ground Acceleration (PGA).

The chosen functional form incorporates the Joyner-Boore distance (Rjb) and directly accounts for local site effects through the shear-wave velocity VS30. Through detailed residual analysis, the proposed region-specific ground motion prediction model was then compared against established pan-European

and global models to evaluate its applicability and performance for probabilistic seismic hazard assessments in the Aegean Region.

Keywords: Ground Motion Prediction Equation, Aegean Region, Seismic Hazard.

1. INTRODUCTION

Turkey is positioned at a complex tectonic convergence, rendering it one of the most seismically active countries globally. Within this setting, the Aegean Region particularly the İzmir metropolitan area is rendered highly vulnerable by a dense network of active faults. Following recent moderate-to-large earthquakes by which severe structural damage and loss of life were caused, the accurate definition of the region's seismic hazard has been made essential for disaster mitigation and the updating of building codes.

Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) and performance-based earthquake engineering are driven by Ground Motion Prediction Equations (GMPEs). Key parameters such as Peak Ground Acceleration (PGA) are estimated by these empirical models through the use of magnitude, source-to-site distance, and local site conditions. Today, global or pan-European GMPEs are heavily relied upon for hazard assessments in the Aegean Region. While a macro-scale application is well-served by these generalized models, the specific geological realities of Western Anatolia are frequently missed.

ecause the high heat flow of the Aegean crust alters high-frequency wave attenuation and source scaling, these broader models frequently encounter difficulties. When applied locally, they systematically overpredict near-field ground motions for moderate-magnitude events and artificially inflate aleatory variability. While global frameworks Boore and Atkinson (2008) provide a reliable starting point, foundational studies (Kalkan and Gülkan (2004), Özbey and Smith (2004), Ulusay et al (2004)) consistently demonstrate that models calibrated with regional Turkish data yield significantly more accurate near-source and site-specific estimates.To address this issue, a new empirical GMPE tailored directly to the Aegean Region was developed. The model was calibrated using an extensive dataset comprising 1,704 three-component accelerograms from 49 earthquakes (M_w 4.5–6.6) across Western Anatolia. Region-specific predictive equations for PGA were derived through the application of a random-effects regression algorithm. Finally, near-source attenuation is captured within the chosen functional form via the Joyner-Boore distance (R_{jb}), and local site effects are directly accounted for through shear-wave velocity (V_{S30}).

2. GROUND MOTION DATABASE

This ground-motion database was compiled specifically to analyze shallow crustal seismicity in the Aegean Region of Turkey. All earthquake metadata and strong-motion recordings were sourced from the Disaster and Emergency Management Authority (AFAD). The final dataset is composed of 1,704 accelerograms from 49 earthquakes (M_w 4.5--6.6), captured across a broad network of stations. Matching the primary seismotectonic features of the Aegean extensional environment, most of these records are derived from moderate-magnitude events. As a result, the focal mechanism distribution is dominated by normal-faulting earthquakes, which comprise 1,079 records (approximately 63% of the dataset). The remaining 625 records (approximately 37%) are attributed to strike-slip events. Reverse or thrust mechanisms are completely absent from the catalog, reflecting their natural rarity in this specific tectonic setting.

3. SITE CLASSIFICATION

The recording network provides dense spatial coverage across the İzmir province and the broader Aegean coastline. Source-to-site distances, measured using the Joyner-Boore distance metric Rjb, range from 0 km out to approximately 350 km, providing reliable constraints for modeling far-field attenuation.We classified local site conditions for each station based on the shear-wave velocity in the

upper 30 meters VS30. The dataset leans heavily toward softer soil profiles, with the vast majority of stations falling into NEHRP Site Class C ($360\text{m/s} < V_{S30} < 760\ \text{m/s}$) or Class D $180\text{m/s} < V_{S30} < 360\ \text{m/s}$) and Class B ($760\text{m/s} < V_{S30} < 1500\ \text{m/s}$). This distribution simply matches the regional geology, critical infrastructure, urban settlements, and therefore the strong-motion stations, sit primarily on deep alluvial basin deposits rather than engineering bedrock.

4. GROUND MOTION MODEL

In the developing of the region-specific ground-motion model, the primary objective was to establish a formulation that yields physically constrained, reliable estimates while maintaining the mathematical stability required for routine engineering applications. The selected functional form, presented in the Equation (1), serves as the base model for predicting the geometric mean of Peak Ground Acceleration (PGA). This framework closely follows the empirical structure proposed by Akkar and Çağnan (2010), explicitly incorporating terms to account for magnitude-dependent attenuation and near-source saturation effects.

ln(Y) = a1+ a2 (M – c1) +a4(8.5 − M)2 +(a5 + a6(M - c1) * ln (sqrt (Rjb2+ a7 2)) + a8 FN + a9 FR +Fs (1)

5. RESULTS AND DISCUSSION

5.1. Comparisons with other models for PGA with M=5 normal fault

For peak ground acceleration (PGA), in figure 1 the proposed regional equation projects a lower near-fault plateau ($R_{JB} < 10\ \text{km}$) than both the Akkar and Bommer (2010)-AB10 and Akkar and Çağnan (2010)-AC10 models across all soil profiles. In the far-field ($R_{JB} > 30\ \text{km}$), the new predictive curve passes directly through the center of the primary Aegean empirical scatter. This improved fit stands out clearly on softer ZD deposits ($V_{S30} = 300\ \text{m/s}$), where the (AB10) model systematically overpredicts the observed ground motions. Although the empirical data for stiff rock sites (Class ZB, $V_{S30} = 800\ \text{m/s}$) is much sparser, our model still tracks the lower-bound attenuation trend better than the (AB10) model which proves overly conservative for this $M_w = 5.0$ event.

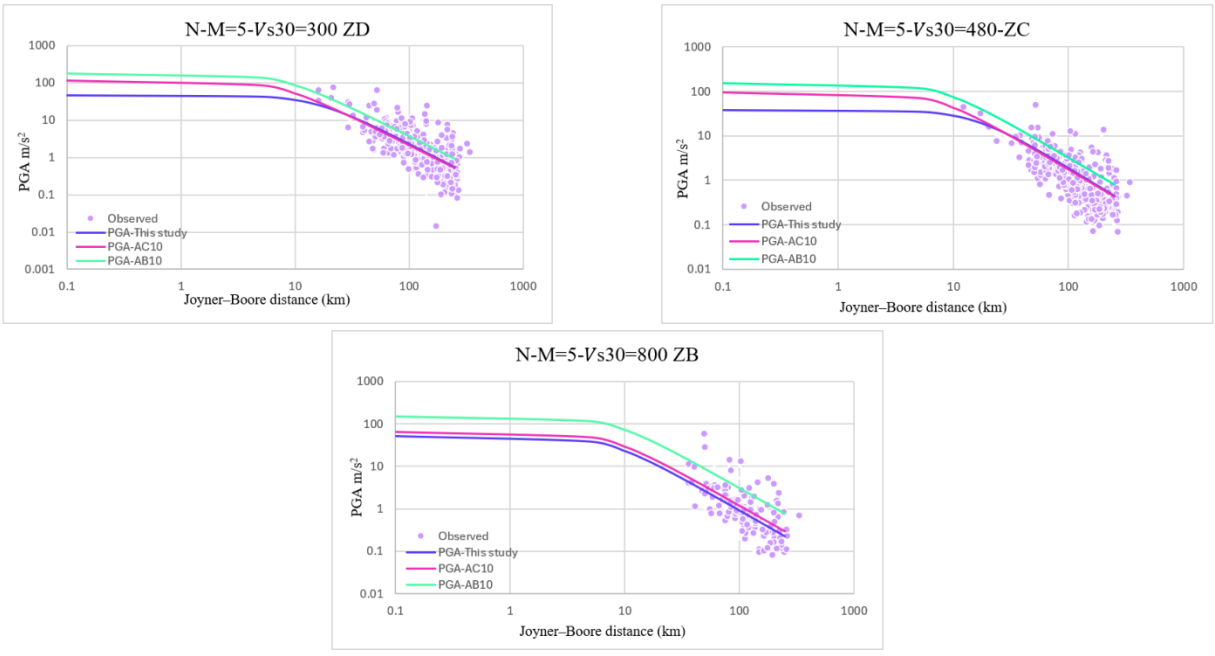


Figure 1. PGA attenuation curves for M_W = 5, normal fault

5.2. Comparisons with other models for PGA with M=6 normal fault

At $M_w = 6.0$, figure 2 the near-source PGA saturation plateaus ($R_{JB} < 10$ km) of the proposed equation and the Akkar and Bommer (2010)-AB10 model align closely across all site classes. This marks a distinct shift from the trends seen in the $M_w = 5.0$ scenario. However, as wave energy travels into the far-field ($R_{JB} > 30$ km), the specific regional attenuation characteristics dominate the data. For the soft soil ZD profile, the proposed regional curve passes directly through the center of the observed data scatter. In contrast, the Akkar and Çağnan (2010)-AC10 model struggles in this range; it systematically underpredicts the far-field median ground motions across all three soil classes, dropping to the absolute lower bounds of the empirical dataset.

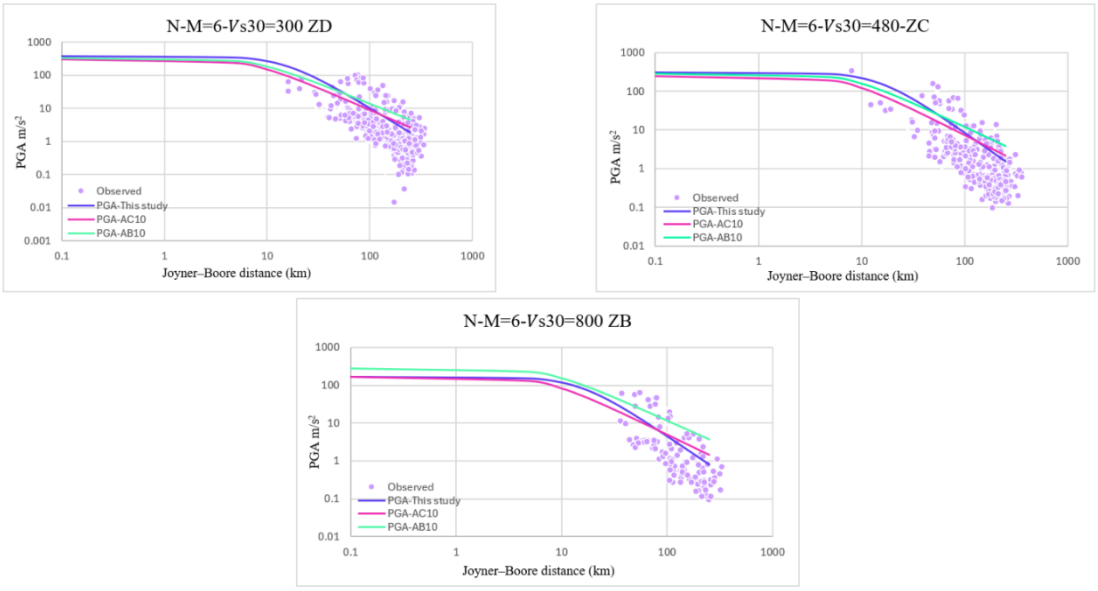


Figure 2. PGA attenuation curves for M_W = 6, normal fault

5.3. Comparisons with other models for PGA with M=5 strike-slip fault

For Peak Ground Acceleration (PGA) in this Mw = 5.0 strike-slip event, in figure 3 the model predictions diverge clearly. In the near-fault zone ($R_{JB} < 10$ km), the proposed equation and the Akkar and Çağnan (2010)-AC10 model yield very similar saturation plateaus. Capturing this near-source ceiling is critical for strike-slip mechanisms because their energy radiation patterns differ substantially from normal faults. Both models capture the physical limits of energy release for this rupture mechanism, avoiding unrealistic acceleration spikes at the fault trace. In contrast, the Akkar and Bommer (2010)-AB10 model establishes an initial amplitude ceiling that is simply too high. As a result, its predicted curves overestimate the main body of observed data in both the near-source and far-field regions. In engineering practice, this shows that the (AB10) equation is overly conservative for moderate Aegean strike-slip events. Using it in local hazard assessments would likely lead to structural over-design and unnecessarily high construction costs. As wave energy travels into the far-field (R_{JB} > 30km), critical differences emerge between our locally calibrated equation and the (AC10) model. In this range, the proposed equation passes directly through the center of the lower-bound empirical scatter. This fit is most visible in softer depositional profiles (Class ZD, V_{S30} = 300m/s), where regional anelastic attenuation actively competes with shallow site amplification. While the soft soil layer amplifies high-frequency motions, the highly fractured Aegean crust rapidly dampens the wave energy. The proposed model captures this interplay, tracing a steep decay slope that reflects the rapid energy dissipation unique to this specific crustal structure. These regional dynamics are exactly what broader equations often miss.

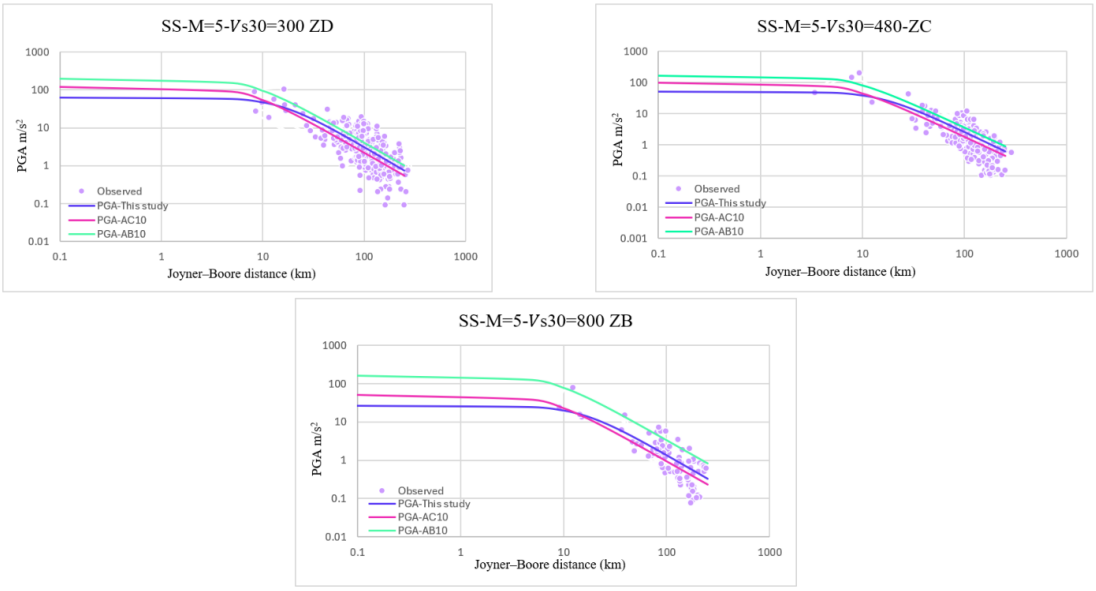


Figure 3. PGA attenuation curves for M_W = 5, strike-slip fault

5.4. Comparisons with other models for PGA with M=6 strike-slip fault

For peak ground acceleration (PGA) during this larger $M_w = 6.0$ strike-slip event, in figure 4 the predictive models diverge clearly, especially regarding the physical limits of energy release. In the near-fault zone ($R_{JB} < 10$ km), the higher seismic moment naturally forces a strong amplitude saturation. However, the Akkar and Bommer (2010)-AB10 model sets this plateau much too high, leading to a systematic overprediction of ground-motion demands across all soil classes. From a physical perspective, this suggests the generalized dataset behind the (AB10) equation might be heavily influenced by high-stress-drop events that do not match Aegean strike-slip kinematics. In contrast, both the proposed equation and the Akkar and Çağnan (2010)-AC10 model establish a much more realistic, physically constrained limit near the fault.

As high-frequency waves travel into the far-field ($R_{JB} > 30$ km), however, the (AC10) model imposes an overly aggressive decay rate. This predictive curve drops to the absolute lower bounds of the empirical scatter, systematically underpredicting the median ground motions. Our locally calibrated model effectively bridges this gap. By passing directly through the center of the dense far-field observations, the model shows that it properly captures the specific anelastic attenuation of the Aegean crust. Modeling this decay rate correctly is critical for softer depositional profiles (Class ZD), where shallow site amplification and rapid crustal energy dissipation interact in complex, non-linear ways. The proposed model handles this dynamic reliably, providing stable median estimations that engineers can confidently apply in regional seismic hazard assessments.

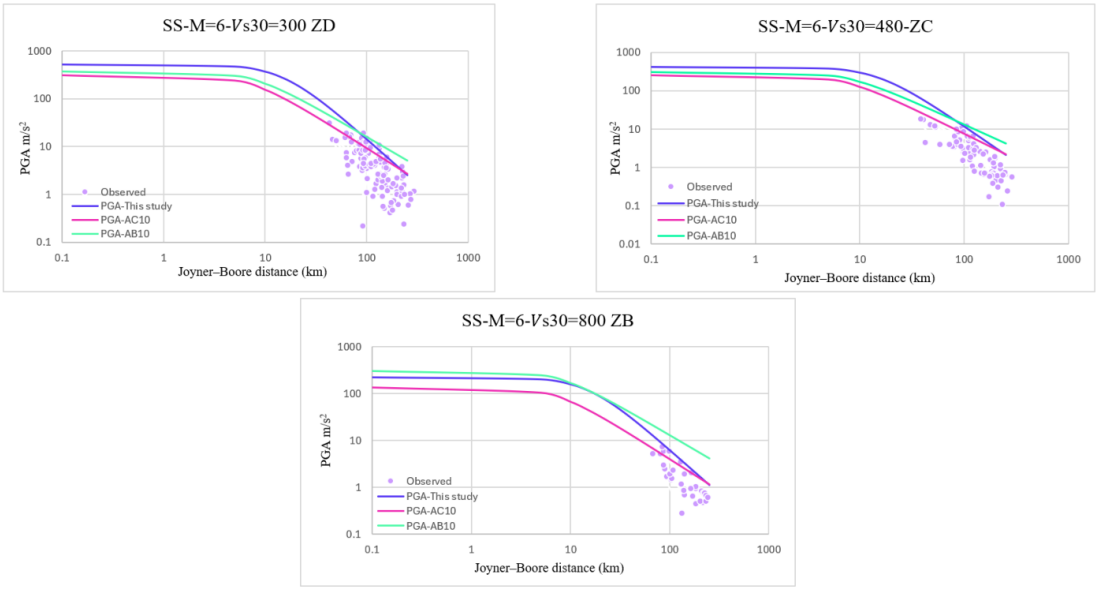


Figure 4. PGA attenuation curves for M_W = 6, strike-slip fault

6. CONCLUSION

Generalized Ground-Motion Prediction Equations frequently struggle to capture the characteristics of the Aegean Region. While models such as Akkar and Bommer (2010)-AB10 tend to overpredict near-fault ground motions due to excessive saturation ceilings, and models like Akkar and Çağnan (2010)-AC10 often underpredict far-field amplitudes through overly aggressive decay rates, the proposed regional equation resolves these discrepancies. By directly accounting for near-fault physical constraints, regional anelastic attenuation, and complex soft-soil (ZD) dynamics derived from the local strong-motion dataset, the locally calibrated model delivers stable and realistic median estimations. Ultimately, this framework provides a reliable foundation for modern seismic hazard assessments, helping refine regional building codes and optimize structural design across Western Anatolia.

REFERENCES

Boore DM, Atkinson GM. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.1 s and 10.0 s. Earthquake Spectra 24(1), 99–138.

Akkar S, Bommer JJ. (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PG V, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle. Earthquake Spectra 81(2).

Akkar S, Çağnan Z. (2010). A Local Ground-Motion Predictive Model for Turkey,and Its Comparison with Other Regional and Global Ground-Motion Models. the Bulletin of the Seismological Society of America 100(6), 2978–2995.

Kalkan E, Gülkan P. (2004). Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey. Earthquake Spectra 20(4), 1111-1138.

Özbey C, Sarı A, Manuel L, Erdik M, Fahjan Y. (2004). An empirical attenuation relationship for Northwestern Turkey ground motion using a random effects approach. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24(2), 115-125.

Ulusay R, Tuncay E, Sönmez H, Gökçeoğlu C. (2004). An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. the Bulletin of Earthquake Engineering Engineering Geology 74(3-4), 265-291.

6 ŞUBAT DEPREMLERİNİN MALATYA İLİNDEKİ ÇEVRESEL ETKİLERİ

Prof. Dr. Rasim BEHÇET

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, *44280, Malatya, Turkey;*

ORCID ID: 0000-0002-6897-3066

ÖZET

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'nin güney ve güneydoğu kesimlerinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli Mw 7,7 ve Mw 7,6 büyüklüğündeki depremler, başta Kahramanmaraş olmak üzere Malatya'nın da aralarında bulunduğu 11 ili geniş ölçekte etkilemiştir. Depremlerin çevresel etkileri yalnızca deprem sırasında oluşan fiziksel yıkımla sınırlı kalmamış; sonraki dönemde bina yıkımları, enkaz kaldırma, hafriyat taşınması ve depolanması, hava kirliliği, içme suyu ve atıksu altyapısındaki hasarlar, arazi kullanım değişiklikleri ve yeniden yapılaşma faaliyetleriyle devam etmiştir. Bu çalışmada 6 Şubat 2023 depremlerinin Malatya ilindeki çevresel etkileri; hava, su, toprak, atık, doğal kaynaklar ve kentsel çevre açısından değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Deprem sonrasında Malatya'da çok sayıda binanın yıkılması veya ağır hasar görmesi sonucunda büyük miktarda inşaat ve yıkıntı atığı oluşmuş; bu atıkların çeşitli depolama sahalarına taşınması ve ayrıştırılması için çalışmalar yürütülmüştür. Yıkım ve enkaz kaldırma faaliyetleri sırasında oluşan partikül madde ve lifsi tozlar önemli çevresel riskler oluşturmuştur. Bununla birlikte kontrollü yıkım, ıslak çalışma, kişisel koruyucu ekipman kullanımı ve hava kalitesinin izlenmesi önemini korumaktadır. Deprem sonrasında bazı içme suyu kaynaklarında bulanıklık meydana gelmiş, ancak daha sonra su kalitesinin deprem öncesi seviyelere yaklaştığı tespit edilmiştir. 6 Şubat depremleri Malatya'da yalnızca jeolojik ve yapısal bir afet değil, aynı zamanda uzun süreli bir çevresel dönüşüm süreci oluşturmuştur. Enkaz atıkları, hava ve su kalitesi, potansiyel tehlikeli maddeler, altyapı hasarları ve yeniden yapılaşmanın çevresel etkilerinin birlikte ele alınması; gelecekte ise hava, toprak, yeraltı suyu, enkaz depolama alanları ve yeniden inşa faaliyetlerini kapsayan uzun dönemli çevresel izleme programlarının uygulanması ilin çevresel etkileri açısında yararlı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: 6 Şubat 2023 depremi, Malatya, çevresel etki, enkaz atıkları, hava kirliliği, su kalitesi.

ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE FEBRUARY 6 EARTHQUAKES IN MALATYA PROVINCE

ABSTRACT

The Mw 7.7 and Mw 7.6 earthquakes centered in Kahramanmaraş on February 6, 2023, extensively affected 11 provinces in the southern and southeastern regions of Turkey, most notably Kahramanmaraş and Malatya. The environmental impacts of the earthquakes were not limited to the physical destruction that occurred during the events themselves; they persisted in the aftermath through building demolitions, debris removal, the transport and storage of excavated material, air pollution, damage to drinking water and wastewater infrastructure, land-use changes, and reconstruction activities. This study aims to evaluate the environmental impacts of the February 6, 2023 earthquakes in Malatya province regarding air, water, soil, waste, natural resources, and the urban environment. Following the earthquakes, the collapse or severe damage of numerous buildings in Malatya generated vast quantities of construction and demolition waste; operations were subsequently carried out to transport and sort this waste at various storage sites. Particulate matter and fibrous dust generated during demolition and debris removal activities posed significant environmental risks. Consequently, measures such as controlled demolition, wet working methods, the use of personal protective equipment, and air quality monitoring remain crucial. While turbidity was observed in some drinking water sources after the

earthquakes, water quality was subsequently found to be approaching pre-earthquake levels. The February 6 earthquakes triggered not only a geological and structural disaster in Malatya but also a long-term process of environmental transformation. Addressing the combined environmental impacts of debris waste, air and water quality, potential hazardous substances, infrastructure damage, and reconstruction; Looking to the future, it is considered that the implementation of long-term environmental monitoring programs—covering air, soil, groundwater, debris disposal sites, and reconstruction activities—would be beneficial in terms of the province's environmental impacts.

Keywords: February 6, 2023 earthquake, Malatya, environmental impact, debris waste, air pollution, water quality.

1. GİRİŞ

Depremler, doğrudan can ve mal kayıplarına neden olan doğal afetler olmakla birlikte, afet sonrasında ortaya çıkan ikincil etkiler nedeniyle çevre üzerinde uzun süreli değişimlere de yol açmaktadır. Özellikle büyük kentleri etkileyen depremlerde çevresel etkiler; bina ve altyapı yıkımları, inşaat ve yıkıntı atıklarının oluşumu, toz ve partikül madde emisyonları, tehlikeli maddelerin çevreye yayılması, içme suyu ve kanalizasyon sistemlerinin zarar görmesi, toprak ve arazi kullanım değişiklikleri ile yeniden inşa faaliyetleri şeklinde ortaya çıkabilmektedir.

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye saatiyle 04.17'de Pazarcık merkezli Mw 7,7 ve aynı gün 13.24'te Elbistan merkezli Mw 7,6 büyüklüğünde iki büyük deprem meydana gelmiştir. AFAD'ın saha değerlendirmelerine göre her iki deprem Kahramanmaraş, Hatay, Adıyaman, Gaziantep, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Şanlıurfa ve Elazığ illerinde çok şiddetli şekilde hissedilmiş ve önemli can ve mal kayıplarına neden olmuştur (AFAD, 2023a)

Depremlerin çevresel etkileri bakımından Malatya özel bir konuma sahiptir. Malatya, her iki ana depremin de etkilediği illerden biri olmasının yanı sıra, özellikle kent merkezinde Battalgazi ve Yeşilyurt ilçeleri ile Doğanşehir ve Akçadağ ilçelerinde önemli yapısal hasar meydana gelen bir ildir. Deprem sonrasında hasarlı yapıların yıkılması, enkazların taşınması ve geçici depolama alanlarında biriktirilmesi kentin çevresel yükünü önemli ölçüde artırmıştır.

Dünya Bankası tarafından hazırlanan hızlı hasar değerlendirmesinde 6 Şubat depremlerinin Türkiye'deki doğrudan fiziksel zararının 34,2 milyar ABD dolarını aştığı ve hasarın önemli bir bölümünün Malatya'nın da içerisinde bulunduğu beş ilde yoğunlaştığı belirtilmiştir. Konut, konut dışı yapılar ve altyapı zararları çevresel açıdan da önemli sonuçlar doğurmuştur (World Bank, 2023).

Afet sonrasında çevresel açıdan en büyük problemlerden biri büyük miktardaki yıkıntı atığının yönetilmesidir. Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı, Türkiye'deki 6 Şubat depremlerinin yaklaşık 100 milyon m^3 düzeyinde enkaz oluşturduğunu belirtmektedir (UNDP, 2023). Bu miktardaki malzemenin kısa süre içerisinde toplanması, taşınması, ayrıştırılması ve uygun biçimde depolanması ciddi bir çevre yönetimi sorunu meydana getirmiştir.

Malatya 2023 İl Çevre Durum Raporu'nda deprem sonucunda yıkılmış, acil yıkılacak ve ağır hasarlı binalardan kaynaklanan enkazın Battalgazi Fırıncı Mahallesi Enkaz Depolama Sahası, Yeşilyurt Yaka Mahallesi Hafriyat Depolama Sahası, Doğanşehir Enkaz Depolama Sahası ve Akçadağ ile diğer ilçelerdeki sahalara taşındığı belirtilmiştir. Aynı raporda enkazların ayrıştırılması, demir, hurda, ahşap, elektrik-elektronik malzemeler ve tekstil gibi ekonomik değeri bulunan malzemelerin geri kazanılması ve beton atıklarının agregaya dönüştürülmesi amacıyla çalışmalar yürütüldüğü ifade edilmiştir (Malatya Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, 2025).

Deprem sonrası atık yönetiminin çevresel önemi yalnızca oluşan malzemenin miktarıyla ilişkili değildir. Yıkıntıların içerisinde beton, tuğla, seramik ve metal gibi nispeten inert malzemelerin yanında ahşap, plastik, boya, izolasyon malzemeleri, elektrikli-elektronik eşyalar, kimyasallar ve bazı eski yapılarda asbest içeren malzemeler de bulunabilmektedir. Bu nedenle deprem enkazının normal hafriyat toprağı gibi değerlendirilmesi doğru değildir. Xiao vd. (2023), 6 Şubat depremlerinin ardından oluşan

yıkıntı atıklarının yanlış depolanması halinde çevre ve halk sağlığı üzerinde önemli riskler meydana gelebileceğini vurgulamıştır.

Çevresel etkilerin ikinci önemli bileşeni hava kalitesidir. Bina yıkımları ve enkaz taşıma faaliyetleri sırasında atmosfere yüksek miktarda toz ve partikül madde salınabilmektedir. Bu partiküllerin bir bölümü PM_{10} ve $PM_{2.5}$ boyutunda olup solunum yoluyla insan sağlığını etkileyebilmektedir. Ayrıca yapı malzemelerinin içeriğine bağlı olarak metal, mineral lif ve diğer potansiyel tehlikeli bileşenlerin atmosfere taşınması mümkündür.

Kahramanmaraş'ta gerçekleştirilen ölçümler deprem sonrası yıkım faaliyetlerinin $PM_{2.5}$ ve PM_{10} kirliliğinde önemli artışlara neden olabileceğini göstermiştir. Adıgüzel (2023), Kahramanmaraş kentinde deprem sonrasında yapılan ölçümlerde bazı mahallelerde çok yüksek $PM_{2.5}$ değerleri belirlemiş ve partikül kirliliğinin yıkım alanlarının yoğunluğuyla ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar Malatya açısından da önemlidir; çünkü iki kent benzer deprem sonrası yıkım ve enkaz kaldırma süreçlerinden geçmiştir.

Malatya'ya özgü daha doğrudan veriler Baran vd. tarafından yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. 2024 yılı başına kadar Malatya'da 27.979 yapının yıkım ve enkaz kaldırma işlemlerinin gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Baran vd., 2024). Bu ölçekte bir yıkım faaliyeti, çevresel açıdan yalnızca kısa süreli bir toz problemi değil, aylar ve yıllar süren bir çevresel yönetim süreci anlamına gelmektedir.

Asbest konusu da özellikle eski yapı stokunun yoğun olduğu kentlerde önem kazanmaktadır. Türkiye'de asbest kullanımına yönelik yasaklamalar aşamalı olarak gerçekleştirilmiş olduğundan, eski yapılarda asbest içeren malzemelerin bulunma ihtimali tamamen ortadan kalkmış değildir. Malatya'da 2024 yılında gerçekleştirilen saha çalışmaları, yıkım ve enkaz depolama alanlarında lifsi toz konsantrasyonlarının yükseldiğini göstermiştir. Ancak incelenen örneklerde SEM/EDX analizleriyle asbest lifi tespit edilmemiştir (Baran vd., 2026).

Depremin su kaynakları ve su altyapısı üzerindeki etkileri de çevresel açıdan önemlidir. Dünya Sağlık Örgütü, deprem sonrasında hasarlı su ve kanalizasyon sistemlerinin hijyen ve halk sağlığı bakımından önemli riskler oluşturabileceğini bildirmiştir (WHO, 2023). Malatya'da MASKİ tarafından yapılan açıklamada Gündüzbey kaptaj tesisinde deprem sonrasında bulanıklık meydana geldiği, ancak laboratuvar incelemelerinde kaynağa yabancı madde karışmasının tespit edilmediği ve daha sonra bulanıklığın deprem öncesi seviyelere döndüğü belirtilmiştir (MASKİ, 2023).

Bu çalışmanın temel amacı, 6 Şubat 2023 depremlerinin Malatya ilindeki çevresel etkilerini bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmek ve deprem kaynaklı katı atık ve enkaz yönetimi, hava kalitesi, su kaynakları ve altyapı, toprak ve arazi kullanımı, doğal çevre, gürültü ve yeniden yapılaşmanın çevresel etkilerini incelemektir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışmanın materyali

Çalışmada temel olarak ikincil veri ve literatür taraması yöntemi kullanılmıştır. Araştırmanın veri kaynakları;

- AFAD deprem raporları,
- Malatya Valiliği açıklamaları,
- Malatya İl Çevre Durum Raporları,
- MASKİ açıklamaları,
- Dünya Bankası raporları,
- Birleşmiş Milletler ve WHO raporları,
- Hakemli bilimsel makaleler,

- Malatya'da gerçekleştirilen saha araştırmaları

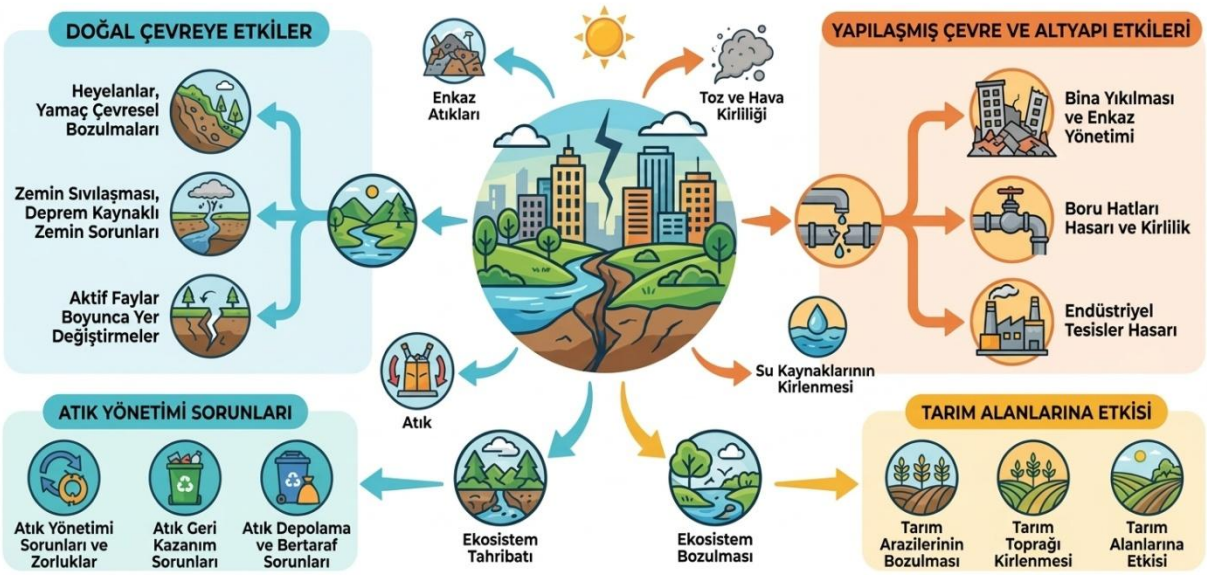
olarak belirlenmiştir.

Depremin fiziksel özellikleri ve etkilediği alanların belirlenmesinde AFAD verileri esas alınmıştır. AFAD'a göre 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen iki ana depremin büyüklükleri Mw 7,7 ve Mw 7,6, odak derinlikleri ise yaklaşık 8,6 km ve 7,0 km'dir (AFAD, 2023a).

2.2. Çevresel etki değerlendirme yaklaşımı

Çalışmada deprem çevresel etkileri aşağıdaki altı ana kategoriye ayrılmış olup bu sınıflandırma Şekil 1'de şematik olarak verilmiştir.

1. İnşaat ve yıkıntı atıkları
2. Hava kalitesi ve partikül madde
3. Asbest ve tehlikeli maddeler
4. Su kaynakları ve atıksu altyapısı
5. Toprak, arazi kullanımı ve ekosistem
6. Yeniden yapılaşma ve ikincil çevresel etkiler



Şekil 1. 6 Şubat 2023 depremlerinin Malatya'daki çevresel etki mekanizması

2.3. Enkaz Miktarının Değerlendirilmesi

Deprem sonrasında oluşan yıkıntı miktarının değerlendirilmesinde yalnızca yıkılan bina sayısının değil, yapıların toplam inşaat alanı ve yapısal özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Malatya'da gerçekleştirilen saha çalışmasında farklı yapılaşma dönemlerine ait betonarme binalar incelenerek yapı özellikleri ile oluşan enkaz miktarı arasındaki ilişki değerlendirilmiştir (Özçelik vd., 2026a). Elde edilen bulgular, deprem kaynaklı enkaz miktarının belirlenmesinde yapıların yaşı, taşıyıcı sistem özellikleri, bina yüksekliği, bodrum katların durumu ve yıkım yöntemi gibi faktörlerin önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Malatya'da oluşan deprem yıkıntılarının miktarının ve çevresel etkilerinin doğru şekilde değerlendirilebilmesi için yapıların fiziksel özellikleri ile yıkım süreçlerinin birlikte ele

alınması gerekmektedir. Ayrıca enkaz miktarının doğru belirlenmesi; taşıma, geçici depolama, geri dönüşüm ve bertaraf süreçlerinin planlanması açısından da büyük önem taşımaktadır.

2.4. Enkaz bileşiminin belirlenmesi

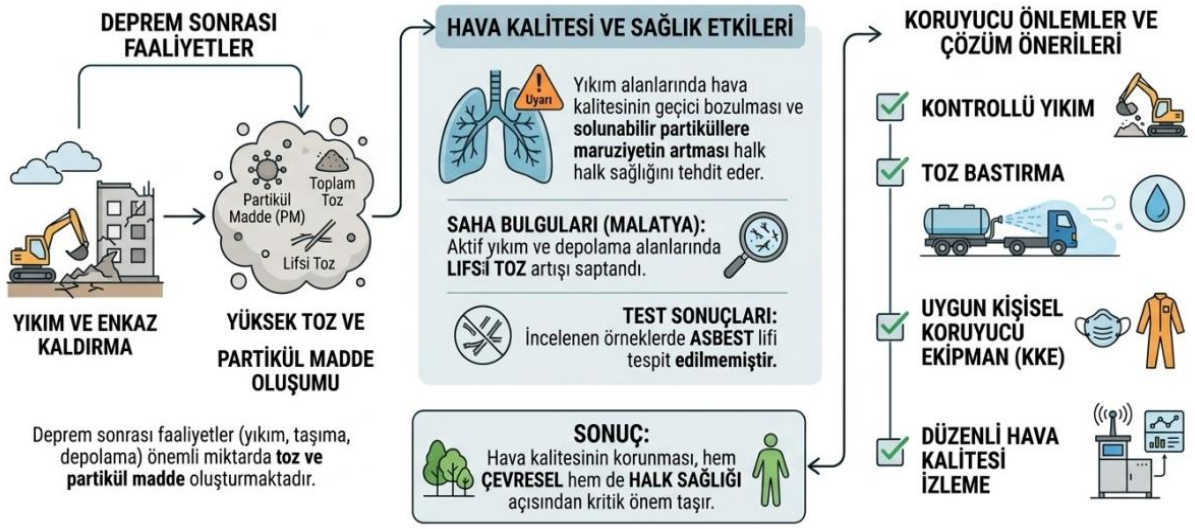
Enkazın çevresel etkisi sadece miktarına değil, bileşimine de bağlıdır.

Malatya'da yapılan saha araştırmasında 9 kontrollü yıkımdan ve geçici depolama alanındaki üç karma atık yığınından toplam 490 ton malzeme örneklenmiştir. Analizlerde mineral fraksiyonların toplam kütlenin yaklaşık %94–97'sini oluşturduğu belirlenmiştir. Demir oranı yapı dönemine bağlı olarak %1,69–3,48 arasında değişmiştir. Ahşap, tekstil, plastik, kâğıt-karton, elektronik ve diğer iri malzemelerin toplamı ise %5'in altında kalmıştır (Özçelik vd., 2026b). Şekil 2'de deprem yıkıntılarının temel bileşenleri şematik olarak verilmiştir.

Şekil 2. Malatya deprem yıkıntılarının temel bileşenleri

2.5. Hava Kalitesi Değerlendirmesi

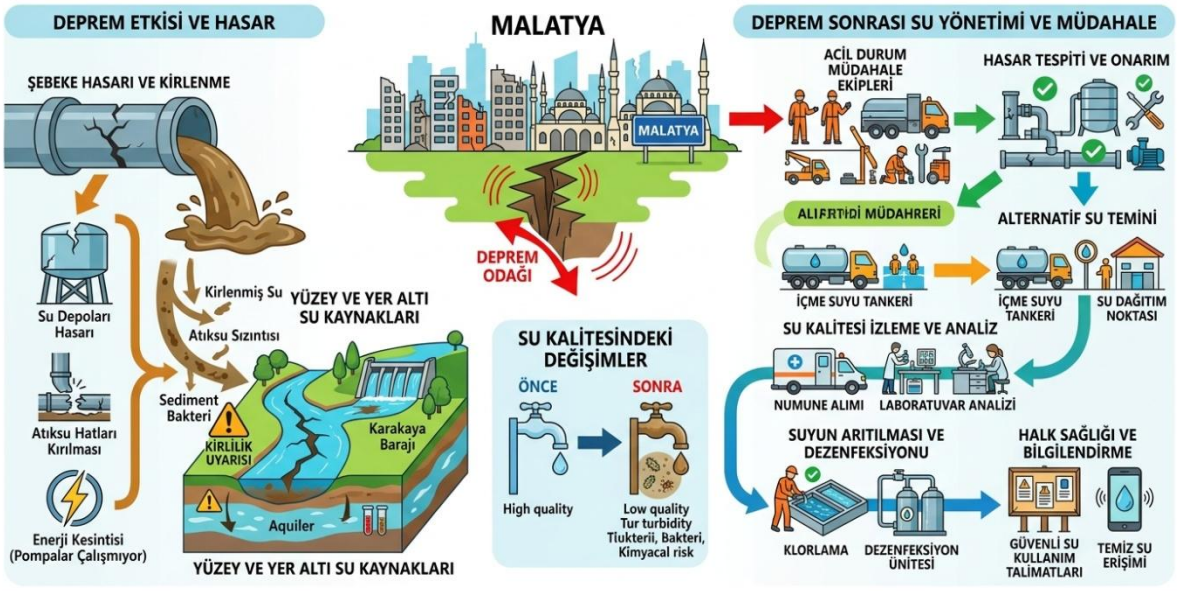
Hava kalitesi üzerindeki etkilerin değerlendirilmesinde partikül madde, toplam toz ve lifsi toz oluşumu dikkate alınmış olup deprem sonrası Malatya ilindeki hava kalitesi ve yönetiminin şematik gösterimi Şekil 3 de verilmiştir. Deprem sonrasında gerçekleştirilen bina yıkımları, enkaz kaldırma, taşıma ve depolama faaliyetleri sırasında önemli miktarda toz ve partikül madde oluşabilmektedir. Bu emisyonlar özellikle yıkım alanlarının çevresinde hava kalitesinin geçici olarak bozulmasına ve solunabilir partiküllere maruziyetin artmasına neden olabilmektedir. Malatya'da gerçekleştirilen saha çalışmalarında, aktif yıkım ve enkaz depolama alanlarında lifsi toz oluşumunun arttığı belirlenmiş, ancak incelenen örneklerde asbest lifi tespit edilmediği bildirilmiştir. Bununla birlikte, özellikle eski yapıların yıkımı sırasında potansiyel olarak tehlikeli lif ve tozların çevreye yayılmasını önlemek amacıyla kontrollü yıkım, toz bastırma, uygun kişisel koruyucu ekipman kullanımı ve düzenli hava kalitesi izleme çalışmalarının sürdürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle deprem sonrası yıkım ve enkaz yönetimi süreçlerinde hava kalitesinin korunması, hem çevresel hem de halk sağlığı açısından önemli bir unsur olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 3. Deprem sonrası Malatya ilindeki hava kalitesi ve yönetiminin şematik gösterimi

2.6. Su kaynakları değerlendirmesi

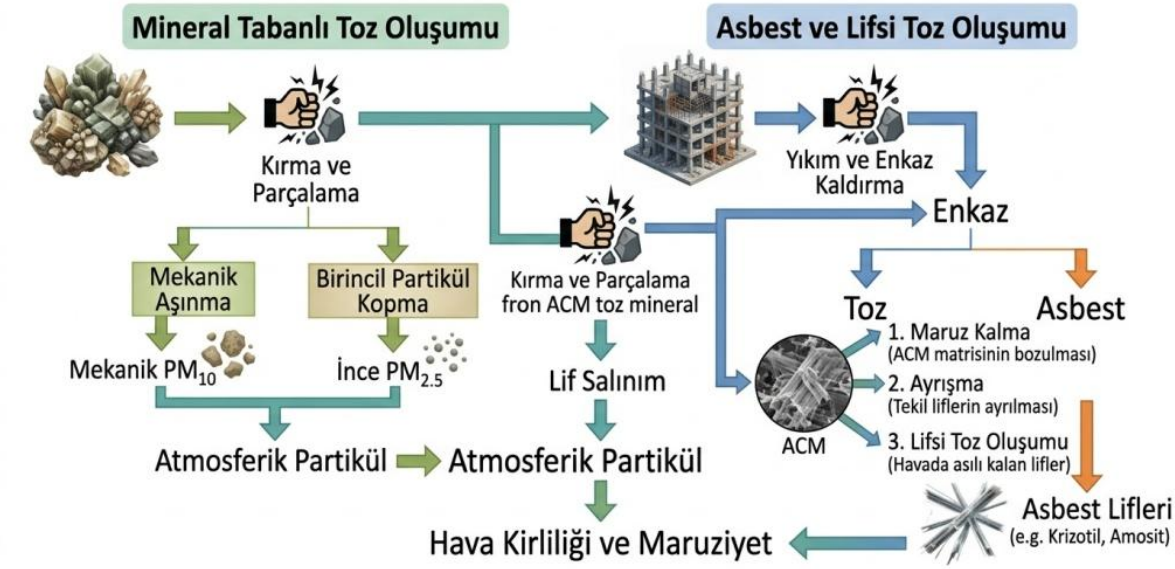
Depremlerin su kaynakları üzerindeki çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde içme suyu kaynakları, su iletim ve kanalizasyon hatları, arıtma tesisleri ile suyun fiziksel, mikrobiyolojik ve kimyasal özelliklerindeki olası değişimler dikkate alınmış olup konu ile ilgili görsel Şekil 4 de verilmiştir. Deprem sırasında meydana gelen zemin hareketleri ve farklı oturmalar, içme suyu ve kanalizasyon altyapısında hasarlara yol açabilmekte; bunun sonucunda su kaynaklarında bulanıklık, debi değişimleri ve kalite problemleri ortaya çıkabilmektedir. 6 Şubat depremlerinden etkilenen iller üzerinde yapılan bölgesel araştırmalar da su altyapısında önemli hasarlar meydana geldiğini göstermektedir (Tunçbilek & Çapar, 2025). Malatya özelinde ise deprem sonrasında Gündüzbey Kaptaj Tesisi'nde bulanıklık meydana geldiği, yapılan laboratuvar analizlerinde kaynağa yabancı madde karışmadığının belirlendiği ve takip eden süreçte kaynak suyunun deprem öncesindeki bulanıklık seviyelerine döndüğü bildirilmiştir (MASKİ, 2023). Bu durum, deprem sonrasında su kaynaklarının ve dağıtım altyapısının düzenli olarak izlenmesinin, olası mikrobiyolojik ve kimyasal kirlenme risklerine karşı gerekli kontrollerin yapılmasının önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Deprem sonrası Malatya ilindeki su kalitesi ve yönetiminin şematik gösterimi

2.7. Tehlikeli Maddeler ve Veri Değerlendirme Yöntemi

Çalışmada deprem sonrasında ortaya çıkabilecek tehlikeli maddeler ve özellikle asbest riski çevresel etkilerin değerlendirilmesinde dikkate alınmış olup Şekil 5. enkaz yıkımından kaynaklanan PM_{10} ve $PM_{2.5}$ ve lifsi toz oluşum mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 5. Enkaz yıkımından kaynaklanan PM_{10} ve $PM_{2.5}$ ve lifsi toz oluşum mekanizması

Asbest maruziyeti, özellikle eski yapıların kontrollü olmayan yöntemlerle yıkılması ve enkazın taşınması sırasında çevreye lifsi tozların yayılması nedeniyle önemli bir çevresel risk oluşturabilmektedir. Malatya'da gerçekleştirilen saha araştırmalarında aktif yıkım alanları, enkaz depolama alanları ve kontrol alanlarında lifsi tozlar incelenmiş ve asbest açısından değerlendirmeler yapılmıştır (Baran vd., 2026). Çalışmada elde edilen veriler; deprem kaynaklı hasar, çevresel baskı, etkilenen çevresel ortam, maruziyet ve uzun dönemli çevresel risk ilişkisi içerisinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda enkaz ve atık oluşumu, hava kalitesi, su kaynakları, toprak ve arazi kullanımı ile tehlikeli maddeler birlikte ele alınarak deprem sonrasında Malatya'da meydana gelen çevresel etkilerin genel çerçevesi ortaya konulmuştur. Değerlendirmelerde literatür kaynakları, resmî kurum raporları, saha araştırmaları ve mevcut çevresel veriler birlikte kullanılmış; elde edilen bulgular çevresel risklerin belirlenmesi ve uzun dönemli izleme, kontrol ve iyileştirme çalışmalarına yönelik önerilerin geliştirilmesinde temel oluşturmuştur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Malatya'daki Yapısal Yıkımın Çevresel Boyutu

6 Şubat 2023 depremleri Malatya'da geniş ölçekte yapısal hasara neden olmuş ve deprem sonrasında gerçekleştirilen hasar tespitleri, kontrollü yıkım ve enkaz kaldırma çalışmaları uzun yıllara yayılan bir süreç haline gelmiştir. Mart 2023 itibarıyla Malatya'da 4.655 binanın tamamen yıkıldığı, toplam 42.821 binanın ise yıkık, acil yıkılacak veya ağır hasarlı olduğu bildirilmiştir, Anadolu Ajansı. (2023a). Hasar tespit çalışmalarının ilerleyen dönemde güncellenmesiyle birlikte yıkık, acil yıkılacak ve ağır hasarlı yapıların sayılarında değişiklikler meydana gelmiş; 2024 yılı başında 6.643 binanın yıkıldığı ve 35.907 binanın ağır hasarlı olduğu açıklanmıştır, Anadolu Ajansı. (2024). Bu değişimler, deprem sonrasında hasar tespitlerinin farklı tarihlerde yenilenmesi, yapıların yeniden değerlendirilmesi ve ağır hasarlı yapıların sonraki aşamalarda yıkım kapsamına alınmasıyla ilişkilidir. Dolayısıyla farklı yıllara ait yapı sayılarının doğrudan karşılaştırılması yerine, bu verilerin deprem sonrası yıkım ve hasar tespit sürecinin

farklı aşamalarını temsil ettiği dikkate alınmalıdır. 2026 yılına gelindiğinde ise Malatya'da ağır hasarlı yapıların yıkım sürecinin büyük ölçüde tamamlandığı, ancak özellikle kırsal alanlarda bir bölüm yapının yıkımının devam ettiği bildirilmektedir. Bu durum, 6 Şubat depremlerinin Malatya'daki çevresel etkilerinin deprem anında oluşan yıkıntılarla sınırlı olmadığını; takip eden yıllarda gerçekleştirilen kontrollü bina yıkımları, enkazın taşınması, ayrıştırılması, depolanması ve yeniden yapılaşma faaliyetleriyle devam eden uzun süreli bir çevresel süreç oluşturduğunu göstermektedir. Bu nedenle çevresel etki değerlendirmelerinde deprem sırasında doğrudan oluşan enkaz ile deprem sonrasında ağır hasarlı veya yıkılması gereken yapıların kontrollü olarak yıkılması sonucunda oluşan yıkıntı atıklarının birbirinden ayrılması ve her iki sürecin hava, toprak, su, atık yönetimi ve insan maruziyeti üzerindeki etkilerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

3.2. Enkaz Atıkları ve Çevresel Baskı

Malatya 2023 İl Çevre Durum Raporu'nda, deprem sonrasında oluşan yıkıntıların farklı depolama alanlarına taşındığı ve bu alanlarda ayrıştırma çalışmalarının gerçekleştirildiği belirtilmektedir. Bu kapsamda demir, hurda, ahşap, elektrikli ve elektronik eşyalar, tekstil ve beton gibi farklı malzemelerin ayrıştırılması ve beton atıklarının agrega olarak yeniden değerlendirilmesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür (Malatya Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, 2025). Bu uygulamalar, yıkıntı atıklarının geri kazanılması ve döngüsel ekonomi yaklaşımının desteklenmesi açısından önem taşımakla birlikte, çevresel açıdan güvenli bir enkaz yönetimi için depolama sahalarının uygun konumda olması, zemin ve hidrojeolojik özelliklerin dikkate alınması, yüzey ve yeraltı sularının korunması, toz oluşumunun kontrol edilmesi ve tehlikeli malzemelerin diğer atıklardan ayrıştırılması gerekmektedir. Türkiye'de 6 Şubat depremlerinden etkilenen illerdeki enkaz depolama alanlarını inceleyen çalışmalar, bazı sahaların yerleşim alanlarına ve yüzey suyu kaynaklarına yakın konumlandırılmasının çevresel ve halk sağlığı açısından risk oluşturabileceğini ortaya koymuştur (Kocatürk vd., 2023). Bu nedenle Malatya'da deprem kaynaklı enkaz yönetiminin yalnızca yıkıntıların kent dışına taşınması ve depolanması şeklinde değil, atıkların ayrıştırılması, geri kazanılması ve bertaraf edilmesi ile birlikte uzun dönemli çevresel güvenlik kriterleri çerçevesinde yürütülmesi gerekmektedir.

3.3. Enkaz Miktarı, Bileşimi ve Geri Kazanım Potansiyeli

Malatya'da gerçekleştirilen 2026 tarihli saha çalışmaları, deprem sonrasında oluşan enkaz miktarının yapıların yapım dönemi ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Yapıların birim alan başına enkaz miktarı, 1999 ve öncesinde inşa edilen yapılarda birinci ve ikinci yaklaşıma göre sırasıyla 0,845 ve 0,933 ton/m², 2000–2010 döneminde inşa edilen yapılarda 0,952 ve 0,979 ton/m², 2011–2018 döneminde inşa edilen yapılarda ise 1,009 ve 1,107 ton/m² olarak belirlenmiştir (Özçelik vd., 2026a). Bu sonuçlar, daha yeni yapı dönemlerinde birim alan başına düşen enkaz miktarının arttığını ve yapıların betonarme özellikleri, yapı alanı ile temel ve bodrum uygulamalarının oluşan enkaz kütlesini etkileyebildiğini göstermektedir. Aynı çalışmanın bölgesel değerlendirmesinde, 6 Şubat 2023 depremlerinden etkilenen illerde toplam deprem enkazının yaklaşık 93,9–159,3 milyon ton arasında olabileceği ve en yüksek enkaz miktarlarının Hatay, Kahramanmaraş ve Malatya'da oluştuğu tahmin edilmiştir (Özçelik vd., 2026a). Bununla birlikte Malatya'da gerçekleştirilen 490 tonluk saha örneklemesine dayalı kontrollü yıkım çalışmasında, enkazın yaklaşık %94–97'sinin mineral fraksiyonlardan oluştuğu, demir içeriğinin ise %1,69–3,48 arasında değiştiği belirlenmiştir. Ahşap, plastik, tekstil, kâğıt/karton ve elektronik malzemeler ile diğer bileşenlerin toplamının ise %5'in altında olduğu bildirilmiştir (Özçelik vd., 2026b). Enkazın büyük bölümünün mineral esaslı olması, uygun ayrıştırma, kırma ve eleme işlemleri uygulanması durumunda beton ve diğer mineral esaslı malzemelerin ikincil hammadde ve geri dönüştürülmüş agrega olarak değerlendirilmesine önemli bir olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım, doğal agrega ihtiyacının, yeni taş ocağı işletmelerinin, taşıma mesafelerinin ve buna bağlı yakıt tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabileceği gibi, yeniden yapılaşma sürecinin çevresel ve karbon ayak izinin azaltılmasına da yardımcı olabilir. Dolayısıyla Malatya'da deprem enkazının yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir atık olarak değil, uygun ayrıştırma

ve geri kazanım süreçleriyle yeniden kullanılabilecek önemli bir ikincil hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilir enkaz yönetimi ve döngüsel ekonomi açısından önem taşımaktadır.

3.4. Hava Kalitesi ve Asbest Riski

Deprem sonrasında Malatya'da ortaya çıkan önemli çevresel etkilerden biri, özellikle bina yıkımı, enkaz kaldırma, taşıma ve depolama faaliyetleri sırasında hava kalitesinde meydana gelen bozulmadır. Yıkım sırasında beton, sıva, tuğla, alçı, cam ve diğer yapı malzemelerinin mekanik olarak parçalanması sonucunda farklı büyüklüklerde partiküller oluşmakta; büyük partiküller kısa mesafelerde çökerken PM_{10} ve $PM_{2.5}$ gibi daha küçük partiküller atmosferde daha uzun süre kalabilmektedir. Bu durum özellikle yıkım alanları çevresinde yaşayanlar, yıkım ve enkaz taşıma çalışmalarında görev yapan personel, arama-kurtarma ekipleri ile çocuklar ve yaşlılar açısından çevresel maruziyet riskini artırmaktadır. Kahramanmaraş'ta deprem sonrasında gerçekleştirilen ölçümlerde bazı mahallelerde $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarının 900 $\mu g/m^3$ seviyelerine yaklaştığı belirlenmiş olup, bu değerler Malatya'ya doğrudan aktarılmamakla birlikte yoğun yıkım faaliyetlerinin hava kalitesi üzerindeki etkisini göstermesi açısından bölgesel bir karşılaştırma sunmaktadır (Adıgüzel, 2023). Malatya'da gerçekleştirilen saha araştırmalarında ise aktif yıkım ve enkaz depolama alanlarında lifsi toz konsantrasyonlarının yükseldiği belirlenmiş, ancak 2024 yılında gerçekleştirilen örneklemelerde SEM/EDXA analizleri sonucunda incelenen örneklerde asbest lifine rastlanmadığı bildirilmiştir (Baran vd., 2026). Bununla birlikte, belirli saha ve örnekleme koşullarında asbest lifinin tespit edilmemiş olması Malatya'daki tüm yıkım alanlarında asbest bulunmadığı anlamına gelmemektedir; asbest riski yapıların yaşı, kullanılan yapı malzemeleri, yıkım yöntemi, örnekleme zamanı ve örnekleme noktası gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle özellikle eski yapıların yıkımında, yıkım öncesi malzeme analizlerinin yapılması, kontrollü söküm ve yıkım yöntemlerinin uygulanması, toz oluşumunu azaltmak amacıyla ıslak çalışma yöntemlerinden yararlanılması, gerekli durumlarda uygun havalandırma ve basınç kontrol sistemlerinin kullanılması, çalışanların uygun kişisel koruyucu ekipmanlarla korunması ve yıkım alanlarında düzenli hava kalitesi ölçümlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu uygulamalar, deprem sonrası yıkım ve enkaz yönetimi sürecinde partikül madde ve potansiyel olarak tehlikeli liflerin çevreye yayılımının sınırlandırılması ve uzun dönemli çevresel risklerin azaltılması açısından önem taşımaktadır.

3.5. Su Kaynakları ve İçme Suyu

Deprem sırasında su altyapısında meydana gelen hasarlar, hem içme suyunun fiziksel olarak kesilmesine veya bulanıklaşmasına hem de içme suyu ve kanalizasyon hatlarının zarar görmesi durumunda mikrobiyolojik kirlenme riskinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Nitekim Dünya Sağlık Örgütü, 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında hasar gören içme suyu ve kanalizasyon altyapısının hijyen ve halk sağlığı açısından önemli riskler oluşturduğuna dikkat çekmiştir((WHO., 2023). Malatya'da deprem sonrasında Gündüzbey Kaptaj Tesisi'nde bulanıklık gözlenmiş, ancak yapılan değerlendirmeler sonucunda kaynak suyunun daha sonraki dönemde deprem öncesindeki bulanıklık seviyelerine döndüğü bildirilmiştir (MASKİ, 2023). Bu durum, deprem kaynaklı su kalitesi değişimlerinin bazı durumlarda önemli olmakla birlikte geçici nitelikte olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, deprem sonrasında bireysel su depolarında oluşabilecek tortu birikimi ve hijyen sorunları daha uzun süre devam edebileceğinden, su depolarının temizlenmesi ve dezenfeksiyonu ile içme suyu kalitesinin düzenli olarak izlenmesi önem taşımaktadır(MASKİ, 2023). Dolayısıyla Malatya'da deprem sonrası çevresel etkilerin değerlendirilmesinde yalnızca merkezi içme suyu kaynaklarının değil, su iletim ve kanalizasyon altyapısının yanı sıra bireysel su depolarının da dikkate alınması gerekmektedir.

3.6. Toprak ve Yeraltı Suyu Üzerindeki Potansiyel Etkiler

Deprem sonrasında oluşan enkazın geçici veya kalıcı olarak depolandığı alanların toprak ve yeraltı suyu üzerindeki potansiyel etkileri, çevresel değerlendirmelerin önemli bir bileşenini oluşturmaktadır. Enkaz

içerisinde ağır metaller, boya kalıntıları, yağlar, plastikler, elektronik atıklar, izolasyon malzemeleri ve çeşitli evsel kimyasallar bulunabilmekte; bu maddelerin yağış ve yüzeysel akış etkisiyle çözünmesi veya sızması sonucunda toprak ve yeraltı suyu kaynaklarına ulaşma riski ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle enkaz depolama sahalarının çevresel açıdan değerlendirilmesinde kirleticilerin çevreye ulaşma olasılığı, kirleticilerin toksik veya çevresel özellikleri ve insan ya da ekosistemlerin maruziyet düzeyi birlikte dikkate alınmalıdır. Malatya'da özellikle enkaz depolama sahalarının bulunduğu alanlarda olası çevresel etkilerin belirlenebilmesi amacıyla toprak ve yeraltı suyu kalitesinin uzun dönemli olarak izlenmesi önem taşımaktadır. Bu kapsamda toprak ve su örneklerinde pH, elektriksel iletkenlik, ağır metaller, petrol hidrokarbonları, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), klorür ve sülfat gibi temel kimyasal parametrelerin yanı sıra yeraltı suyu seviyelerinin düzenli olarak takip edilmesi; olası kirlenmenin erken dönemde belirlenmesi, çevresel risklerin kontrol altına alınması ve enkaz depolama sahalarının uzun dönemli çevresel güvenliğinin sağlanması açısından gereklidir.

3.7. Altyapı ve Kanalizasyon Sistemlerinin Çevresel Etkileri

Deprem sonrasında Malatya'da su, kanalizasyon, ulaşım ve enerji sistemleri başta olmak üzere altyapının çeşitli bileşenlerinde hasarlar meydana gelmiş ve bu hasarlar çevre üzerinde doğrudan ve dolaylı etkiler oluşturmuştur. Dünya Bankası'nın değerlendirmelerine göre deprem bölgesinde altyapı hasarları toplam fiziksel hasarın önemli bir bölümünü oluşturmuş; özellikle su, kanalizasyon ve belediye hizmetlerinin yeniden işler hale getirilmesi iyileşme ve yeniden yapılanma sürecinin temel unsurlarından biri olmuştur (World Bank., 2023). Malatya'da kanalizasyon altyapısındaki hasarlar, özellikle deprem sonrasında oluşturulan geçici yerleşim alanlarında artan nüfus yoğunluğu ve buna bağlı olarak oluşan ilave atıksu yükü nedeniyle çevresel açıdan daha önemli hale gelmiştir. Altyapı sistemlerinin kapasitesinin zorlanması veya geçici sistemlerde meydana gelebilecek yetersizlikler, atıksuların çevreye kontrolsüz biçimde ulaşması durumunda toprak ve su kaynakları üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilecek potansiyel bir risk meydana getirmektedir. Bu nedenle deprem sonrası çevresel etkilerin değerlendirilmesinde yalnızca deprem sırasında oluşan doğrudan altyapı hasarlarının değil, geçici yerleşimlerin oluşturduğu ek yüklerin ve yeniden yapılaşma sürecinde altyapının yeniden düzenlenmesinin çevresel sonuçlarının birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu bağlamda geçici yerleşim, altyapı hasarı ve yeniden inşa süreçlerinin birbirleriyle etkileşim içerisinde değerlendirilmesi, Malatya'da deprem sonrası çevresel etkilerin daha bütüncül biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır.

3.8. Arazi Kullanımı ve Doğal Çevre

Deprem sonrasında Malatya'da yeni konut alanlarının oluşturulması, geçici yerleşimlerin kurulması, ulaşım yollarının geliştirilmesi ve altyapı hatlarının yeniden düzenlenmesi arazi kullanımında önemli değişikliklere neden olmuştur. Özellikle yeni yerleşim alanlarının oluşturulması sırasında tarım alanlarının yapılaşmaya açılması, yeşil alanların azalması, geçirimsiz yüzeylerin artması ve buna bağlı olarak yüzeysel akış özelliklerinin değişmesi gibi çevresel etkiler ortaya çıkabilmektedir. Bunun yanında doğal alanların yapılaşma ve altyapı çalışmaları nedeniyle parçalanması, habitat bütünlüğünün bozulmasına ve ekosistemlerin sürekliliğinin olumsuz etkilenmesine neden olabilecek potansiyel bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle deprem sonrası yeniden yapılaşma sürecinde yalnızca yapı güvenliği, mühendislik gereklilikleri ve ekonomik unsurların değil, mevcut arazi kullanım özellikleri, tarım alanlarının korunması, yeşil alanların sürekliliği, yağış sularının doğal drenajı ve ekolojik bütünlüğün korunması gibi çevresel kriterlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda Malatya'nın yeniden yapılaşma sürecinin ekolojik planlama yaklaşımı çerçevesinde ele alınması, doğal kaynakların korunması ve uzun dönemli çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önem taşımaktadır.

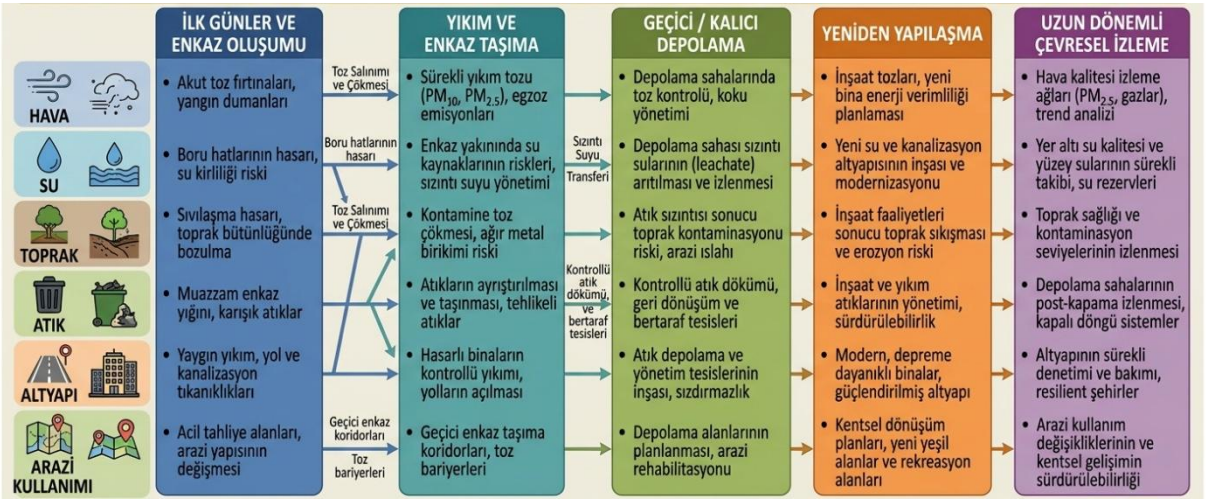
3.9. Yeniden İnşanın Çevresel Etkileri

Deprem sonrasında Malatya'da yürütülen yeniden inşa süreci çevresel açıdan hem olumlu hem de olumsuz etkiler oluşturabilecek bir süreçtir. Bir yandan modern, enerji verimli ve çevre standartları

yüksek yapıların inşa edilmesi, gelecekteki enerji tüketiminin ve buna bağlı çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayabilirken, diğer yandan yeniden yapılaşma faaliyetlerinde büyük miktarlarda çimento, çelik, agrega, asfalt, cam ve seramik gibi yapı malzemelerinin kullanılması doğal kaynak tüketimini, enerji ihtiyacını, taşıma faaliyetlerini ve buna bağlı emisyonları artırabilmektedir. Bu nedenle Malatya'nın yeniden inşa sürecinde geri dönüştürülmüş beton agregalarının kullanılması, yerel ve düşük çevresel etkiye sahip yapı malzemelerinin tercih edilmesi, enerji verimli binaların yaygınlaştırılması, güneş enerjisi sistemlerinin kullanımının artırılması, yağmur suyu yönetim uygulamalarının geliştirilmesi, yeşil alanların korunması ve deprem enkazının kaynağında ayrıştırılarak geri kazanılması gibi uygulamaların yaygınlaştırılması önem taşımaktadır. Bu yaklaşımlar, doğal kaynak tüketiminin ve inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel yüklerin azaltılmasına, enerji verimliliğinin artırılmasına ve yeniden yapılaşma sürecinin daha sürdürülebilir hale getirilmesine katkı sağlayacaktır. Dolayısıyla Malatya'nın yeniden inşasının yalnızca yapı güvenliği ve ekonomik kalkınma açısından değil, kaynak verimliliği, enerji etkinliği, döngüsel ekonomi ve çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri birlikte dikkate alınarak planlanması gerekmektedir.

3.10. Çevresel Etkilerin Zamansal Gelişimi ve Genel Değerlendirme

6 Şubat 2023 depremleri sonrasında Malatya'da ortaya çıkan çevresel etkiler, deprem anıyla sınırlı kalmayıp farklı zaman dilimlerinde değişerek devam eden çok aşamalı bir süreç oluşturmuştur. Depremin ilk günlerinde bina yıkımları ve enkaz oluşumu, yoğun toz emisyonları, altyapı hasarları, içme suyu kaynaklarında bulanıklık ve atıksu yönetimine ilişkin riskler ön plana çıkarken, izleyen aylarda enkazın taşınması ve geçici olarak depolanması, bina yıkımlarından kaynaklanan toz, trafik yoğunluğu ve gürültü gibi etkiler belirginleşmiştir. Bir ila iki yıllık dönemde kontrollü bina yıkımları, büyük miktarlardaki enkazın depolama alanlarına taşınması ve buna bağlı olarak lifsi toz ve potansiyel asbest maruziyeti gibi riskler önem kazanmış; iki ila üç yıllık dönemde ise yeniden yapılaşma, hafriyat faaliyetleri, beton ve agrega üretimi ile arazi kullanımındaki değişiklikler çevresel baskının temel unsurları haline gelmiştir. Uzun vadede ise enkaz depolama alanlarının rehabilitasyonu, toprak ve yeraltı suyu üzerindeki olası etkiler, yeni yerleşim alanlarının oluşturduğu arazi kullanım değişiklikleri ve yeni kent dokusunun enerji, ulaşım, su ve atık yönetimi üzerindeki çevresel etkilerinin izlenmesi gerekmektedir. Bu süreç, deprem kaynaklı çevresel etkilerin kısa süreli ve tek aşamalı bir olay olmadığı, Şekil 6 da görüleceği gibi enkaz oluşumu → yıkım ve taşıma → geçici depolama → yeniden yapılaşma → uzun dönemli çevresel izleme şeklinde ilerleyen dinamik bir çevresel dönüşüm süreci olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 6. Malatya'da 6 Şubat 2023 depremleri sonrası çevresel etkilerin zamansal gelişimi.

Malatya'da deprem sonrası çevresel etkilerin genel değerlendirmesinde, inşaat ve yıkıntı atıkları en uzun süreli ve yüksek miktarlı çevresel baskı unsurlarından biri olarak öne çıkarken, PM_{10} ve $PM_{2.5}$ oluşumu özellikle yıkım ve enkaz taşıma dönemlerinde önemli bir çevresel etki oluşturmuştur. Lifsi toz

oluşumu ve eski yapılardan kaynaklanabilecek asbest riski, belirli koşullarda orta ve uzun vadeli maruziyet açısından dikkate alınması gereken unsurlar arasında yer almakta; içme suyu bulanıklığı ve kanalizasyon altyapısına ilişkin riskler ise daha çok kısa ve orta vadeli etkiler şeklinde değerlendirilmektedir. Enkaz depolama alanlarından kaynaklanabilecek toprak ve yeraltı suyu kirliliği potansiyel olarak daha uzun süreli bir çevresel risk oluştururken, yıkım faaliyetleri ve ağır taşıt trafiğinden kaynaklanan gürültü ve emisyonlar özellikle aktif çalışma dönemlerinde belirginleşmektedir. Yeniden yapılaşma faaliyetleri ise inşaat malzemesi tüketimi, enerji kullanımı, hafriyat, ulaşım ve arazi kullanımındaki değişiklikler yoluyla uzun dönemli çevresel etkiler oluşturabilecek niteliktedir. Bu nedenle Malatya'da deprem sonrası çevresel etkilerin değerlendirilmesinde etki düzeyi kadar etkinin süresi, kaynağı ve etkilenen çevresel ortamın da birlikte dikkate alınması gerekmektedir.

6 Şubat 2023 depremleri üzerine gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir bölümü deprem mühendisliği, bina hasarı, jeoloji, sağlık ve ekonomik kayıplar üzerine yoğunlaşırken, Malatya özelinde enkaz miktarı, hava kalitesi, lifsi toz ve asbest riski, su altyapısı, toprak ve yeraltı suyu üzerindeki potansiyel etkiler ile yeniden yapılaşma sürecini aynı çevresel çerçevede ele alan çalışmalar daha sınırlıdır. Bu çalışmanın temel yaklaşımı, söz konusu çevresel bileşenleri birbirinden bağımsız etkiler olarak değil, deprem sonrasında birbirleriyle etkileşim içerisinde gelişen bir bütün olarak değerlendirmektir. Bu kapsamda deprem, yalnızca kısa süreli bir jeolojik afet olarak değil; enkaz oluşumu, yıkım ve taşıma, atık yönetimi, altyapı değişiklikleri, arazi kullanımındaki dönüşüm ve yeniden yapılaşma süreçleriyle birlikte ele alınması gereken uzun süreli bir çevresel dönüşüm olayı olarak değerlendirilmektedir. Böyle bir yaklaşım, Malatya'da deprem sonrası çevresel risklerin belirlenmesi, öncelikli izleme alanlarının ortaya konulması ve yeniden yapılaşma sürecinin çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda planlanması açısından bütüncül bir değerlendirme olanağı sağlamaktadır.

4. SONUÇLAR

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremlerinin Malatya'daki etkileri yalnızca yapıların yıkılmasıyla sınırlı kalmamış; enkaz oluşumu ve yönetimi, hava kalitesi, partikül madde ve lifsi toz, su kaynakları, toprak ve yeraltı suyu, altyapı ve yeniden yapılaşma süreçleri üzerinde uzun süreli çevresel baskılar oluşturmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, deprem sonrası çevresel etkilerin çok boyutlu, birbirleriyle ilişkili ve uzun dönemli olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Çalışmanın başlıca sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Çevresel etkiler uzun dönemli olup yıkım ve enkaz kaldırma faaliyetlerinin 2026 yılında dahi devam etmesi, çevresel baskının deprem anıyla sınırlı kalmadığını göstermektedir. 2026 yılı itibarıyla Malatya'da rezerv alanlarda yıkım kararı verilen yapıların yaklaşık %90'ının yıkımı tamamlanmış olmakla birlikte, bazı ilçelerde ağır ve orta hasarlı yapıların yıkımı ve enkaz kaldırılması için yeni ihaleler yapılmaya devam etmektedir**.**
- Yıkıntı miktarı yapı özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Güncel saha araştırmalarında birim alan başına oluşan yıkıntı miktarının yaklaşık 0,845–1,107 ton/m² arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu nedenle enkaz miktarının belirlenmesinde yalnızca bina sayısının değil; yapı alanı, bina yaşı, taşıyıcı sistem ve bodrum kat özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir.
- Deprem enkazının büyük bölümü geri kazanılabilir niteliktedir. Malatya'da gerçekleştirilen 490 tonluk saha çalışmasında enkazın yaklaşık %94–97'sinin mineral esaslı olduğu, demir oranının ise yapı dönemine bağlı olarak %1,69–3,48 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu durum, uygun ayrıştırma ve geri dönüşüm süreçleriyle enkazın önemli bir bölümünün ikincil hammadde olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.
- Yıkım ve enkaz kaldırma faaliyetleri hava kalitesi açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Beton, tuğla, sıva ve benzeri yapı malzemelerinin parçalanması sırasında özellikle PM_{10}, $PM_{2.5}$ ve lifsi toz oluşumu söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle yıkım ve enkaz depolama alanlarında partikül madde emisyonlarının düzenli olarak izlenmesi gerekmektedir.

- Asbest açısından sürekli ve kontrollü izleme gereklidir. 2024 yılında gerçekleştirilen ölçümlerde incelenen örneklerde asbest lifi tespit edilmemiştir. Bununla birlikte bu bulgu tüm eski yapı stokuna genellenmemeli; özellikle eski yapılarda yıkım öncesi asbest araştırması ve kontrollü yıkım uygulamaları sürdürülmelidir.
- Su kaynaklarında deprem kaynaklı değişimler izlenmelidir. Gündüzbey kaptaj tesisinde deprem sonrasında bulanıklık meydana gelmiş, ancak yapılan laboratuvar incelemelerinde kaynağa yabancı madde karışmadığı ve suyun daha sonra deprem öncesi bulanıklık seviyelerine ulaştığı bildirilmiştir. Bu durum, deprem sonrasında içme suyu kaynaklarının fiziksel ve kimyasal açıdan düzenli olarak izlenmesinin önemini ortaya koymaktadır.
- Enkaz depolama alanları toprak ve yeraltı suyu açısından potansiyel risk taşımaktadır. Enkaz içerisinde bulunabilecek boya, plastik, elektronik malzeme, yağ ve çeşitli kimyasalların uygun olmayan koşullarda depolanması durumunda yağışlarla birlikte toprağa ve yeraltı suyuna taşınma ihtimali bulunmaktadır. Bu nedenle depolama alanlarının seçiminde yalnızca kapasite değil, hidrojeolojik özellikler, yüzey sularına uzaklık, yerleşimlere mesafe ve sızıntı kontrolü de dikkate alınmalıdır.
- Yeniden yapılaşma çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Yeni yapıların enerji verimli tasarlanması, yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması, yağmur suyu yönetiminin uygulanması ve geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin kullanımının artırılması, yeniden yapılanmanın çevresel yükünü azaltabilir.
- Malatya için uzun dönemli bir çevresel izleme programına ihtiyaç vardır. Deprem sonrası süreçte enkaz depolama alanlarında toprak ve yeraltı suyu, yıkım bölgelerinde $PM_{2.5}$ ve PM_{10}, eski yapılarda asbest, içme suyu kaynaklarında fiziksel ve kimyasal parametreler ve yeniden yapılaşma alanlarında enerji ve karbon göstergeleri düzenli olarak izlenmelidir.
- Genel olarak, 6 Şubat 2023 depremlerinin Malatya'daki çevresel etkileri çok boyutlu, birbirleriyle ilişkili ve uzun dönemli bir nitelik taşımaktadır. Bu nedenle deprem sonrası yeniden yapılaşma çalışmalarının yanında, "Deprem Sonrası Çevresel İzleme ve Yönetim Programı" oluşturulması; çevresel risklerin azaltılması, halk sağlığının korunması ve daha dirençli ve sürdürülebilir bir kentsel çevrenin oluşturulması açısından önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2023a). *6 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık ve Elbistan) depremleri saha çalışmaları ön değerlendirme raporu*. T.C. İçişleri Bakanlığı, AFAD.

World Bank. (2023). *Earthquake damage in Türkiye estimated to exceed $34 billion: World Bank disaster assessment report*. World Bank.

United Nations Development Programme (UNDP). (2023). *Türkiye-Syria earthquakes*. UNDP Türkiye.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Malatya İl Müdürlüğü. (2025). *2023 yılı Malatya il çevre durum raporu*.

Xiao, J., Deng, Q., Hou, M., Shen, J., & Gencel, O. (2023). Where are demolition wastes going: Reflection and analysis of the February 6, 2023 earthquake disaster in Turkey. *Low-carbon Materials and Green Construction, 1,* Article 17.

Adıgüzel, F. (2023). 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık 7.7 Mw ve Elbistan 7.6 Mw.) depremleri sonrası Kahramanmaraş şehrinde yaşanan partikül madde kirliliğinin incelenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi, 83*, 35–43. https://doi.org/10.17211/tcd.1354765.

Baran, A., Avcu, A. B., Gündoğdu, S. N., Sülü, M., Boz, G., Özer, A., Genç, M. F., & Kurt, O. (2024). *Malatya ilinde deprem sonrasında solunabilir havadaki asbest ve toz konsantrasyonunun incelenmesi*. 26. Ulusal 8. Uluslararası Halk Sağlığı Kongresi, Ankara, 5–7 Aralık 2024, s. 183.

Baran, A., Avcu, A. B., Sülü, M., Gündoğdu, S. N., Boz, G., Özer, A., Genç, M. F., & Kurt, O. (2026). *Assessment of dust and fibers resulting from the demolition of buildings following an earthquake*. Research Square preprint. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8682234/v1.

Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (MASKİ). (2023). *İçme suyu deprem öncesi değerlerine ulaştı: Bireysel depoların temizlenmesi gerekmektedir*. Malatya Büyükşehir Belediyesi.

World Health Organization (WHO). (2023). *Communicating risk in aftermath of earthquakes – helping Türkiye provide information and advice so people can protect themselves*. WHO Regional Office for Europe.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2023b). *06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş (Mw 7.7–Mw 7.6) depremleri raporu*. Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü.

Özçelik, K., Çetinkaya, A. T., Maçin, K. E., Güven, H., Altınbaş, M., Duman, M. Z., & Arıkan, O. A. (2026a). Field-derived unit area debris values for earthquake waste assessment: Implications from the 2023 earthquakes in Turkey. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. https://doi.org/10.1007/s10163-026-02683-4.

Özçelik, K., Övez, S. S., Maçin, K. E., & Arıkan, O. A. (2026b). Demolition waste characterization from post-earthquake controlled demolitions in Türkiye: A field-based study. *Waste Management & Research*. https://doi.org/10.1177/0734242X261451605.

Tunçbilek, E., & Çapar, G. (2025). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin içme suyu altyapı hasarları bakımından incelenmesi ve Yedisu Segmenti için bir deprem senaryosu. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*.

Anadolu Ajansı. (2023a). *Depremden etkilenen Malatya'da hasarın boyutları her geçen gün daha da belirginleşiyor*.

Anadolu Ajansı. (2024). *Malatya'da yıkılan binaların yüzde 86'sının enkazı kaldırıldı*.

Kocatürk, T., vd. (2023). Debris management in Turkey provinces affected by the 6 February 2023 earthquakes: Challenges during recovery and potential health and environmental risks. *Applied Sciences, 13*(15), 8823. https://doi.org/10.3390/app13158823.

BOR ŞEKER FABRİKASI KAZAN DAİRESİNİN GÜNCEL İŞLETME ŞARTLARINDAKİ YAKLAŞIK ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Prof. Dr. Rasim BEHÇET

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, *44280, Malatya,*

ORCID ID: 0000-0002-6897-3066

Gökhan ŞENEL

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, *44280,*

ORCID ID: 0009-0006-0739-0584

ÖZET

Bu çalışmada, Bor Şeker Fabrikası'nın güncel işletme şartları dikkate alınarak kazan dairesinin yaklaşık enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Bor Şeker Fabrikası'nda gerçekleştirilen modernizasyon çalışmaları kapsamında pancar işleme kapasitesinin günlük 3.600 ton seviyesinden 10.000 ton/gün seviyesine çıkarılması, fabrikanın enerji üretim ve tüketim sistemlerinin önemini artırmıştır. Şeker fabrikalarında proses ısısının ve elektrik enerjisinin önemli bir bölümü yüksek basınçlı buhar kazanları ve buhar türbinlerinden sağlanmaktadır. TÜRKŞEKER tarafından verilen teknik bilgilere göre şeker fabrikalarında 10–100 t/h arasında buhar üretebilen kazanlar kullanılabilmekte ve türbin girişinde yaklaşık 17–40 bar basınç ile 380–400 °C sıcaklıktaki buhar değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada Bor Şeker'in güncel 10.000 ton/gün kapasitesi temel alınmış, kamuya açık olmayan kazan debisi, yakıt tüketimi, baca gazı sıcaklığı ve gerçek işletme verileri ise literatür ve şeker endüstrisindeki tipik işletme değerlerinden yararlanılarak yaklaşık olarak belirlenmiştir. Analizde birinci yasa enerji dengesi ile ikinci yasa ekserji dengesi birlikte değerlendirilmiş; kazan, buhar türbini ve proses arasındaki enerji akışı incelenmiştir. Yaklaşık değerlendirme sonucunda kazan dairesindeki en önemli enerji kayıplarının baca gazları, kazan yüzeylerinden çevreye olan ısı kayıpları ve yanma kaynaklı tersinmezliklerden meydana geldiği; ekserji açısından ise özellikle yanma ve yüksek sıcaklık farklarının önemli ekserji yıkımına neden olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, modernizasyonla birlikte enerji verimliliğinin artırılmasının yanında, ekserji kayıplarının azaltılmasının fabrikanın toplam enerji performansının iyileştirilmesi açısından önemli olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Bor Şeker Fabrikası, enerji analizi, ekserji analizi, buhar kazanı, şeker fabrikası, enerji verimliliği.

APPROXIMATE ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF THE BOR SUGAR FACTORY BOILER HOUSE UNDER CURRENT OPERATING CONDITIONSABSTRACT

ABSTRACT

In this study, an approximate energy and exergy analysis of the boiler house was conducted, taking into account the current operating conditions of the Bor Sugar Factory. The modernization efforts at the Bor Sugar Factory—which increased the beet processing capacity from 3,600 tons per day to 10,000 tons per day—have heightened the importance of the facility's energy generation and consumption systems. In sugar factories, a significant portion of process heat and electrical energy is supplied by high-pressure steam boilers and steam turbines. According to technical data provided by TÜRKŞEKER, boilers capable of generating between 10 and 100 tons of steam per hour are utilized, and steam at pressures of approximately 17–40 bar and temperatures of 380–400°C is employed at the turbine inlet. This study is based on Bor Sugar's current capacity of 10,000 tons per day; parameters not publicly available—such

as boiler flow rate, fuel consumption, flue gas temperature, and actual operating data—were estimated using values from the literature and typical operating figures within the sugar industry. The analysis evaluated both the first-law energy balance and the second-law exergy balance, examining the energy flow between the boiler, steam turbine, and the process. The approximate assessment revealed that the most significant energy losses in the boiler house stem from flue gases, heat loss from boiler surfaces to the environment, and irreversibilities associated with combustion; regarding exergy, it was determined that combustion processes and high temperature differences, in particular, cause substantial exergy destruction. The results indicate that, alongside increasing energy efficiency through modernization, reducing exergy losses is crucial for improving the factory's overall energy performance.

Keywords: Bor Sugar Factory, energy analysis, exergy analysis, steam boiler, sugar factory, energy efficiency.

1. GİRİŞ

Şeker üretimi, hammaddenin fabrikaya kabulünden başlayarak pancarın kıyılması, ekstraksiyon, şerbetin arıtılması, evaporasyon, kristalizasyon, santrifüjleme ve şekerin kurutulmasına kadar çok sayıda ardışık prosesin gerçekleştirildiği, dolayısıyla önemli miktarda enerji tüketiminin söz konusu olduğu endüstriyel üretim alanlarından biridir. Bu proseslerin önemli bir bölümünde ısıl enerjiye ihtiyaç duyulurken, elektrik enerjisi de pompalar, fanlar, konveyörler, santrifüjler, kırıcılar ve diğer yardımcı ekipmanların çalıştırılmasında kullanılmaktadır. Özellikle evaporasyon ve kristalizasyon gibi yüksek miktarda ısı gerektiren proseslerde buhar kullanımı, fabrikanın toplam enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle şeker fabrikalarında enerji üretiminin ve kullanımının etkin bir şekilde yönetilmesi, yalnızca üretim maliyetlerinin azaltılması açısından değil, aynı zamanda yakıt tüketiminin, çevresel etkilerin ve sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından da önem taşımaktadır. Literatürde şeker üretim prosesinin enerji yoğun karakteri nedeniyle enerji ve ekserji analizlerinin birlikte kullanılmasının, sistemdeki enerji kayıplarının yanı sıra enerjinin kullanılabilirliğinin ve tersinmezliklerin belirlenmesi bakımından önemli olduğu belirtilmektedir (Ahern, 1980; Bejan et al., 1996). Enerji, termodinamiğin birinci yasası kapsamında korunan bir büyüklük olduğundan, bir sistemin enerji bilançosu giriş ve çıkış enerji miktarlarının belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte enerji analizinde enerjinin niteliği ve kullanılabilirliği doğrudan ortaya konulamamaktadır. Ekserji yaklaşımı ise bir enerji akışının çevre şartlarına göre ne ölçüde faydalı işe dönüştürülebileceğini belirlemekte ve özellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yanma, ısı transferi ve buhar üretimi gibi proseslerde meydana gelen tersinmezliklerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle enerji ve ekserji analizlerinin birlikte uygulanması, enerji sistemlerinin performansının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Şeker fabrikalarında enerji sisteminin merkezinde genellikle buhar kazanı, buhar türbini, proses buharı dağıtım sistemi ve kondensat geri dönüş sistemi bulunmaktadır. Kazanlarda yakıtın kimyasal enerjisi kullanılarak yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı buhar üretilmekte, buharın bir bölümü doğrudan proseslerde kullanılırken diğer bölümü buhar türbininden geçirilerek elektrik enerjisi üretiminde değerlendirilebilmektedir. Türbin çıkışında basıncı ve sıcaklığı düşen buharın proseslerde kullanılması, aynı enerji kaynağından hem elektrik hem de ısı elde edilmesine imkân sağlayan kojenerasyon yaklaşımını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle kazan dairesinin performansı yalnızca kazanın yakıtı buhara dönüştürme verimi ile sınırlı olmayıp, kazan–türbin–proses arasındaki bütünleşik enerji akışı ile birlikte değerlendirilmelidir. Nitekim Türkiye'deki bir model şeker fabrikası üzerinde gerçekleştirilen enerji ve ekserji çalışmasında, fabrikanın enerji ve ekserji performansının buhar sistemi ve türbin gücü ile yakından ilişkili olduğu ve buhar sistemindeki iyileştirmelerin toplam fabrika performansı üzerinde önemli etkiler oluşturabileceği ortaya konulmuştur (Taner &Sivrioğlu, 2015). Aynı çalışmada model fabrikanın toplam enerji verimi %72,2 ve toplam ekserji verimi %37,4 olarak hesaplanmış; bu sonuçlar şeker fabrikalarında enerji miktarının yanında enerji kalitesinin de dikkate alınmasının gerekliliğini göstermiştir. Özellikle buhar kazanlarında yakıtın kimyasal enerjisinin yüksek sıcaklıklı buhara dönüştürülmesi sırasında yanma, ısı transferi ve sıcaklık farklarından kaynaklanan tersinmezlikler meydana gelmektedir. Bu nedenle kazan sistemlerinde yalnızca yakıt tüketiminin azaltılması değil, aynı zamanda baca gazı kayıplarının azaltılması, besi suyu sıcaklığının yükseltilmesi, kondensatın geri

kazanılması, kazan yüzeylerindeki ısı kayıplarının azaltılması ve buharın uygun basınç seviyelerinde kullanılması da enerji ve ekserji performansının iyileştirilmesinde önem taşımaktadır.

Şeker fabrikalarının enerji ve ekserji performansına ilişkin literatürde farklı prosesler üzerinde çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Tekin ve Bayramoğlu (1998), şeker üretim prosesindeki enerji ve ekserji kayıplarının azaltılmasına yönelik bir değerlendirme yaparak üretim prosesinin farklı aşamalarındaki enerji kullanımını incelemişlerdir. Daha sonraki çalışmalarında Tekin ve Bayramoğlu (2001), şeker pancarından elde edilen şerbetin evaporasyon prosesini ekserji açısından değerlendirmiş ve buhar kullanımının proses performansı üzerindeki önemini ortaya koymuşlardır Bayrak, Midilli ve Nurveren (2003). Bu çalışmalar, özellikle şeker fabrikalarında ısı enerjisinin farklı sıcaklık seviyelerinde kullanılması nedeniyle ekserji analizinin enerji analizine önemli bir tamamlayıcı olduğunu göstermektedir. Bor Şeker Fabrikası açısından ise Bayrak, Midilli ve Nurveren (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışma özel bir önem taşımaktadır. Söz konusu çalışmada Bor Şeker Fabrikası'nın 2000–2001 dönemine ait üretim verileri kullanılarak şeker üretiminin farklı aşamalarında enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir (Dincer, 2000). Çalışmada pancar işleme, şerbet üretimi, şerbetin yoğunlaştırılması ve kristalizasyon gibi proseslerde meydana gelen enerji kayıpları ve ekserji yıkımları belirlenmiştir. Böylece Bor Şeker Fabrikası için daha önce gerçekleştirilen çalışma, fabrikanın enerji performansının termodinamik açıdan değerlendirilmesi bakımından önemli bir referans niteliği kazanmıştır. Ancak söz konusu çalışmanın 2000–2001 dönemindeki üretim teknolojisi ve işletme koşullarına dayanması, günümüzde kullanılan ekipmanların ve üretim kapasitesinin değerlendirmeye alınmasını mümkün kılmamaktadır. Aradan geçen yaklaşık yirmi beş yıllık süreçte şeker üretim teknolojilerinde, otomasyon sistemlerinde, buhar kazanlarında, evaporasyon sistemlerinde ve enerji üretim teknolojilerinde önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Dolayısıyla geçmiş döneme ait sonuçların günümüzdeki tesis koşulları açısından yeniden değerlendirilmesi, fabrikanın enerji performansındaki değişimin anlaşılması açısından önemlidir.

Bor Şeker Fabrikası'nda son yıllarda gerçekleştirilen kapasite ve teknoloji yatırımları, bu ihtiyacı daha da belirgin hale getirmiştir. Bor Şeker A.Ş. tarafından yapılan açıklamalara göre 2023/2024 bakım ve onarım döneminde başlatılan yatırım kapsamında daha önce günlük 3.600 ton pancar işleme kapasitesine sahip olan ekstraksiyon ünitesi, 10.000 ton/gün kapasiteli yeni bir ekstraksiyon ünitesi ile yenilenmiştir. Yatırımın tedarik ve montaj işlemlerinin tamamlanmasının ardından 2024/2025 üretim sezonunda 10.000 ton/gün pancar işleme kapasitesine ulaşılması planlanmıştır. Şirket tarafından bu yatırımın temel amaçları arasında üretim kayıplarının azaltılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve üretim verimliliğinin artırılması gösterilmiştir. Bu kapasite artışı, fabrikanın yalnızca pancar işleme miktarını artırmakla kalmayıp, buna bağlı olarak ihtiyaç duyulan buhar ve elektrik enerjisinin de yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Nitekim daha yüksek kapasitede üretim yapılması, kazan dairesinden proseslere daha fazla ve daha kararlı bir buhar akışının sağlanmasını gerektirmektedir. Bu durum, kazan kapasitesinin, buhar üretim basıncının, türbin çalışma koşullarının ve kondensat geri kazanımının fabrikanın genel enerji performansı açısından daha önemli hale gelmesine neden olmaktadır.

Bor Şeker'in enerji altyapısında gerçekleştirilen yeni yatırımlar da kazan dairesinin güncel analiz açısından önemini artırmaktadır. Şirket tarafından yayımlanan enerji verimliliği bilgilerine göre mevcut iki buhar kazanına ilave olarak 75 ton/saat kapasiteli akışkan yataklı yeni bir buhar kazanının devreye alınması planlanmış ve bu kazanla daha düşük yakıt tüketimiyle daha fazla buhar üretilmesi hedeflenmiştir. Yeni kazanda üretilen yüksek basınçlı buharın bir bölümünün doğrudan proseslerde kullanılması, kalan bölümünün ise buhar türbini üzerinden geçirilerek elektrik enerjisine dönüştürülmesi öngörülmektedir. Böylece fabrikanın ısı ve elektrik ihtiyacının birlikte karşılanmasına dayalı bir kojenerasyon altyapısının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, şeker fabrikalarında enerji yönetiminin yalnızca yakıt tüketiminin azaltılması şeklinde değil, yakıtın mümkün olan en yüksek faydayı sağlayacak şekilde değerlendirilmesi şeklinde ele alınması gerektiğini göstermektedir. Özellikle yüksek basınçlı buharın önce türbinde elektrik üretiminde kullanılması ve daha sonra daha düşük basınç ve sıcaklıktaki buharın proses ısısı olarak değerlendirilmesi, aynı enerji girdisinden birden fazla faydalı çıktı elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle kazan dairesinin ekserji performansının belirlenmesi, enerjinin hangi aşamalarda ve hangi nedenlerle kullanılabilirliğini kaybettiğinin ortaya çıkarılması bakımından ayrıca önem taşımaktadır.

Güncel Bor Şeker Fabrikası açısından enerji ve ekserji analizinin yapılmasındaki temel güçlüklerden biri, işletmeye ait bütün anlık termodinamik ölçümlerin kamuya açık olmamasıdır. Kazan yakıt tüketimi, gerçek buhar debisi, baca gazı sıcaklığı ve bileşimi, besi suyu sıcaklığı, kondensat dönüş oranı, türbin giriş ve çıkış koşulları ile gerçek elektrik üretimi gibi parametrelerin tamamına ilişkin güncel ölçüm verilerine açık kaynaklardan ulaşılması mümkün değildir. Bu nedenle mevcut çalışmada fabrikanın güncel 10.000 ton/gün pancar işleme kapasitesi temel alınarak, eksik termodinamik parametrelerin şeker endüstrisindeki benzer tesislere ait literatür değerleri ve mühendislik kabulleri kullanılarak yaklaşık olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Böyle bir yaklaşım, gerçek işletme ölçümlerinin yerini tutmamakla birlikte, fabrikanın enerji sisteminin genel davranışının değerlendirilmesine ve enerji-ekserji kayıplarının hangi noktalarda yoğunlaşabileceğinin belirlenmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca literatürde gerçek bir şeker fabrikasının ölçüm verileri kullanılarak yapılan enerji-ekserji analizlerinin benzer tesisler için karşılaştırma ve performans değerlendirme amacıyla kullanılabileceği belirtilmektedir. Bu kapsamda çalışmanın amacı, Bor Şeker Fabrikası'nın güncel üretim kapasitesi dikkate alınarak kazan dairesinin enerji ve ekserji performansını yaklaşık olarak belirlemek, enerji kayıpları ile ekserji yıkımlarının temel kaynaklarını ortaya koymak ve elde edilen sonuçları geçmiş dönem Bor Şeker verileri ile şeker endüstrisindeki benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırabilecek bir termodinamik değerlendirme çerçevesi oluşturmaktır. Çalışmadan elde edilecek sonuçların, özellikle kazan veriminin artırılması, baca gazı enerjisinin geri kazanılması, kondensat dönüşünün iyileştirilmesi, buhar-türbin entegrasyonunun geliştirilmesi ve proseslerdeki enerji kullanımının optimize edilmesi açısından yol gösterici olması beklenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Bor Şeker Fabrikası'nın revize edilmiş güncel işletme şartlarındakikazan dairesinin enerji ve ekserji performansının yaklaşık olarak belirlenmesi amacıyla termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayalı bir analiz yöntemi uygulanmıştır. Çalışmanın temel sistem sınırı; yakıtın kazana girişi, yanma havasının sisteme beslenmesi, kazan içerisinde buhar üretimi, baca gazlarının sistemden çıkışı, üretilen yüksek basınçlı buharın proses ve/veya buhar türbini sistemine gönderilmesi ile besi suyu ve kondensatın kazana geri dönüşünü kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Bor Şeker Fabrikası'nda daha önce gerçekleştirilen enerji ve ekserji çalışmalarında da şeker üretim sistemi sürekli akışlı açık termodinamik sistem olarak değerlendirilmiş ve enerji ile birlikte ekserji kayıplarının belirlenmesine yönelik birinci ve ikinci yasa analizleri uygulanmıştır (Bayrak et al., 2003). Bu çalışmada ise geçmiş dönemlere ait işletme verilerinin doğrudan güncel tesise aktarılması yerine, fabrikanın günümüzdeki yüksek üretim kapasitesi ve kazan altyapısı dikkate alınarak yaklaşık bir mühendislik modeli oluşturulmuştur.

Analizin başlangıç noktası olarak fabrikanın güncel üretim kapasitesi ve bu kapasiteye hizmet eden buhar üretim sistemi dikkate alınmıştır. Bor Şeker Fabrikası'nda geçmişte yaklaşık 3.600 ton/gün seviyesinde olan ekstraksiyon kapasitesinin 10.000 ton/gün seviyesine çıkarılmasına yönelik yatırım gerçekleştirilmiş ve yeni sistemin işletmeye alınmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapasite, 24 saatlik sürekli çalışma kabulü altında yaklaşık 416,7 ton şeker pancarının saatlik olarak işlenmesine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla kazan dairesinin enerji ihtiyacı değerlendirilirken yalnızca kazan kapasitesi değil, buharın ekstraksiyon, şerbet arıtma, evaporasyon, kristalizasyon ve diğer yardımcı proseslerde kullanılacağı bütünleşik üretim yapısı dikkate alınmıştır. Çalışmada temel amaç, 10.000 ton/gün üretim kapasitesine karşılık gelen işletme koşullarında kazan dairesinin yaklaşık enerji girişini, yararlı enerji çıktısını, baca gazı ve diğer kayıpları ile birlikte ekserji girişini ve ekserji yıkımını belirlemektir.

Kazan sisteminin termodinamik modeli oluşturulurken kontrol hacmi yaklaşımı kullanılmıştır. Kararlı rejimde ve kinetik-potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edilebilir olduğu kabulü altında sürekli akışlı bir kontrol hacmi için enerji dengesi genel olarak

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{çc} h_{çc} - \sum \dot{m}_g h_g \qquad (1)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada (Q̇) sisteme aktarılan ısı miktarını, (Ẇ) sistemden elde edilen net işi, (ṁ) kütlesel debiyi ve (h) özgül entalpiyi göstermektedir. Kazan özelinde yakıtın kimyasal enerjisinin yanma sonucunda su-buhar sistemine aktarılması temel enerji dönüşümü olarak kabul edilmiştir. Bu kapsamda kazanın birinci yasa enerji verimi, yararlı olarak buhara aktarılan enerji miktarının yakıtın kazana sağladığı toplam enerjiye oranı olarak tanımlanmıştır. Yakıtın alt ısıl değeri kullanılarak yaklaşık yakıt enerji girdisi

$$\dot{E}_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt}\, LHV \tag{2}$$

Şeklinde hesaplanmış; buhar üretimi için kullanılan enerji ise buharın ve besi suyunun entalpi farkından yararlanılarak

$$\dot{E}_{buhar} = \dot{m}_{buhar}(h_{buhar} - h_{besi\,suyu}) \tag{3}$$

bağıntısıyla belirlenmiştir. Böylece yaklaşık kazan enerji verimi,

$$\eta_1 = \frac{\dot{E}_{buhar}}{\dot{E}_{yakıt}} \text{x } 100 \tag{4}$$

ifadesiyle hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, şeker fabrikalarında buhar üretim sistemlerinin enerji performansının belirlenmesinde kullanılan klasik birinci yasa yönteminin güncel işletme koşullarına uyarlanmış şeklidir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Enerji analizinden farklı olarak ekserji analizi, enerji miktarının yanında enerjinin iş yapabilme potansiyelini ve sistem içerisindeki tersinmezlikleri dikkate almaktadır. Bu nedenle özellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yanma, ısı transferi, baca gazı çıkışı, buhar üretimi ve türbin genişlemesi gibi işlemlerde oluşan kalite kayıplarının belirlenmesi açısından ekserji analizi önem taşımaktadır. Çevre referans durumu için (T_0=298,15) K ve (P_0=101,325) kPa alınmıştır. Bir akışın fiziksel özgül ekserjisi,

$$e_x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \tag{5}$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır. Burada (h_0) ve (S_0), akışkanın çevre referans koşullarındaki özgül entalpi ve entropi değerlerini; (h) ve (s) ise ilgili termodinamik durumdaki entalpi ve entropi değerlerini göstermektedir. Buna göre bir akışın ekserji debisi

$$\dot{E}_x = \dot{m} e_x \tag{6}$$

olarak hesaplanmıştır. Yakıtın kimyasal ekserjisinin de dikkate alındığı durumlarda yakıtın kimyasal yapısına bağlı ekserji değeri enerji girdisine eklenmiş; ancak kamuya açık güncel işletme verilerinin sınırlı olması nedeniyle sonuçların yorumlanmasında kullanılan sınır açıkça belirtilmiştir.

Kazan dairesinin ekserji dengesi ise sisteme giren toplam ekserji ile sistemden çıkan ekserjiler arasındaki fark üzerinden kurulmuştur. Genel olarak kararlı rejim için ekserji yıkımı,

$$\dot{E}_{x_{yakıt}} = \sum \dot{E}_{x_{giren\,ç}} - \sum \dot{E}_{x_{çıkan\,ç}} \tag{7}$$

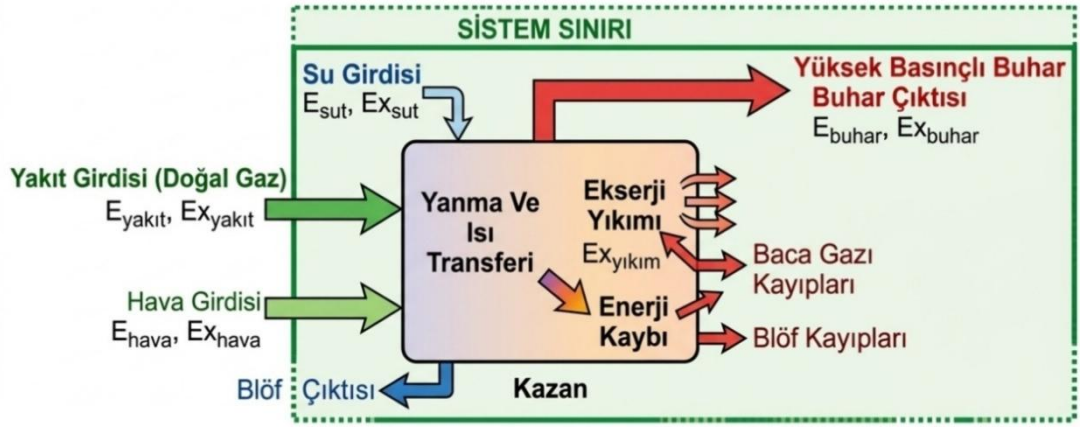
şeklinde hesaplanmıştır. Ekserji yıkımı, sistem içerisindeki tersinmezliklerin bir göstergesi olup pozitif olması beklenmektedir. Ayrıca ekserjetik verim,

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_{x_{ürün}}}{\dot{E}_{x_{giren\,ç}}}\, x\, 100 \tag{8}$$

bağıntısıyla belirlenmiştir. Bu yöntemde özellikle kazana giren yakıt ve besi suyunun ekserjileri ile kazandan çıkan buhar ve baca gazlarının ekserjileri karşılaştırılmıştır. Böylece enerjinin nicel olarak korunmasına rağmen kullanılabilirlik bakımından ne kadarının kaybedildiği ortaya konulmuştur. Daha önce Bor Şeker Fabrikası verileri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada da birinci ve ikinci yasa analizlerinin birlikte uygulanmasının, enerji kayıplarının yanında ekserji kayıplarının yerinin ve büyüklüğünün belirlenmesine olanak sağladığı gösterilmiştir (Bayrak et al., 2003).

Hesaplamalarda buhar ve suyun termodinamik özellikleri, ilgili sıcaklık ve basınç değerlerine karşılık gelen buhar tablolarından alınacak entalpi ve entropi değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Kazan girişindeki besi suyu, kazandan çıkan yüksek basınçlı buhar, türbin giriş ve çıkışındaki buhar ile baca gazı temel akış noktaları olarak tanımlanmıştır. Buhar türbini bulunması durumunda türbin girişindeki yüksek basınçlı buharın bir kısmının genleşerek mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürüldüğü, türbin çıkışındaki düşük basınçlı buharın ise proses ısısının karşılanmasında kullanıldığı kabul edilmiştir. Böylece kazan–türbin–proses hattı birlikte değerlendirilerek kojenerasyon yapısının toplam enerji ve ekserji performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu yaklaşım, şeker fabrikalarında buhar üretimi ile elektrik üretiminin birbirinden bağımsız değil, aynı termodinamik sistemin birbirini tamamlayan bölümleri olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Mevcut çalışmada kullanılan işletme parametrelerinin önemli bir bölümü doğrudan saha ölçümlerinden değil, fabrikanın güncel kapasitesi, mevcut teknolojik altyapısı, literatürdeki benzer şeker fabrikası uygulamaları ve mühendislik kabullerinden oluşturulmuştur. Bu nedenle hesaplanan enerji ve ekserji değerleri "yaklaşık işletme sonuçları" olarak değerlendirilmiş ve gerçek zamanlı saha performansı olarak sunulmamıştır. Özellikle yakıt debisi, gerçek buhar üretim debisi, baca gazı sıcaklığı ve bileşimi, besi suyu sıcaklığı, kondensat geri dönüş oranı, türbin giriş-çıkış basınçları ve gerçek elektrik üretimi gibi parametrelerin sürekli ölçülmesi durumunda model sonuçlarının daha yüksek doğrulukla güncellenmesi mümkündür. Bu sınırlama, çalışmanın sonuçlarının yorumlanmasında dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, daha önce Bor Şeker Fabrikası üzerinde yapılan enerji-ekserji çalışmaları, aynı tesis için referans oluşturabilecek önemli bir termodinamik veri tabanı sağlamaktadır. Bayrak vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada şeker üretim aşamalarının birinci ve ikinci yasa açısından incelenmiş olması, güncel kapasiteye dayalı bu çalışmanın tarihsel bir karşılaştırma yapmasına da olanak sağlamaktadır (Bayrak et al., 2003).



Şekil 1. Bor Şeker Fabrikası kazan ünitesinin enerji ve ekserji analizi için kontrol hacmi

Son olarak, oluşturulan model üzerinden üç temel performans göstergesi değerlendirilmiştir: (i) kazan enerji verimi, (ii) kazan ve buhar sisteminin ekserjetik verimi ve (iii) toplam ekserji yıkımı**.** Bu göstergeler yardımıyla yakıt enerjisinin ne kadarının kullanılabilir buhar enerjisine dönüştürüldüğü, yüksek kaliteli enerjinin hangi aşamalarda kaybedildiği ve tersinmezliklerin hangi ekipmanlarda yoğunlaşabileceği belirlenmiştir. Ayrıca baca gazı kayıpları, ısı transferindeki sıcaklık farkları, kazan yüzeylerinden çevreye olan ısı kayıpları, buharın kısılması veya basınç düşümleri, türbin verimi ve

kondensat geri kazanım oranı gibi parametrelerin sistem performansına etkisi nitel ve nicel olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntem sayesinde yalnızca toplam enerji tüketiminin belirlenmesi değil, aynı zamanda enerji kalitesindeki kayıpların ve iyileştirme potansiyelinin ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Böylece sonraki bölümde sunulacak sonuçların, Bor Şeker Fabrikası'nın güncel 10.000 ton/gün kapasitesi ve modernize edilen buhar üretim altyapısı dikkate alınarak değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Tablo 1. Yaklaşık enerji ve ekserji analizinde kullanılan temel sistem sınırı ve değişkenler

Sistem/Akış Noktası	Temel Parametreler	Analizdeki Kullanım Amacı
Yakıt girişi	$\dot{m}_{yakıt}$	Enerji ve kimyasal ekserji girdisi
Yanma havası	$\dot{m}_{hava}$, T, p	Yanma ve baca gazı hesabı
Besi suyu	$\dot{m}_{su}$, T, p	Kazan enerji girdisi
Kazan çıkışı	$\dot{m}_{buhar}$, T, p	Yararlı enerji ve ekserji çıktısı
Baca gazı	$\dot{m}_{bg}$, T_bg	Baca gazı enerji/ekserji kaybı
Türbin girişi	$\dot{m}_{tg}$, T, p	Elektrik üretim potansiyeli
Türbin çıkışı	$\dot{m}_{tç}$, T, p	Proses buharı ve ekserji analizi
Kondensat dönüşü	$\dot{m}_{kd}$, T, p	Enerji geri kazanımının belirlenmesi
Çevre	T_0 = 298,15 K, p_0 = 101,325 kPa	Ekserji referans durumu

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Bor Şeker Fabrikası'nın revize edilmiş güncel işletme şartlarını temsil etmek üzere 10.000 ton/gün pancar işleme kapasitesi ve yaklaşık 75 t/h buhar üretim kapasiteli kazan sistemi esas alınarak yaklaşık enerji ve ekserji değerlendirmesi yapılmıştır. Hesaplamalarda gerçek zamanlı işletme ölçümlerinin tamamına ulaşılamaması nedeniyle yakıt debisi, buhar debisi, baca gazı sıcaklığı ve diğer bazı parametreler mühendislik kabulü olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar kesin saha performansı yerine yaklaşık işletme senaryosu şeklinde ele alınmıştır. 10.000 ton/gün kapasite, 24 saatlik sürekli çalışma kabulüyle yaklaşık 416,7 ton/h pancar işleme kapasitesine karşılık gelmektedir. Bu kapasite artışı, önceki dönemlerdeki 3.600 ton/gün seviyesine göre yaklaşık 2,78 katlık bir üretim kapasitesi artışı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla kazan dairesinin yalnızca toplam buhar üretimi açısından değil, buharın proses içerisindeki kullanım biçimi açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir.

3.1. Kazan Sisteminin Yaklaşık Enerji Performansı

75 t/h nominal buhar üretim kapasitesinin tamamının sürekli olarak kullanılmadığı, ortalama işletme yükünün yaklaşık %80 olduğu kabul edildiğinde gerçek çalışma koşullarını temsil eden yaklaşık buhar debisi 60 t/h olarak alınabilir. Bu durumda kazan sisteminin saatlik buhar üretimi yaklaşık 60.000 kg/h olmaktadır. Besi suyu sıcaklığının yaklaşık 105°C, üretilen yüksek basınçlı buharın ortalama sıcaklığının ise yaklaşık 250–260°C mertebesinde olduğu mühendislik kabulüyle, suyun buharlaştırılması ve kızdırılması için gerekli özgül entalpi artışı yaklaşık 2.300–2.500 kJ/kg aralığında değerlendirilebilir. Buna göre buhar üretimi için gerekli yararlı ısıl güç yaklaşık 38–42 MW mertebesindedir. Kazan enerji veriminin %80–85 aralığında olduğu kabul edildiğinde yakıt tarafından sağlanması gereken toplam ısıl güç yaklaşık 45–52 MW arasında olmaktadır. Bu sonuçlar, 75 t/h kapasiteli bir buhar kazanının yüksek yükte çalıştığı bir şeker fabrikası için mühendislik açısından makul bir enerji büyüklüğüne işaret etmektedir.

Tablo 2. Kazan sistemi için kullanılan yaklaşık işletme kabulleri

Parametre	Yaklaşık değer	Açıklama
Pancar işleme kapasitesi	10.000 ton/gün	Güncel kapasite senaryosu
Saatlik pancar kapasitesi	416,7 ton/h	24 h/gün kabulü
Kazan nominal kapasitesi	75 ton/h	Buhar üretim kapasitesi
Ortalama kazan yükü	%80	Mühendislik kabulü
Yaklaşık buhar debisi	60 ton/h	75 × 0,80
Besi suyu sıcaklığı	≈105 °C	Kabul
Buhar sıcaklığı	≈250–260 °C	Kabul
Yararlı buhar enerjisi	≈38–42 MW	Yaklaşık
Yakıt enerji girdisi	≈45–52 MW	Kazan verimine bağlı
Yaklaşık kazan enerji verimi	%80–85	Senaryo aralığı

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, kazan sisteminde enerji açısından en önemli kayıp kaleminin baca gazları olduğu görülmektedir. Yanma sonucunda oluşan yüksek sıcaklıktaki baca gazlarının çevreye atılması, yakıtın önemli bir bölümünün kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeden sistemden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bunun yanında kazan dış yüzeylerinden çevreye olan ısı kayıpları, blöf kayıpları, eksik veya ideal olmayan yanma, radyasyon ve taşınım yoluyla oluşan kayıplar da toplam enerji bilançosunda yer almaktadır. Bu nedenle kazan enerji veriminin yalnızca yakıt tüketimi ile değil, baca gazı sıcaklığı, fazla hava oranı, kazan yükü ve besi suyu sıcaklığı gibi parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle besi suyu sıcaklığının yükseltilmesi ve baca gazındaki duyulur ısının ekonomizer veya hava ön ısıtıcı gibi sistemlerle geri kazanılması, aynı buhar üretiminin daha düşük yakıt tüketimiyle gerçekleştirilmesine olanak sağlayabilir.

3.2. Enerji Kayıplarının Dağılımı

Yaklaşık enerji bilançosu açısından sisteme giren yakıt enerjisinin tamamı buhar enerjisine dönüşmemektedir. Yaklaşık %82 enerji verimi kabul edilen bir işletme senaryosunda, yakıt enerjisinin %82'si yararlı buhar üretimine aktarılırken yaklaşık %18'i çeşitli kayıplar şeklinde sistemden ayrılmaktadır. Bu kayıpların yaklaşık %10–12'lik bölümünün baca gazı ile, % 3–4'lük bölümünün kazan yüzeylerinden çevreye ısı geçişi ve radyasyon ile, kalan % 2–4'lük bölümünün ise blöf, yanma ve diğer yardımcı kayıplar nedeniyle oluştuğu varsayılabilir. Bu dağılım ölçülmüş işletme verisi değil, enerji bilançosunu göstermek amacıyla oluşturulan mühendislik senaryosudur.

Tablo 3. Yaklaşık enerji bilançosu

Enerji kalemi	Yaklaşık oran (%)	Değerlendirme
Yararlı buhar enerjisi	82	Ana enerji çıktısı
Baca gazı kaybı	11	En önemli kayıp kalemi
Kazan yüzey/radyasyon kayıpları	3	Çevreye ısı geçişi
Blöf ve diğer kayıplar	2	Su ve yardımcı kayıplar
Yanma/diğer kayıplar	2	Yanma ve işletme koşulları
Toplam	100	—

Tablo 3'teki dağılım, kazan sisteminde enerji verimliliğini artırmak için öncelikle baca gazı kayıplarının azaltılmasının önemli olduğunu göstermektedir. Baca gazı sıcaklığının gereğinden yüksek olması, kazan içerisinde gerçekleşen ısı transferinin yeterince etkin olmadığını veya mevcut ısının geri kazanılmadan atmosfere atıldığını gösterebilir. Bu nedenle ekonomizer, hava ön ısıtıcı ve uygun izolasyon uygulamaları gibi teknolojilerin kullanılması yakıt tüketiminin azaltılması açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte, baca gazı sıcaklığının aşırı düşürülmesi durumunda yoğuşma, korozyon ve çekiş problemleri ortaya çıkabileceğinden, geri kazanım sisteminin yakıtın özellikleri ve baca gazının çiğ noktası dikkate alınarak tasarlanması gerekir.

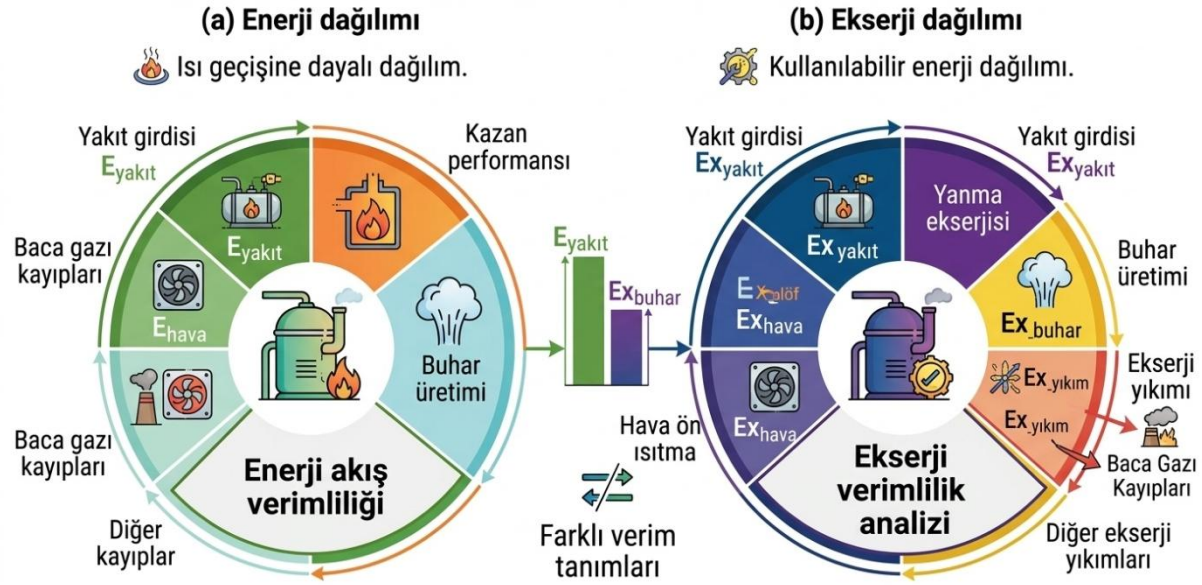
3.3. Ekserji Analizi ve Ekserji Yıkımı

Enerji bilançosundan farklı olarak ekserji bilançosu incelendiğinde, kayıpların yalnızca miktar bakımından değil, enerji kalitesi bakımından da değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Kazan sisteminde en yüksek ekserji yıkımının yanma bölgesinde gerçekleşmesi beklenmektedir. Bunun temel nedeni yakıtın kimyasal enerjisinin yüksek sıcaklıktaki yanma ürünlerine dönüştürülmesi sırasında meydana gelen büyük sıcaklık farkları ve tersinmezliklerdir. Bunun yanında yakıt-hava karışımının ideal olmayan yanması, baca gazlarının yüksek sıcaklıkta çevreye atılması ve suyun yüksek sıcaklıktaki buhara dönüştürülmesi sırasında oluşan sonlu sıcaklık farkları da ekserji yıkımını artırmaktadır.

Yaklaşık senaryoda yakıtın toplam ekserji girdisi %100 kabul edildiğinde, bunun yaklaşık %40–50'sinin yararlı buhar ekserjisine dönüştüğü, kalan bölümün ise yanma, ısı transferi, baca gazı ve diğer tersinmezlikler nedeniyle yok olduğu kabul edilebilir. Bu değerler gerçek ölçüm sonucu değil, sistemin ikinci yasa davranışını göstermek amacıyla kullanılan yaklaşık mühendislik aralığıdır. Özellikle yakıtın kimyasal ekserjisi ile üretilen buharın fiziksel ekserjisinin doğrudan karşılaştırılması, enerji veriminin yüksek olmasına rağmen ekserjetikverimin neden daha düşük olabildiğini açıklamaktadır.

Tablo 4. Yaklaşık ekserji bilançosu

Ekserji bileşeni	Yaklaşık oran (%)	Temel neden
Yararlı buhar ekserjisi	45	Buharın kullanılabilir enerji potansiyeli
Yanma kaynaklı ekserji yıkımı	32	Büyük sıcaklık farkları ve tersinmez yanma
Baca gazı ekserjisi	12	Yüksek sıcaklıkta gaz çıkışı
Isı transferi ve yüzey kayıpları	5	Sonlu sıcaklık farkları
Diğer ekserji yıkımları	6	Blöf, karışım ve yardımcı süreçler
Toplam	100	—



Şekil 2. Kazan Performansının Birinci ve İkinci Yasa Açısından Karşılaştırmalı Grafiği:

(a) Enerji Dengesi, (b) Ekserji Dengesi

Tablo 4'te görüldüğü gibi, enerji bilançosunda küçük görünen bazı kayıplar ekserji açısından daha önemli hale gelebilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yanma ve ısı transferi işlemleri, enerji miktarının korunmasına rağmen enerjinin iş yapabilme kapasitesinin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kazan sisteminin yalnızca birinci yasa verimi üzerinden değerlendirilmesi, iyileştirme potansiyelinin tamamının ortaya çıkarılması açısından yeterli değildir.

Bor Şeker Fabrikası'nın geçmiş işletme verileriyle gerçekleştirilen çalışmada da ekserji kayıplarının özellikle şerbet üretimi ve buhar üretimiyle ilişkili alt süreçlerde yoğunlaştığı ve sonlu sıcaklık farklarının önemli bir tersinmezlik kaynağı olduğu bildirilmiştir (Bayrak et al., 2003).

3.4. Buhar Türbini ve Kojenerasyonun Sisteme Etkisi

Kazan dairesinin toplam enerji performansı değerlendirilirken üretilen yüksek basınçlı buharın yalnızca proses ısısı amacıyla kullanılmadığı, uygun koşullarda bir bölümünün buhar türbininden geçirilerek elektrik üretiminde değerlendirildiği dikkate alınmalıdır. Bu yapı, elektrik ve ısı enerjisinin aynı yakıt girdisinden birlikte elde edilmesine olanak sağladığından kojenerasyon açısından önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Yüksek basınçlı buharın türbinde kontrollü olarak genişletilmesi sonucunda elektrik üretimi sağlanırken türbin çıkışındaki düşük basınçlı buharın proseslerde kullanılması, buharın enerji kullanım zincirinin devam etmesini sağlar. Böylece yalnızca elektrik üretmek amacıyla kullanılan klasik bir çevrime göre proses ısısının da değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Ancak türbin giriş ve çıkış basınçlarının, buhar debisinin ve prosesin ihtiyaç duyduğu buhar basıncının birlikte optimize edilmesi gerekir. Türbinde daha fazla elektrik üretmek için buharın aşırı genişletilmesi, proses tarafında gerekli basınç ve sıcaklığın sağlanamamasına neden olabilir. Bu nedenle elektrik üretiminin artırılması ile proses buharı ihtiyacının karşılanması arasında optimum bir işletme noktası bulunmaktadır.

3.5. Güncel Sistem ile Geçmiş Dönem Çalışmalarının Karşılaştırılması

Bor Şeker Fabrikası üzerine yapılan önceki enerji ve ekserji çalışmaları ile güncel kapasiteye dayalı bu çalışma arasında önemli bir teknoloji ve kapasite farkı bulunmaktadır. Bayrak vd. (2003) tarafından 2000–2001 dönemine ait işletme verileri kullanılarak yapılan çalışmada tüm şeker üretim aşamaları birinci ve ikinci yasa yaklaşımıyla incelenmiş ve özellikle şerbet üretim aşamasında ekserji kayıplarının yoğunlaştığı belirlenmiştir [7]. Günümüzde ise üretim kapasitesinin önemli ölçüde artırılmış olması ve daha modern buhar üretim teknolojilerinin kullanılması, geçmiş sonuçların doğrudan güncel işletme performansı olarak kabul edilmesini engellemektedir. Bununla birlikte, geçmiş çalışma güncel sistem için karşılaştırma ve eğilim değerlendirmesi açısından önemli bir referans oluşturmaktadır. Yeni sistemde kapasite artışıyla birlikte birim ürün başına enerji tüketiminin azaltılması hedeflenirken, toplam enerji tüketiminin üretim miktarındaki artış nedeniyle mutlak olarak artması mümkündür. Bu nedenle modernizasyonun başarısı yalnızca toplam yakıt tüketimi ile değil, ton pancar başına yakıt tüketimi, ton pancar başına buhar tüketimi, ton şeker başına elektrik tüketimi ve birim ürün başına ekserji yıkımı gibi özgül göstergeler üzerinden değerlendirilmelidir.

Tablo 5. Enerji ve ekserji performansının değerlendirilmesinde önerilen göstergeler

Performans göstergesi	Birim	Değerlendirme amacı
Kazan enerji verimi	%	Yakıtın buhara dönüşüm performansı
Ekserjetik verim	%	Enerji kalitesinin korunması
Özgül yakıt tüketimi	kg yakıt/ton pancar	Yakıt kullanım etkinliği
Özgül buhar tüketimi	kg buhar/ton pancar	Proses buhar ihtiyacı
Özgül elektrik tüketimi	kWh/ton pancar	Elektrik kullanım performansı
Özgül ekserji yıkımı	kWh/ton pancar	Tersinmezliklerin karşılaştırılması
Baca gazı sıcaklığı	°C	Atık ısı potansiyeli
Kondensat geri dönüş oranı	%	Isı ve su geri kazanımı

Genel olarak değerlendirildiğinde, oluşturulan yaklaşık model Bor Şeker Fabrikası kazan dairesinde enerji performansının yalnızca kazan verimiyle açıklanamayacağını göstermektedir. Kazan, buhar türbini, proses buharı ve kondensat dönüşünün birlikte ele alındığı entegre bir enerji sistemi yaklaşımı daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Özellikle baca gazı ısısının geri kazanılması, besi suyu sıcaklığının artırılması, kondensat dönüş oranının yükseltilmesi, kazan yüzey izolasyonlarının iyileştirilmesi, yanma

havası oranının optimum seviyede tutulması ve buhar türbininin proses ihtiyacıyla uyumlu çalıştırılması sistemin toplam performansını artırabilecek başlıca uygulamalar olarak öne çıkmaktadır. Ekserji açısından ise en önemli iyileştirme alanları, yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yanma ve ısı transferlerindeki tersinmezliklerin azaltılmasıdır. Bu sonuç, Bor Şeker Fabrikası için geçmişte yapılan enerji-ekserji çalışmasının sonlu sıcaklık farklarının önemli bir tersinmezlik kaynağı olduğu yönündeki bulgusuyla da uyumludur (Bayrak et al., 2003).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Bu çalışmada Bor Şeker Fabrikası'nın revize edilmiş güncel işletme şartlarında kazan dairesinin yaklaşık enerji ve ekserji performansı, termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları kullanılarak değerlendirilmiş olup çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Bor Şeker Fabrikası'nın 10.000 ton/gün pancar işleme kapasitesi ve yaklaşık 75 ton/h buhar üretim kapasiteli kazan sistemi esas alınarak yaklaşık enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir.
- Gerçek zamanlı işletme verilerinin tamamına ulaşılamadığından, hesaplamalar mühendislik kabulleri ve literatürdeki benzer uygulamalar temelinde yapılmıştır. Bu nedenle sonuçlar, gerçek saha performansının kesin değerleri yerine yaklaşık mühendislik sonuçları olarak değerlendirilmelidir.
- Kazanın yaklaşık %80 yükte çalışması durumunda 60 ton/h civarında buhar üretilebileceği ve kazan enerji veriminin yaklaşık **%82** seviyesinde olabileceği öngörülmüştür.
- Enerji analizinde en önemli kayıp kaynağının baca gazlarıyla taşınan ısı olduğu; bunu kazan yüzeylerinden çevreye olan ısı kayıpları, blöf ve diğer işletme kayıplarının izlediği değerlendirilmiştir.
- Ekserji analizine göre özellikle yanma ve yüksek sıcaklık farklarının meydana geldiği ısı transferi süreçlerinde önemli ekserji yıkımları oluşmaktadır.
- Bu sonuç, yalnızca birinci yasa temelindeki enerji veriminin sistem performansını değerlendirmede yeterli olmadığını, ikinci yasa yani ekserji analizinin de birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.
- Geçmişte Bor Şeker Fabrikası için yapılan enerji ve ekserji çalışmaları, günümüzdeki yüksek üretim kapasitesi ve modernize edilmiş buhar üretim altyapısı nedeniyle doğrudan güncel performans göstergesi olarak değil, karşılaştırmalı referans olarak değerlendirilmelidir.

4.2. Performans artırmaya yönelik öneriler

- Baca gazı ısısının ekonomizer veya hava ön ısıtıcılarla geri kazanılması önerilebilir.
- Kazan yüzeylerindeki ısı kayıplarının ve çevreye olan enerji transferinin azaltılmasısağlanmalı.
- Yanma havası oranının ve yakıt-hava karışımının optimum seviyede tutulması, yanma kaynaklı kayıpların ve ekserji yıkımının azaltılmasına katkı sağlayabilir.
- Kondensat dönüş oranının artırılması ve besi suyu sıcaklığının yükseltilmesi enerji verimliliğini iyileştirebilir.
- Blöf miktarının optimum seviyeye indirilmesi, gereksiz enerji ve ekserji kayıplarının azaltılması açısından önemlidir.
- Yüksek basınçlı buharın türbin üzerinden geçirilerek elektrik üretiminde değerlendirilmesi, türbin çıkışındaki buharın ise proseslerde kullanılması önerilmektedir.
- Kazan–türbin–proses bütünlüğünün birlikte değerlendirilmesi ve elektrik üretimi ile proses buharı ihtiyacı arasındaki optimum işletme noktasının belirlenmesi önem taşımaktadır.

- Gelecekte yapılacak çalışmalarda yakıt debisi, buhar debisi, buhar basıncı ve sıcaklığı, baca gazı sıcaklığı ve bileşimi, besi suyu sıcaklığı, kondensat dönüş oranı, türbin giriş-çıkış koşulları ve gerçek elektrik üretim değerlerinin eş zamanlı ölçülmesi önerilmektedir.
- Gerçek işletme verilerinin elde edilmesiyle mevcut yaklaşık kabullerin ortadan kaldırılması ve daha güvenilir, gerçek saha koşullarını temsil eden enerji-ekserji modelinin oluşturulması mümkün olacaktır.
- Genel olarak, enerji ve ekserji analizinin birlikte kullanılması, yakıt tüketiminin azaltılması, atık ısının geri kazanılması, elektrik ve proses ısısının daha etkin kullanılması ve birim pancar başına enerji tüketiminin düşürülmesi açısından önemli bir değerlendirme altyapısı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Ahern, J. (1980). *The exergy method of energy systems analysis*. John Wiley & Sons.

Bayrak, M., Midilli, A., & Nurveren, K. (2003). Energy and exergy analyses of sugar production stages. *International Journal of Energy Research, 27*(11), 989–1001. https://doi.org/10.1002/er.916

Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons.

Bor Şeker A.Ş. (2024). *Teknolojik üretim ekipmanı yatırımları: 10.000 ton/gün ekstraksiyon ünitesi*.

Dincer, I. (2000). Thermodynamics, exergy and environmental impact. *Energy Sources, 22*(2), 107–120.

Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). *Exergy: Energy, environment and sustainable development* (2nd ed.). Elsevier.

Kamuyu Aydınlatma Platformu. (2024). *Bor Şeker A.Ş. özel durum açıklaması: 10.000 ton/gün kapasiteli ekstraksiyon ünitesi yatırımı*.

Taner, T., & Sivrioğlu, M. (2015). Energy-exergy analysis and optimisation of the thermal system in a sugar factory. *Energy, 93*, 641–654. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.007

Tekin, T., & Bayramoğlu, M. (1998). Exergy loss minimization analysis of sugar production process from sugar beet. *International Journal of Energy Research, 22*(7), 591–601.

Tekin, T., & Bayramoğlu, M. (2001). Evaporation of juice from sugar beet: Exergy analysis. *Energy, 26*(3), 287–297.

TÜRKŞEKER. (2026). *Şeker üretim teknolojisi: Buhar kazanları ve buhar türbinleri*. Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş.

PARAFİN–LAURİK ASİT KARIŞIMLARININ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME OLARAK KULLANILDIĞI BİR ISI KUYUSUNUN PASİF SOĞUTMA PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Öğrencisi Efe HANCI

Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 78050 Karabük

ORCID ID: 0009-0002-1128-6916

Lisans Öğrencisi Mehmet Emre ÖZDEL

Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 78050 Karabük

ORCID ID: 0009-0008-5635-5499

Dr.Öğr.Üyesi Gürşah GÜRÜF

Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 78050 Karabük

ORCID ID: 0000-0003-3602-8710

ÖZET

Bu çalışmada, elektronik bileşenlerin pasif soğutulmasında kullanılmak üzere faz değiştiren malzeme (FDM) ile doldurulmuş iğne kanatçıklı bir ısı kuyusunun ısıl performansı deneysel olarak incelenmiştir. Isı kuyusu, 60×60 mm boyutlarındaki bir alüminyum taban levhası ile bu levha üzerine yerleştirilen, 55 mm yüksekliğinde ve 35 mm çapında içi boş tek bir iğne kanatçıktan oluşmaktadır. Kanatçığın iç hacmi; saf parafin (P100), saf laurik asit (LA100) ile bu iki maddenin kütlece %75–%25 (P75-LA25), %50–%50 (P50-LA50) ve %25–%75 (P25-LA75) oranlarındaki karışımları ile ayrı ayrı doldurulmuştur. Kapalı bir test bölümü içerisine konumlandırılan numuneler, taban levhasına temas ettirilen 60×60 mm boyutlarındaki film ısıtıcı aracılığıyla, taban alanı esas alınarak tanımlanan 2750, 3500 ve 4250 W/m² olmak üzere üç farklı sabit ısı akısında ısıtılmıştır. Performans ölçütü olarak, ısı kuyusu yüzey sıcaklığının başlangıç sıcaklığının 60 °C üzerine çıkması için geçen süre (nominal 85 °C) esas alınmıştır. Sonuçlar, incelenen geometride en düşük ısı akısında en iyi performansın P50-LA50 karışımı ile elde edildiğini (yaklaşık 189 dk) ve bu karışımın saf parafine göre %10 daha uzun süre sağladığını göstermektedir. En yüksek ısı akısında ise en iyi performans saf parafin ile elde edilmiş (yaklaşık 52 dk) ve P100, P50-LA50 karışımından %8,9 daha uzun süre sağlamıştır. FDM içerisinden alınan sıcaklık kayıtları, karışımların her iki saf bileşenin de altında, 36,5 °C dolayında eridiğini ortaya koymuştur; saf parafin 49,5 °C, saf laurik asit ise 42,5 °C dolayında erimektedir. Erime sıcaklığının düşmesi, gizli ısının ısıtma sürecinin erken bir aşamasında devreye girmesine yol açmakta; bu durum yavaş ısınmanın gerçekleştiği düşük ısı akısında avantaja dönüşürken, yüksek ısı akılarında gizli ısı kapasitesinin erken tükenmesi nedeniyle dezavantaj oluşturmaktadır. Ötektik bileşimden en uzak karışım olan P75-LA25'in erime bandı ise 7,5 °C genişliğe ulaşarak diğer bileşimlerin iki katından fazla bir sıcaklık aralığına yayılmış ve bu bileşim tüm ısı akılarında en düşük performansı vermiştir. Ayrıca ısı akısının 2750 W/m²'den 4250 W/m²'ye çıkarılması, sıcaklık baskılama süresini ortalama %72 oranında kısaltmıştır.

Anahtar kelimeler: Faz değiştiren malzeme, parafin, laurik asit, pasif soğutma, ısı kuyusu

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PASSIVE COOLING PERFORMANCE OF A HEAT SINK USING PARAFFIN–LAURIC ACID MIXTURES AS PHASE CHANGE MATERIAL

ABSTRACT

In this study, the thermal performance of a pin-finned heat sink filled with phase change material (PCM) for use in the passive cooling of electronic components was investigated experimentally. The heat sink consists of a 60×60 mm aluminium base plate and a single hollow pin fin, 55 mm in height and 35 mm in diameter, mounted on this plate. The internal volume of the fin was filled separately with pure paraffin (P100), pure lauric acid (LA100), and mixtures of these two substances at mass ratios of 75%–25% (P75-LA25), 50%–50% (P50-LA50), and 25%–75% (P25-LA75). The samples, positioned inside a closed test section, were heated at three different constant heat fluxes of 2750, 3500 and 4250 W/m², defined on the basis of the 60×60 mm base area, by means of a 60×60 mm film heater attached to the base plate. The performance criterion was the time required for the heat sink surface temperature to rise 60 °C above its initial value (nominally 85 °C). The results show that, for the geometry investigated, at the lowest heat flux the best performance was obtained with the P50-LA50 mixture (approximately 189 min), and that this mixture provided a 10% longer duration compared with pure paraffin. At the highest heat flux, on the other hand, the best performance was obtained with pure paraffin (approximately 52 min), and P100 provided an 8.9% longer duration than the P50-LA50 mixture. The temperature records taken from within the PCM revealed that the mixtures melted at around 36.5 °C, that is, below both pure components (49.5 °C for pure paraffin and 42.5 °C for pure lauric acid). The lower melting temperature causes the latent heat to be released at an earlier stage of the heating process, which is an advantage at the low heat flux where heating is slow, but becomes a disadvantage at the higher heat fluxes because the latent heat capacity is exhausted too early. The melting band of P75-LA25, the composition farthest from the eutectic, extended over 7.5 °C, more than twice that of the other compositions, and this composition gave the lowest performance at all heat fluxes. In addition, increasing the heat flux from 2750 W/m² to 4250 W/m² shortened the temperature suppression time by an average of 72%.

Keywords: Phase change material, paraffin, lauric acid, passive cooling, heat sink

1. GİRİŞ

Elektronik bileşenlerin güç yoğunluğundaki sürekli artış ve bileşen boyutlarındaki küçülme, birim hacimden uzaklaştırılması gereken ısı miktarını kayda değer ölçüde yükseltmiştir. Bu durum, ısıl yönetimi günümüz elektronik tasarımında performansı ve güvenilirliği belirleyen temel kısıtlardan biri hâline getirmiştir (Afaynou vd., 2023; Sharma vd., 2009). Yarı iletken bileşenlerin çalışma sıcaklığındaki artışın bileşen ömrünü üstel biçimde kısalttığı bilinmekte olup, izin verilen sıcaklık sınırının aşılması kalıcı hasara yol açabilmektedir (Afaynou vd., 2023).

Fan ve ısı borusu gibi aktif soğutma yöntemleri sürekli rejimde çalışan sistemler için etkili çözümler sunmakla birlikte, enerji tüketimi, gürültü, hareketli parça kaynaklı arıza riski ve ilave hacim ihtiyacı gibi dezavantajlar taşımaktadır (Afaynou vd., 2023). Ayrıca bu yöntemler, tasarımın en yüksek ısıl yüke göre boyutlandırılmasını gerektirdiğinden, yükün kesikli ya da darbeli olduğu uygulamalarda önemli ölçüde aşırı boyutlandırmaya neden olmaktadır. Bu nedenle, hareketli parça içermeyen ve harici enerji gerektirmeyen pasif soğutma yöntemleri son yıllarda artan bir ilgi görmektedir (Afaynou vd., 2023; Qureshi vd., 2018).

Pasif soğutma yaklaşımları arasında faz değiştiren malzeme (FDM) kullanımı öne çıkmaktadır. FDM'ler, erime sıcaklıkları civarında gizli ısı yoluyla yüksek miktarda enerjiyi neredeyse sabit sıcaklıkta depolayabilmekte ve bu sayede darbeli ısıl yükler altında bileşen sıcaklığının yükselmesini geciktirmektedir (Afaynou vd., 2023; Sharma vd., 2009). Duyulur ısı depolamaya kıyasla birim hacim başına çok daha yüksek enerji yoğunluğu sunmaları, bileşen sıcaklığını dar bir aralıkta tutabilmeleri ve

herhangi bir yardımcı ekipman gerektirmemeleri, bu malzemeleri elektronik soğutma uygulamaları için cazip kılmaktadır (Sharma vd., 2009).

Bununla birlikte, organik FDM'lerin ısıl iletkenliklerinin düşük olması uygulamada temel kısıtı oluşturmaktadır (Afaynou vd., 2023; Qureshi vd., 2018). Düşük iletkenlik nedeniyle özellikle yüksek ısı akısı seviyelerinde ısı, malzemenin yalnızca ısıtılan yüzeye yakın bölgesine nüfuz edebilmekte, dolgunun geri kalan kısmı erime sürecine yeterince katılamamaktadır (Afaynou vd., 2023; Qureshi vd., 2018). Bu sınırlamanın giderilmesi amacıyla literatürde metal kanatçık entegrasyonu, gözenekli metal köpük kullanımı, genleştirilmiş grafit ilavesi ve nano parçacık takviyesi gibi farklı iyileştirme yöntemleri önerilmiştir (Afaynou vd., 2023; Qureshi vd., 2018). Bu yöntemler arasında kanatçık entegrasyonu; imalat kolaylığı ve yapısal basitliği nedeniyle en yaygın kullanılan çözüm olarak dikkat çekmektedir (Afaynou vd., 2023; Ali vd., 2018; Arshad vd., 2017, 2018; Ashraf vd., 2017; Usman vd., 2018).

FDM dolgulu bir ısı kuyusunda erime süreci tek bir mekanizma ile yürümemektedir. Isıtma başladığında erime, ısıtılan yüzeye bitişik ince bir tabakada iletim yoluyla ilerlemekte; yeterli miktarda sıvı faz biriktikten sonra sıvı içerisinde doğal taşınım devreye girerek erime cephesinin ilerleme hızını artırmaktadır (Azad vd., 2021). Bu geçişin ne zaman gerçekleştiği ve erime cephesinin dolgunun tamamına ulaşıp ulaşamadığı, uygulanan ısı akısının büyüklüğüne ve buna bağlı olarak sürecin zaman ölçeğine bağlıdır. Düşük ısı akılarında dolgunun tamamı erime sürecine katılabilirken, yüksek ısı akılarında bileşenden çekilen ısı kısa sürede dolgunun tamamına iletilemediğinden erime ısıtılan yüzeye yakın bölgeye sınırlı kalmakta ve depolanabilecek gizli ısının ancak bir kısmı kullanılabilmektedir (Afaynou vd., 2023; Qureshi vd., 2018; Soliman vd., 2021). Bu nedenle bir FDM'nin ısıl performansı yalnızca gizli ısı kapasitesi ile değil, bu kapasitenin hangi sıcaklıkta ve hangi hızda erişilebilir olduğu ile birlikte değerlendirilmelidir.

FDM seçiminde belirleyici parametre erime sıcaklığıdır; bu değerin ortam sıcaklığının yeterince üzerinde, bileşenin izin verilen sıcaklık sınırının ise altında kalması gerekmektedir (Afaynou vd., 2023; Sharma vd., 2009). Elektronik soğutma uygulamalarında bu aralığa uyan organik FDM'ler başlıca parafinler ve yağ asitleridir. Parafinler; kimyasal kararlılıkları, korozif olmamaları, düşük maliyetleri ve geniş bir erime sıcaklığı aralığında temin edilebilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir (Sharma vd., 2009). Yağ asitleri ise yüksek gizli ısı kapasiteleri, aşırı soğuma göstermemeleri, korozif olmamaları ve yenilenebilir bitkisel ya da hayvansal kaynaklardan elde edilebilmeleri ile öne çıkmaktadır (Bhutto vd., 2024; Keleş vd., 2005; Yuan vd., 2014).

Bu çalışmada kullanılan iki bileşen de söz konusu sıcaklık aralığında yer almaktadır. Laurik asidin erime sıcaklığı literatürde 42–44 °C, gizli ısısı ise yaklaşık 164 J/g olarak bildirilmektedir (Bhutto vd., 2024; Keleş vd., 2005). Ticari parafinler ise bileşimlerine bağlı olarak geniş bir erime sıcaklığı aralığında temin edilebilmekte olup, elektronik soğutma uygulamalarında kullanılan türlerinin erime sıcaklıkları çoğunlukla 50°C'nin üzerindedir (Chang vd., 2024; Sharma vd., 2009). İki malzemenin erime sıcaklıkları arasındaki bu fark, karışım oranının değiştirilmesi yoluyla ara sıcaklıklarda çalışan bir FDM elde edilmesine imkân tanımaktadır.

Tek bir saf malzemenin erime sıcaklığının hedeflenen çalışma aralığıyla her zaman örtüşmemesi, iki farklı FDM'nin belirli oranlarda karıştırılması yaklaşımını gündeme getirmiştir. İkili karışımlarda erime sıcaklığı, bileşenlerin kütlesel oranı değiştirilerek ayarlanabilmektedir (Fan vd., 2022; Keleş vd., 2005). Ancak katı fazda birbiri içinde sınırlı çözünürlüğe sahip bileşen çiftlerinde karışım, ötektik davranış sergileyebilmektedir. Ötektik bileşimde erime, her iki saf bileşenin erime sıcaklığının da altındaki tek bir sıcaklıkta ve dar bir platoda gerçekleşirken; ötektik dışı bileşimlerde erime, katılaşma (solidüs) ve sıvılaşma (likidüs) sıcaklıkları arasında geniş bir sıcaklık bandına yayılmaktadır (Fan vd., 2022; Keleş vd., 2005; Yuan vd., 2014). Bu davranış, ısı kuyusunun gizli ısı tamponunun hangi sıcaklıkta ve ne kadar yoğunlukta devreye gireceğini doğrudan belirlediğinden, ısıl performans açısından kritik önem taşımaktadır.

Yağ asidi esaslı ikili karışımlar üzerine yapılan çalışmalar bu davranışı sayısal olarak ortaya koymaktadır. Keleş vd. (2005) kütlece %66 laurik asit içeren laurik–miristik asit karışımının 34,2°C'de eriyen ve 166,8 J/g gizli ısıya sahip bir ötektik oluşturduğunu belirlemiştir; bu erime sıcaklığı her iki

saf bileşenin (laurik asit 42,6 °C, miristik asit 52,2°C) değerinin de belirgin biçimde altındadır. Fan vd. (2022) ise miristik asit–parafin ikilisinde kütlece %62–%38 oranında 41,99°C'de eriyen ve 171,43 J/g gizli ısıya sahip bir ötektik bildirmiştir. Sari ve Kaygusuz (2002), laurik–stearik asit ötektiğini iç içe geçmiş iki boru arasındaki hacimde inceleyerek yağ asidi ötektiklerinin ısıl performansını ve erime-katılaşma davranışını ortaya koymuştur. Parafin–laurik asit ikilisinde ise Zhang vd. (2023), kütlece 60:40, 50:50 ve 40:60 oranlarını karşılaştırmış; en yüksek erime entalpisinin (223,1 J/g) 50:50 bileşiminde elde edildiğini ve bu bileşimin faz geçiş sıcaklığının 36,1 °C olduğunu belirlemiştir. Bu sonuçlar, yağ asidi–parafin ikililerinde erime sıcaklığının karışım oranı ile kontrol edilebildiğini göstermektedir.

Literatür incelendiğinde, FDM dolgulu ısı kuyularının elektronik bileşenlerin pasif soğutulmasında etkili bir çözüm sunduğu ve kanatçık entegrasyonunun ısıl performansı belirgin biçimde iyileştirdiği görülmektedir (Ali vd., 2018; Arshad vd., 2017, 2018; Ashraf vd., 2017; Usman vd., 2018). Arshad vd. (2017, 2018) iğne kanatçık çapı ve kalınlığı ile FDM hacim oranının, Ashraf vd. (2017) kanatçık kesit geometrisi ile dizilim düzeninin, Usman vd. (2018) ise kanatçıklı ve kanatçıksız konfigürasyonların ısıl performans üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Ali vd. (2018) kare ve dairesel kesitli iki kanatçık konfigürasyonunda iki farklı saf FDM'yi karşılaştırmıştır. Baby ve Balaji (2012) FDM dolgulu kanatçıklı ısı kuyularının elektronik soğutmadaki performansını farklı güç seviyelerinde deneysel olarak ortaya koymuştur. Ong vd. (2021) ise içi boş alüminyum iğne kanatçıklardan oluşan ısı kuyularını FDM'li ve FDM'siz olarak karşılaştırmış; uzun ve büyük çaplı kanatçıkların kısa ve küçük çaplı olanlara göre daha iyi ısıl performans verdiğini bildirmiştir. Yağ asidi esaslı ikili karışımlar ise büyük ölçüde güneş enerjisi ve bina uygulamaları kapsamında araştırılmıştır (Fan vd., 2022; Keleş vd., 2005; Sari & Kaygusuz, 2002); parafin–laurik asit ikilisi ağırlıklı olarak batarya termal yönetimi kapsamında ve ısıl iletkenlik artırıcı katkılarla birlikte ele alınmıştır (Zhang vd., 2023). Yakın dönemde Chang vd. (2024) parafin–yağ asidi ötektik karışımlarını kanatçıklı ısı kuyularında elektronik soğutma amacıyla incelemiştir. Buna karşın mevcut çalışmalar ağırlıklı olarak tek bir saf FDM ya da yalnızca ötektik bileşim ile yürütülmüş; parafin–laurik asit ikilisini inceleyen çalışmalar ise ısıl iletkenlik artırıcı katkılar içeren kompozit yapılar üzerinde yoğunlaşmıştır. İçi boş iğne kanatçıklı bir ısı kuyusunda, parafin–laurik asit ikilisinin saf bileşenlerden ötektik dışı karışımlara uzanan tüm bileşim aralığının, farklı ısı akısı seviyeleri altında ve karışım oranının erime aralığı üzerindeki etkisiyle birlikte ele alındığı bir çalışmaya ise rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, elektronik soğutma uygulamaları için parafin–laurik asit ikili karışımlarının iğne kanatçıklı bir ısı kuyusundaki pasif soğutma performansını farklı karışım oranları ve ısı akısı seviyeleri altında deneysel olarak incelemektir. Kanatçık geometrisi tüm deneylerde sabit tutulmuş; incelenen değişkenler karışım oranı ve ısı akısı seviyesi olarak belirlenmiştir. Performans değerlendirmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan ayar sıcaklığı (set point temperature) yaklaşımı esas alınmıştır (Arshad vd., 2017, 2018). Çalışmanın özgünlüğü, parafin–laurik asit ikili sisteminin beş farklı bileşiminin aynı ısı kuyusu geometrisinde ve üç farklı ısı akısı seviyesinde karşılaştırmalı olarak ele alınmasında ve FDM içerisinden alınan sıcaklık kayıtları aracılığıyla karışım oranının erime davranışı üzerindeki etkisinin doğrudan gözlemlenmesinde yatmaktadır. Elde edilen bulguların, pasif soğutma uygulamalarında FDM seçimine ve ısı kuyusu tasarımına yönelik bir referans oluşturması beklenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan malzemeler

Bu çalışmada FDM olarak parafin ve laurik asit ile bu iki maddenin farklı kütlesel oranlardaki karışımları kullanılmıştır. Parafin 52 sınıfı ticari parafin mumu, laurik asit ise %99 saflıkta olup, ısı kuyusu ve taban levhası AA6061-T6 alüminyum alaşımından imal edilmiştir. Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri

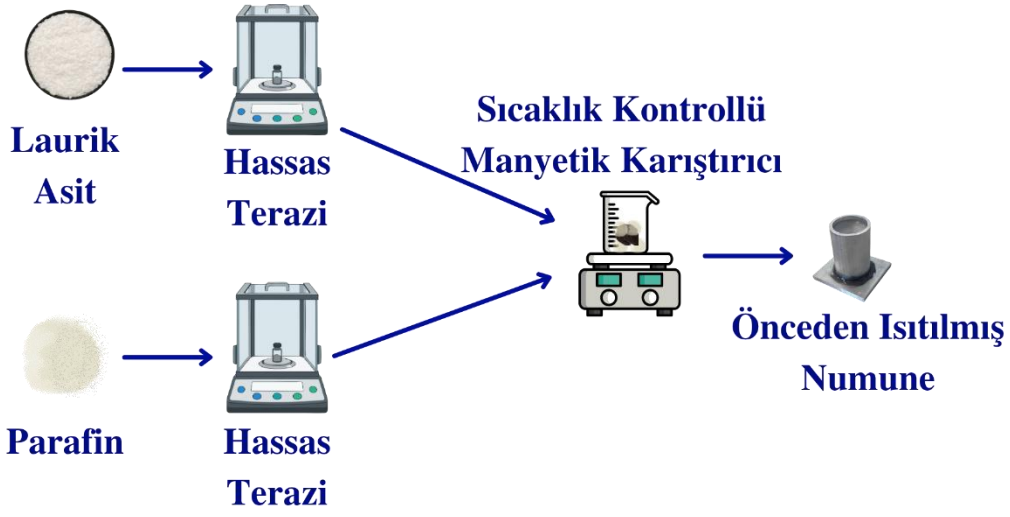
Özellik	Parafin (52 sınıfı)	Laurik asit (%99)	Alüminyum (AA6061-T6)
Kimyasal formül	C_nH_{2n+2}	$CH_3(CH_2)_{10}COOH$	Al
Erime sıcaklığı (°C)	52,1 (Chang vd., 2024)	42,1–44,3 (Yuan vd., 2014)	660,4 (Ashraf vd., 2017)
Katılaşma sıcaklığı (°C)	49,1-50,1 (Chang vd., 2024)	39,8–42,2 (Yuan vd., 2014)	—
Gizli ısı (J/g)	244 (Chang vd., 2024)	176–217 (Yuan vd., 2014)	—
Isıl iletkenlik (W/mK)	0,150 (Chang vd., 2024)	0,20–0,22 (Bhutto vd., 2024; Yuan vd., 2014)	180 (Ashraf vd., 2017)
Yoğunluk (kg/m³)	810 (Chang vd., 2024)	862 (Chang vd., 2024)	2700 (Ashraf vd., 2017)
Özgül ısı (J/kgK)	—	—	963 (Ashraf vd., 2017)

Tablo 1'de verilen değerler, parafin ile laurik asidin erime sıcaklıkları arasında yaklaşık 10°C'lik bir fark bulunduğunu göstermektedir. Bu fark, iki bileşenin farklı kütlesel oranlarda karıştırılması yoluyla ara sıcaklıklarda çalışan bir FDM elde edilmesine imkân tanımakta olup çalışmadaki bileşim taramasının temelini oluşturmaktadır.

Her iki faz değiştiren malzemenin ısıl iletkenliği 0,15–0,22 W/mK aralığında olup, alüminyumun 180 W/mK'lık ısıl iletkenliğinin yaklaşık binde biri düzeyindedir. Bu nedenle ısı, FDM dolgusuna ancak alüminyum kanatçık duvarları aracılığıyla iletilebilmekte; iğne kanatçık bu çalışmada ısıl iletkenlik artırıcı eleman olarak görev yapmaktadır.

2.2. Numune hazırlama

Saf parafin (P100), saf laurik asit (LA100) ve bu maddelerin kütlece %75–%25 (P75-LA25), %50–%50 (P50-LA50) ve %25–%75 (P25-LA75) oranlarındaki karışımları hazırlanmıştır. Bileşenler 0,01 g çözünürlüklü hassas terazi ile katı hâlde tartılarak bir beherglas içerisinde toplanmış; sıcaklık kontrollü manyetik karıştırıcı üzerinde 100 °C'ye kadar ısıtılarak tamamen sıvı faza geçirilmiştir. Sıvı karışım, manyetik karıştırıcı yardımıyla 300 rpm hızda 3 saat boyunca karıştırılarak homojen hâle getirilmiştir. Numune hazırlama akışı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Numune hazırlama akış şeması

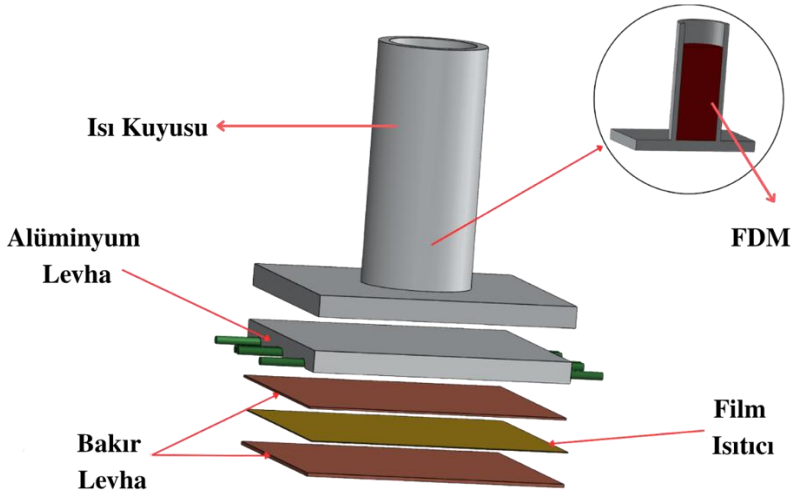
Karıştırma işlemi sürerken, 55 mm yüksekliğinde, 35 mm dış çapında ve 3 mm et kalınlığındaki içi boş alüminyum iğne kanatçık döküme hazırlanmıştır. Kanatçık, döküm öncesinde 60°C'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Bu işlemin amacı, sıvı FDM'nin soğuk alüminyum duvarlara temas ederek ani katılaşmasını ve numune merkezinde çekme boşluğu oluşmasını engellemektir. Üç saatlik karıştırma tamamlandığında sıvı karışım, ön ısıtılmış kanatçığın iç hacminin %80'ini dolduracak biçimde dökülmüştür. Kalan %20'lik hacim, erime sırasındaki hacimsel genleşmeye pay bırakmaktadır.

2.3. Deney düzeneği

Isı kuyusu ve ısıtıcı grubuna ait şematik gösterim Şekil 2'de verilmiştir. Grup, alttan üste doğru bakır levha, film ısıtıcı, ikinci bir bakır levha, alüminyum levha ve ısı kuyusu olmak üzere beş katmandan oluşmaktadır. Film ısıtıcının iki bakır levha arasına yerleştirilmesindeki amaç, ısıtıcının ürettiği ısının temas yüzeyi boyunca düzgün biçimde yayılmasını sağlamak ve levha üzerinde yerel sıcak noktaların oluşmasını önlemektir. Bakırın yüksek ısıl iletkenliği, film ısıtıcıdan çıkan ısının alüminyum levhaya üniform bir ısı akısı olarak aktarılmasına imkân vermektedir.

Bakır levhaların üzerinde yer alan alüminyum levha hem ısıyı ısı kuyusu tabanına iletmekte hem de sıcaklık ölçüm noktalarını barındırmaktadır; levha üzerine açılan kanallara yerleştirilen termoelemanlar Şekil 2'de yeşil renkte gösterilmiştir. Isı kuyusu ise kendi taban flanşı ile birlikte tek parça hâlinde imal edilmiş, içi boş silindirik iğne kanatçıktan oluşmaktadır. Şekil 2'deki kesit detayında görüldüğü üzere faz değiştiren malzeme kanatçığın iç hacmini doldurmakta ve alt tarafta taban flanşı ile sınırlanmaktadır. Isı kuyusu ile alüminyum levha arasında, numunelerin sökülüp takılabilmesini sağlamak amacıyla yapıştırıcı kullanılmamış, iki yüzey arasına yalnızca termal macun uygulanmıştır.

Tüm katman grubu, kapalı bir hacim oluşturacak biçimde poliamid malzemeden imal edilmiş küp şeklindeki test bölümünün içerisine yerleştirilmiştir. Test bölümünün üst yüzeyi, sıvı conta ile sızdırmazlığı sağlanan pleksiglas bir kapak ile kapatılarak numune ortam hava hareketlerinden yalıtılmıştır.



Şekil 2. Isı kuyusu ve ısıtıcı grubunun şematik gösterimi

Isı akısı, film ısıtıcının 60×60 mm'lik yüzey alanı esas alınarak tanımlanmıştır. Bakır ve alüminyum levhalar da aynı taban ölçülerinde olduğundan, ısıtıcı yüzeyi ile ısı kuyusu tabanı birebir örtüşmekte ve ısı akısı tüm katmanlar boyunca aynı kesit alanından geçmektedir.

2.4. Sıcaklık ölçümü ve veri toplama

Sıcaklık ölçümlerinde K tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Alüminyum levha üzerine açılan kanallara, ısıtılan taban yüzeyi boyunca sıcaklık dağılımını belirlemek üzere 9 adet termoeleman yerleştirilmiştir.

Bunlara ek olarak, FDM'nin iç sıcaklığını ölçmek üzere kanatçık merkezine bir adet, kanatçığın dış duvarı ile poliamid küpün iç yüzeyi arasındaki hacmin sıcaklığını ölçmek üzere bir adet ve laboratuvar ortam sıcaklığı için bir adet olmak üzere toplam 12 kanal kaydedilmiştir.

Termoelemanlar, bilgisayara USB üzerinden bağlı dört adet ORDEL UDL100 çok kanallı veri kayıt cihazına bağlanmıştır. Cihazın ölçüm doğruluğu ±%0,2 olup, sıcaklık verileri 1 Hz örnekleme frekansında kesintisiz olarak kaydedilmiştir. Film ısıtıcı, ayarlanabilir bir DC güç kaynağı ile beslenmiş ve güç deney boyunca sabit tutulmuştur. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil 3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

2.5. Deney prosedürü ve performans ölçütü

Her numune, film ısıtıcı aracılığıyla 2750 W/m², 3500 W/m² ve 4250 W/m² olmak üzere üç farklı sabit ısı akısında ayrı ayrı test edilmiştir. Bu değerler sırasıyla 9,9 W, 12,6 W ve 15,3 W elektriksel güce karşılık gelmektedir. Beş bileşim ve üç ısı akısı seviyesi ile toplam 15 deney gerçekleştirilmiştir.

Her deney tek bir sabit ısı akısı altında yürütülmüş, ısı akısı yalnızca deneyler arasında değiştirilmiştir. Deneyler, numunelerin tamamen katı fazda olduğu ve ortam sıcaklığına yakın bir başlangıç sıcaklığından (30°C) başlatılmıştır. Isıtma, ısı kuyusu üzerindeki dokuz termoelemanın ortalama sıcaklığı 90°C'ye ulaşana kadar sürdürülmüş ve ardından deney sonlandırılmıştır.

Performans ölçütü olarak, ısı kuyusu üzerinde en yüksek sıcaklığın ölçüldüğü kritik noktanın başlangıç sıcaklığının 60°C üzerine çıkması için geçen süre esas alınmıştır. Ölçütün başlangıç sıcaklığına göre tanımlanması, deneyler arasındaki başlangıç sıcaklığı farklarının karşılaştırmayı etkilemesini önlemektedir. Tüm deneyler aynı kapalı test bölümünde gerçekleştirilmiş olup, tüm numuneler için ortak olan çevreye ısı kaybı kompozisyonlar arası karşılaştırmayı etkilememektedir.

2.6. Ölçüm belirsizliği

Sıcaklık ölçümlerinde IEC 60584-1 sınıf 2 toleransına sahip K tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Bu sınıf için tolerans, çalışılan 25–95°C aralığında ±2,5°C'dir. Veri kayıt cihazının ±%0,2'lik ölçüm

doğruluğu 90 °C'de ±0,18°C'ye karşılık gelmekte olup, karekök-kareler toplamı yöntemiyle birleştirilen toplam ölçüm belirsizliği ±2,5°C olarak hesaplanmıştır.

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

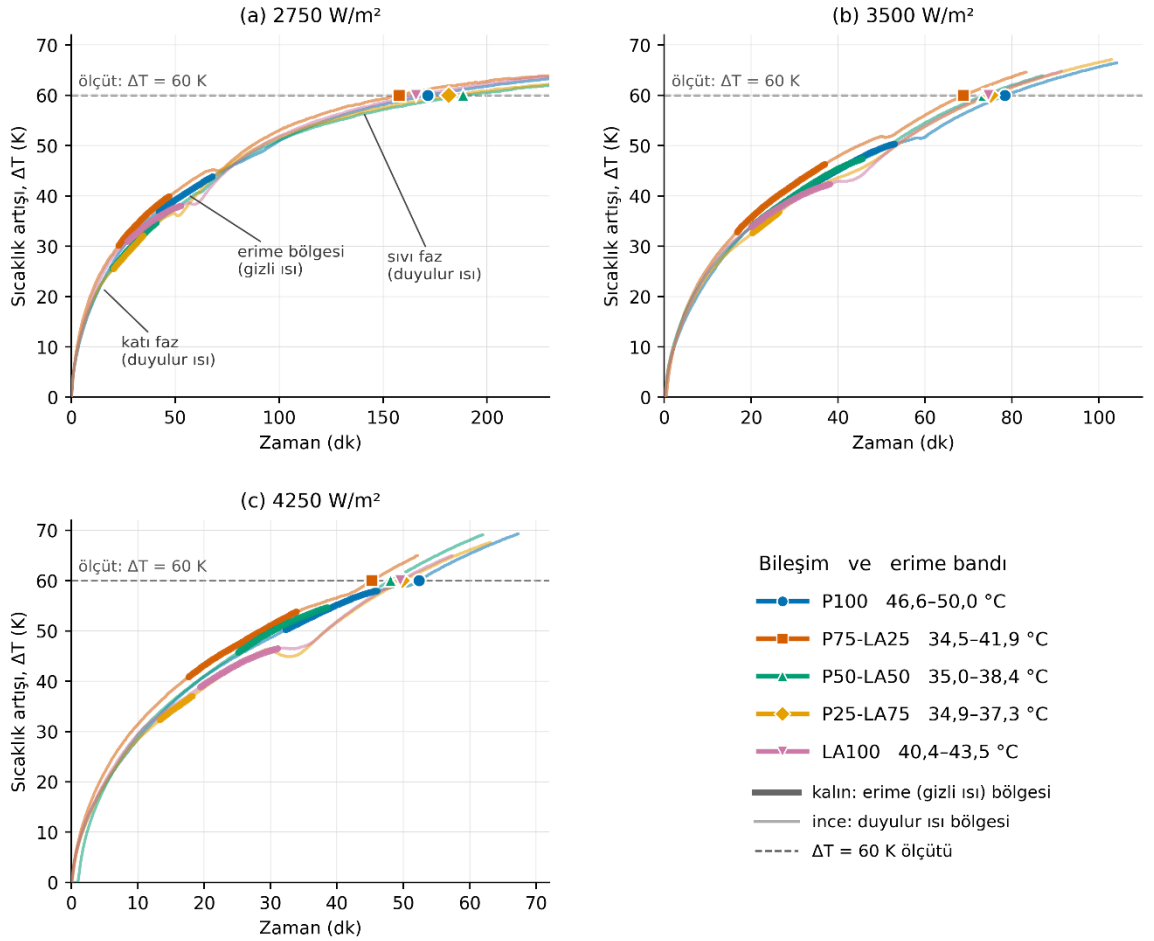
3.1. Sıcaklık–zaman davranışı

Beş bileşimin üç farklı ısı akısı altındaki sıcaklık–zaman eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Eğriler, ısı kuyusu tabanında en yüksek sıcaklığın ölçüldüğü kritik noktanın başlangıç sıcaklığına göre artışı ($\Delta T = T - T_0$) olarak çizilmiştir. Her eğrinin kalın çizilen bölümü, kanatçık merkezindeki faz değiştiren malzeme sıcaklığının o bileşime ait erime bandı içinde kaldığı, yani gizli ısı soğurumunun etkin olduğu zaman aralığını göstermektedir; ince çizilen bölümler ise katı ve sıvı fazdaki duyulur ısınma aşamalarına karşılık gelmektedir. Erime bantlarının nasıl belirlendiği Bölüm 3.3'te açıklanmıştır. Kesikli yatay çizgi, performans ölçütü olarak benimsenen 60 K sıcaklık artışını, işaretçiler ise her bileşimin bu değere ulaştığı anı göstermektedir.

Tüm eğriler ortak bir üç aşamalı davranış sergilemektedir. İlk aşamada faz değiştiren malzeme tamamen katı fazdadır ve sıcaklık, duyulur ısı depolanmasına karşılık gelen dik bir eğimle hızla yükselmektedir. İkinci aşamada erimenin başlamasıyla birlikte gizli ısı devreye girmekte ve eğrinin eğimi belirgin biçimde azalmaktadır; bu aşama, ısı kuyusunun sıcaklık artışının geciktirildiği ve pasif soğutma açısından yararlı olan bölgedir. Üçüncü aşamada malzemenin büyük bölümü sıvı faza geçtiğinden gizli ısı kapasitesi tükenmekte ve sıcaklık yeniden hızla artmaktadır. Bu davranış, kanatçıklı ısı kuyularında faz değiştiren malzeme kullanımına ilişkin literatürde bildirilen tipik eğri biçimiyle uyumludur (Ali vd., 2018; Arshad vd., 2018; Chang vd., 2024).

Şekil 4'te işaretlenen erime aralıkları, bileşimler arasındaki temel farkı doğrudan görünür kılmaktadır. Saf parafinde gizli ısı soğurumu en geç aşamada devreye girmekte laurik asit içeren karışımlarda ise süreç çok daha erken başlamaktadır. P75-LA25 bileşiminde erime geniş bir sıcaklık bandına yayıldığından zaman ekseninde de en uzun aralığa karşılık gelmekte, buna rağmen sıcaklık artışını sınırlayıcı etkisi en zayıf kalan bileşim olmaktadır. Isı akısı arttıkça tüm bileşimlerde erime aralığı kısalmakta ve eğrinin daha erken bir bölümüne kaymaktadır.

Isı akısının etkisi bileşimden bağımsız olarak baskındır. Isı akısı 2750 W/m²'den 4250 W/m²'ye çıkarıldığında kritik sıcaklığa ulaşma süresi tüm bileşimlerde ortalama %71,6 oranında kısalmaktadır. Yüksek ısı akılarında eğrilerin ikinci aşaması hem daha kısa sürmekte hem de daha az belirginleşmektedir; bu durum, erimenin kısa sürede tamamlanması ve gizli ısı kapasitesinin sıcaklık artışını sınırlamaya yetecek kadar uzun bir süre boyunca etkili olamaması ile açıklanmaktadır.



Şekil 4. (a) 2750 W/m², (b) 3500 W/m² ve (c) 4250 W/m² ısı akılarında bileşimlere göre sıcaklık artışının zamanla değişimi

3.2. Bileşimin performansa etkisi

Kritik noktanın başlangıç sıcaklığının 60 K üzerine çıkması için geçen süreler ve saf parafine (P100) göre bağıl değişimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kritik noktanın 60 K sıcaklık artışına ulaşma süreleri (dakika) ve P100'e göre bağıl değişim

Bileşim	**2750 W/m²**	**3500 W/m²**	**4250 W/m²**
P100	171,5 (ref.)	78,3 (ref.)	52,4 (ref.)
P75-LA25	157,8 (−%8,0)	68,8 (−%12,2)	45,3 (−%13,6)
P50-LA50	188,6 (+%10,0)	73,4 (−%6,3)	48,1 (−%8,2)
P25-LA75	181,6 (+%5,9)	75,1 (−%4,1)	49,9 (−%4,8)
LA100	165,9 (−%3,3)	74,6 (−%4,7)	49,6 (−%5,4)

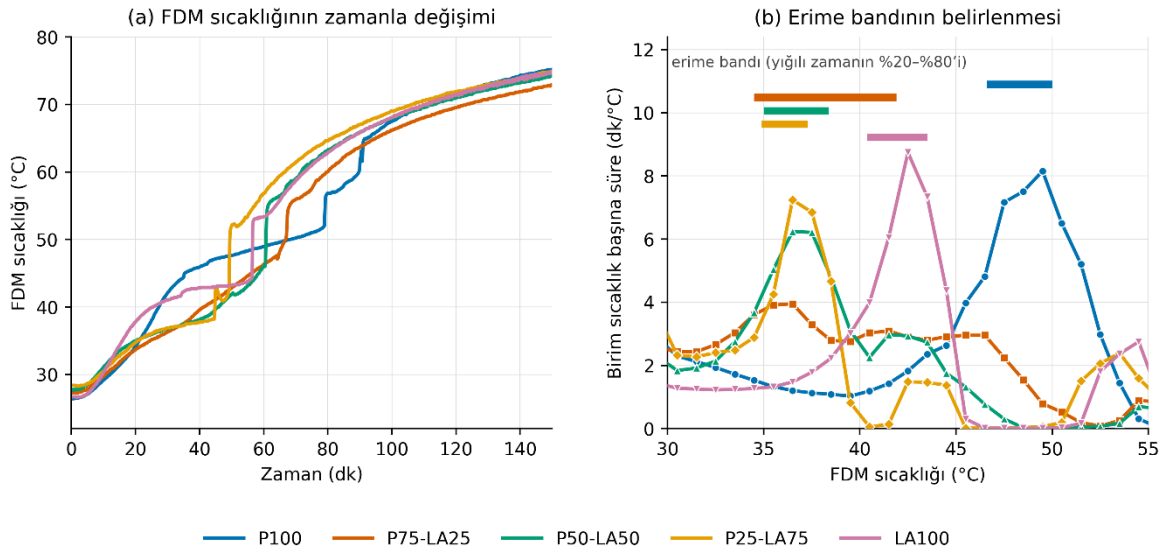
En düşük ısı akısında (2750 W/m²) parafine laurik asit eklenmesi performansı belirgin biçimde iyileştirmektedir. P50-LA50 bileşimi, saf parafine göre kritik sıcaklığa ulaşma süresini %10 uzatarak en iyi sonucu vermiş, bunu %5,9 ile P25-LA75 izlemiştir. Buna karşılık P75-LA25 bileşimi aynı ısı akısında saf parafinin %8 gerisinde kalmış, saf laurik asit (LA100) ise %3,3'lük küçük bir farkla saf parafine en yakın davranışı sergilemiştir.

Orta ve yüksek ısı akılarında (3500 ve 4250 W/m²) tablo tersine dönmektedir: hiçbir karışım saf parafinin üzerine çıkamamış, tüm bileşimler %4,1 ile %13,6 arasında daha kısa sürelerde kritik sıcaklığa ulaşmıştır. En büyük gerileme her iki ısı akısında da P75-LA25 bileşiminde görülmüştür (sırasıyla −%12,2 ve −%13,6). Laurik asit katkısının etkisi böylece ısı akısı ile işaret değiştirmekte; düşük ısı akısında olumlu olan katkı, orta ve yüksek ısı akılarında olumsuza dönmektedir.

Performansın laurik asit oranıyla tek yönlü bir ilişki göstermemesi dikkat çekicidir. Eğer karışımın davranışı bileşenlerin ağırlıklı ortalamasıyla belirlenseydi, sürelerin P100 ile LA100 arasında düzgün biçimde değişmesi beklenirdi. Oysa 2750 W/m²'de hem P50-LA50 hem de P25-LA75 her iki saf bileşenden de daha uzun süre vermektedir. Bu durum, ikili karışımın saf bileşenlerinin özelliklerinden türetilemeyen bağımsız bir ısıl davranış sergilediğine işaret etmekte olup, bir sonraki bölümde erime davranışı üzerinden açıklanmaktadır.

3.3. Erime davranışı ve bileşim etkisinin fiziksel yorumu

Bileşimin performansa etkisini fiziksel olarak açıklayabilmek amacıyla, kanatçık merkezine yerleştirilen termoelemandan alınan FDM sıcaklığı verileri incelenmiştir. Şekil 5(a)'da 2750 W/m² ısı akısı altında malzeme sıcaklığının zamanla değişimi, Şekil 5(b)'de ise aynı verilerden türetilen, malzeme sıcaklığının 1°C artması için geçen sürenin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Bu ikinci grafikte gözlenen tepe noktaları, sıcaklık artışının yavaşladığı, yani gizli ısı soğurumunun yoğunlaştığı sıcaklık aralıklarını göstermektedir.



Şekil 5. 2750 W/m² ısı akısında (a) faz değiştiren malzeme sıcaklığının zamanla değişimi, (b) birim sıcaklık artışı için geçen sürenin sıcaklıkla değişimi ve belirlenen erime bantları

Şekil 5(b)'de saf bileşenler tek ve dar birer tepe vermektedir: P100 için tepe 49,5 °C, LA100 için 42,5 °C civarındadır. Karışımların tepe sıcaklıkları ise üç bileşimde de 36,5 °C dolayına inmekte, yani her iki saf bileşenin de altında kalmaktadır. Erime sıcaklığının karışımda bileşenlerin altına düşmesi ötektik davranışın ayırt edici özelliğidir ve parafin–laurik asit ikili sistemleri için literatürde bildirilen değerlerle uyumludur; Keleş vd. (2005) bu sistem için 34,2 °C, Zhang vd. (2023) ise 1:1 oranındaki karışım için 36,1 °C erime sıcaklığı ve 223,1 J/g gizli ısı bildirmiştir.

Erime bandı, tepe altında biriken fazladan sürenin %20'si ile %80'i arasında kalan sıcaklık aralığı olarak tanımlanmıştır. Bu tanımla P25-LA75 bileşimi 34,9–37,3 °C arasında yalnızca 2,4 °C genişliğinde çok dar bir bant vermekte; P50-LA50 (35,0–38,4 °C) ile saf bileşenler (P100: 46,6–50,0 °C, LA100: 40,4–43,5 °C) 3 °C dolayında bantlar oluşturmaktadır. Buna karşılık P75-LA25 bileşiminin bandı 34,5–41,9 °C ile 7,5 °C genişliğe ulaşmakta, yani diğer tüm bileşimlerin iki katından fazla bir sıcaklık aralığına yayılmaktadır. Bu davranış, ötektik bileşimden uzak karışımlarda katılaşma–erime (solidus–liquidus)

aralığının genişlemesi ve malzemenin geniş bir sıcaklık bandı boyunca kısmen erimiş çamursu bir bölge oluşturmasıyla açıklanmaktadır (Fan vd., 2022; Keleş vd., 2005; Yuan vd., 2014). Gizli ısının dar bir sıcaklık aralığında değil, uzun bir bant boyunca dağıtılması, sıcaklık artışını geciktirici etkiyi zayıflatmakta ve P75-LA25 bileşiminin tüm ısı akılarında en düşük performansı vermesini açıklamaktadır.

Karışımların yalnızca en düşük ısı akısında saf parafini geçebilmesi ise erime sıcaklığının düşmesinin iki yönlü etkisiyle açıklanmaktadır. Erime sıcaklığının düşük olması, gizli ısının ısıtma sürecinin erken bir aşamasında devreye girmesi anlamına gelir. Düşük ısı akısında sıcaklık artışı yavaş olduğundan, erken başlayan erime süreci kritik sıcaklığa ulaşılana kadar geçen uzun süre boyunca etkisini sürdürebilmekte ve karışımın yüksek gizli ısı kapasitesi tümüyle kullanılabilmektedir. Yüksek ısı akısında ise erime, ısıtmanın hemen başında ve hızla tamamlanmakta; taban çevresinde erken oluşan sıvı tabaka, doğal taşınım henüz gelişmeden ek bir ısıl direnç oluşturmaktadır. Chang vd. (2024) kanatçıklı ısı kuyularında benzer biçimde, erken erimenin taban çevresinde sıvı birikimine ve ısıl direncin artmasına yol açtığını bildirmiştir. Saf parafinin görece yüksek erime sıcaklığı, yüksek ısı akılarında gizli ısının daha geç ve sıcaklık artışını sınırlamak açısından daha etkili bir aşamada devreye girmesini sağlamaktadır.

Bu bulgular, parafin–laurik asit karışımlarının kanatçıklı ısı kuyularında ancak ısı akısı ile erime sıcaklığının birlikte değerlendirilmesi durumunda avantaj sağladığını göstermektedir. Düşük ısı yükünde çalışan, uzun süreli ve kesintili çalışma rejimine sahip elektronik bileşenler için P50-LA50 bileşimi öne çıkmakta; yüksek ısı akısı altında ise saf parafin tercih edilebilir kalmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, 60×60 mm boyutlarındaki bir alüminyum taban levhası üzerine yerleştirilmiş 55 mm yüksekliğinde ve 35 mm çapında içi boş bir iğne kanatçıktan oluşan ısı kuyusunun pasif soğutma performansı, kanatçık içine doldurulan parafin–laurik asit ikili karışımları için deneysel olarak incelenmiştir. Kütlece %0, %25, %50, %75 ve %100 laurik asit içeren beş bileşim, 2750, 3500 ve 4250 W/m² olmak üzere üç farklı sabit ısı akısı altında test edilmiş; performans ölçütü olarak ısı kuyusu tabanındaki kritik noktanın başlangıç sıcaklığının 60 K üzerine çıkması için geçen süre esas alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar, ısı akısının performans üzerinde bileşimden çok daha baskın bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur; ısı akısının 2750 W/m²'den 4250 W/m²'ye çıkarılması kritik sıcaklığa ulaşma süresini tüm bileşimlerde ortalama %71,6 oranında kısaltmıştır. Laurik asit katkısının etkisi ise ısı akısına bağlı olarak işaret değiştirmektedir. En düşük ısı akısında P50-LA50 bileşimi saf parafine göre %10, P25-LA75 bileşimi ise %5,9 daha uzun süre sağlarken, orta ve yüksek ısı akılarında hiçbir karışım saf parafinin üzerine çıkamamış, tüm bileşimler %4,1 ile %13,6 arasında daha kısa sürelerde kritik sıcaklığa ulaşmıştır.

Bu davranışın nedeni, karışımların erime sıcaklığında gözlenen düşüş ile açıklanmaktadır. Kanatçık içi sıcaklık ölçümlerinden türetilen erime bantları, karışımların 36,5 °C dolayında, yani hem saf parafinin (49,5 °C) hem de saf laurik asidin (42,5 °C) altında eridiğini göstermiştir. Erime sıcaklığının düşmesi, gizli ısının ısıtma sürecinin erken bir aşamasında devreye girmesine yol açmakta; bu durum yavaş ısınmanın gerçekleştiği düşük ısı akısında avantaja dönüşürken, hızlı ısınmanın gerçekleştiği yüksek ısı akılarında gizli ısı kapasitesinin erken tükenmesine ve taban çevresinde erken oluşan sıvı tabakanın ek ısıl direnç yaratmasına neden olmaktadır. Ayrıca, ötektik bileşimden en uzak karışım olan P75-LA25'in erime bandı 7,5 °C genişliğe ulaşarak diğer bileşimlerin iki katından fazla bir sıcaklık aralığına yayılmış ve bu bileşim tüm ısı akılarında en düşük performansı vermiştir.

Buna göre, kanatçıklı ısı kuyularında faz değiştiren malzeme seçiminin yalnızca gizli ısı kapasitesine göre değil, erime sıcaklığı ile çalışma ısı akısının birlikte değerlendirilmesiyle yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Düşük ısı yükünde ve uzun süreli çalışan elektronik bileşenler için P50-LA50 bileşimi öne çıkmakta, yüksek ısı akısı altında ise saf parafin tercih edilebilir kalmaktadır.

Sunulan sonuçlar tek bir kanatçık geometrisi ve kapalı bir test bölümü için karşılaştırmalı niteliktedir. Çalışmanın farklı kanatçık geometrileri ve dolgu oranlarıyla genişletilmesinin yanı sıra, faz değiştiren

malzemenin iletimle ısı transferinin iyileştirilmesi de hedeflenmektedir. Her iki faz değiştiren malzemenin ısıl iletkenliği alüminyumunkinden çok daha düşük olduğundan, gizli ısı kapasitesi ne kadar yüksek olursa olsun bu kapasitenin kullanılabilirliği malzeme içindeki ısı iletimiyle sınırlanmaktadır. Bu çalışmada yüksek ısı akılarında gözlenen performans kaybının, taban çevresinde erken oluşan sıvı tabakanın yarattığı ek ısıl dirençle ilişkilendirilmesi de aynı sınırlamaya işaret etmektedir. Bu doğrultuda, karışıma yüksek ısıl iletkenlikli nanoparçacıkların katılması umut verici bir yaklaşım olarak değerlendirilmekte; bu yolla etkin ısıl iletkenliğin artırılması, erime cephesinin daha hızlı ilerlemesi ve gizli ısı kapasitesinin yüksek ısı akılarında da kullanılabilir hâle gelmesi beklenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından KBÜBAP-24-ABP-147 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, sağlanan destek için Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür eder.

KAYNAKÇA

Afaynou, I., Faraji, H., Choukairy, K., Arshad, A., & Arıcı, M. (2023). Heat transfer enhancement of phase-change materials (PCMs) based thermal management systems for electronic components: A review of recent advances. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *143*(March), 106690. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106690

Ali, H. M., Arshad, A., Jabbal, M., & Verdin, P. G. (2018). Thermal management of electronics devices with PCMs filled pin-fin heat sinks: A comparison. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *117*, 1199–1204. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.065

Arshad, A., Ali, H. M., Ali, M., & Manzoor, S. (2017). Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: Effect of pin thickness and PCM volume fraction. *Applied Thermal Engineering*, *112*, 143–155. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.090

Arshad, A., Ali, H. M., Khushnood, S., & Jabbal, M. (2018). Experimental investigation of PCM based round pin-fin heat sinks for thermal management of electronics: Effect of pin-fin diameter. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *117*, 861–872. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.008

Ashraf, M. J., Ali, H. M., Usman, H., & Arshad, A. (2017). Experimental passive electronics cooling: Parametric investigation of pin-fin geometries and efficient phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *115*, 251–263. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.114

Azad, M., Groulx, D., & Donaldson, A. (2021). Natural convection onset during melting of phase change materials: Part I – Effects of the geometry, Stefan number, and degree of subcooling. *International Journal of Thermal Sciences*, *170*(February), 107180. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107180

Baby, R., & Balaji, C. (2012). Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *55*(5–6), 1642–1649. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.11.020

Bhutto, Y. A., Pandey, A. K., Islam, A., Rajamony, R. K., & Saidur, R. (2024). Lauric acid based form-stable phase change material for effective electronic thermal management and energy storage application. *Materials Today Sustainability*, *28*(April), 100931. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100931

Chang, S., Zhang, L., Li, X., Liu, B., Meng, Y., & Hu, H. (2024). Experimental study of novel paraffin-fatty acid eutectic mixtures for thermal management of electronic devices. *Journal of Energy Storage*, *84*(PA), 110846. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110846

Fan, Z., Zhao, Y., Liu, X., Shi, Y., & Jiang, D. (2022). Thermal properties and reliabilities of myristic acid-paraffin wax binary eutectic mixture as a phase change material for solar energy storage. *RSC Advances*, *12*(20), 12303–12309. https://doi.org/10.1039/d1ra09238c

Keleş, S., Kaygusuz, K., & Sari, A. (2005). Lauric and myristic acids eutectic mixture as phase change material for low-temperature heating applications. *International Journal of Energy Research*, *29*(9), 857–870. https://doi.org/10.1002/er.1111

Ong, K. S., Lim, C. H., Munusamy, Y., Choo, K. C., Chai, G. J., Saii, P., & Naghavi, S. (2021). Efficient Thermal Energy Management of Hollow Pin Fin Heat Sinks with and without Phase Change Material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *945*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/945/1/012006

Qureshi, Z. A., Ali, H. M., & Khushnood, S. (2018). Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *127*, 838–856. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.049

Sari, A., & Kaygusuz, K. (2002). Thermal performance of a eutectic mixture of lauric and stearic acids as PCM encapsulated in the annulus of two concentric pipes. *Solar Energy*, *72*(6), 493–504. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00026-9

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(2), 318–345. https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005

Soliman, A. S., Zhu, S., Xu, L., Dong, J., & Cheng, P. (2021). Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in cylindrical enclosure subjected to a constant heat flux. *Journal of Energy Storage*, *35*(November 2020). https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102312

Usman, H., Ali, H. M., Arshad, A., Ashraf, M. J., Khushnood, S., Janjua, M. M., & Kazi, S. N. (2018). An experimental study of PCM based finned and un-finned heat sinks for passive cooling of electronics. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, *54*(12), 3587–3598. https://doi.org/10.1007/s00231-018-2389-0

Yuan, Y., Zhang, N., Tao, W., Cao, X., & He, Y. (2014). Fatty acids as phase change materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *29*, 482–498. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.107

Zhang, G., Sun, Y., Wu, C., Yan, X., Zhao, W., & Peng, C. (2023). Low-cost and highly thermally conductive lauric acid–paraffin–expanded graphite multifunctional composite phase change materials for quenching thermal runaway of lithium-ion battery. *Energy Reports*, *9*, 2538–2547. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.102

ELEKTROSPREY SOĞUTMA SİSTEMLERİNDE ÇOK KRİTERLİ AKIŞKAN SEÇİMİ VE TERMAL PERFORMANS OPTİMİZASYONU

Assoc. Prof. Dr. Fatin SÖNMEZ

Artvin Çoruh University, Artvin Vocational School, Department of Mechanical and Metal Technologies, Artvin, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-9630-1232

Asst. Prof. Dr. Orhan YILDIRIM

Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering,

Erzurum, Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-8780-1297

ÖZET

Mikroelektronik sistemlerde artan güç yoğunluğu, kompakt hacimlerden yüksek ısı akılarının uzaklaştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Düşük pompa gücü ve mikro ölçekli damlacık atomizasyonu sunan elektrosprey (ES) soğutma tekniği, bu gereksinimlerin karşılanmasında etkili bir alternatif teşkil etmektedir. Akışkan değerlendirmesinde Nusselt sayısı (Nu) ve film sıcaklığı (Tsur) gibi ölçütlerin birlikte kullanılması çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımını çağrıştırmaktadır; ancak bu çalışma, Nu'nun akışkan ısıl iletkenliğine bağlı tanımı nedeniyle akışkanlar arası sıralamanın fiziksel soğutma performansından ayrışabildiğini göstermektedir. Bu amaçla, %50, %75 ve %100 hacimsel alkol oranlarında su–alkol karışımlarından (etanol, metanol, izopropil alkol) oluşan 9 akışkanın, 10–90 mL/h debi ve 2717.2–4912.0 W/m² ısı akısı aralığındaki 225 deneysel koşula ait verisi Shannon Entropi ve COPRAS yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Entropi yöntemi, veri matrisindeki değişkenliğe dayanarak Nu kriterine yaklaşık 0.79, Tsur kriterine yaklaşık 0.21 objektif ağırlık atamıştır. COPRAS sıralamasında %100 izopropil alkol, 90 mL/h debi ve 2717.2 W/m² ısı akısı kombinasyonu birinci sırada yer almıştır. Bu sıralama gerçek bir soğutma üstünlüğünden değil, ısıl iletkenliğin ($k = 0.132$ W/m·K) Nu tanımının paydasında yer almasından kaynaklanmaktadır: $\Delta T \approx 6$ K'de bu kombinasyonun ısı taşınım katsayısı (445 W/m²K) %75 metanol karışımınınkine (453 W/m²K) yakınken, Nu değeri (168.73) yaklaşık 2.2 kat daha yüksektir. Aynı ısı akısında Nu ve ΔT aynı bilgiyi taşımaktadır (45 grubun tamamında Spearman $\rho = -1$). Bu nedenle Nu ve film sıcaklığı temelli entropi–COPRAS değerlendirmesi, elektrosprey soğutmada akışkan seçimi için uygun bir çerçeve sunmamaktadır; ÇKKV yöntemleri ancak bağımsız ve fiziksel olarak anlamlı ölçütlerle kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Elektrosprey Soğutma, Shannon Entropi, COPRAS, Çok Kriterli Karar Verme, Nusselt Sayısı, Isıl İletkenlik

MULTI-CRITERIA FLUID SELECTION AND THERMAL PERFORMANCE OPTIMISATION IN ELECTROSPREY COOLING SYSTEMS

ABSTRACT

The increasing power density in microelectronic systems necessitates the removal of high heat fluxes from compact volumes. The electrospray (ES) cooling technique, which offers low pump power and micro-scale droplet atomisation, represents an effective alternative for meeting these requirements. Evaluating fluids jointly on the Nusselt number (Nu) and film temperature (Tsur) suggests a multi-criteria decision-making (MCDM) approach; however, this study shows that, because the Nu definition depends on fluid thermal conductivity, cross-fluid rankings based on Nu can diverge from physical

cooling performance. Data from nine fluids, comprising water–alcohol mixtures (ethanol, methanol, isopropyl alcohol) at 50, 75 and 100 per cent alcohol by volume, were analysed for 225 experimental conditions (flow rate 10–90 mL/h; heat flux 2717.2–4912.0 W/m²) using the Shannon Entropy and COPRAS methods. Based on the variation in the data matrix, the entropy method assigned objective weights of approximately 0.79 to Nu and 0.21 to Tsur. In the COPRAS ranking, 100 per cent isopropyl alcohol at 90 mL/h and 2717.2 W/m² ranked first. This ranking does not reflect a genuine cooling advantage; it results from the low thermal conductivity of the fluid (k = 0.132 W/m·K) appearing in the denominator of the Nu definition. At $\Delta T \approx 6$ K, the heat transfer coefficient of this combination (445 W/m²K) is close to that of the 75 per cent methanol mixture (453 W/m²K), while its Nu value (168.73) is about 2.2 times higher. At a given heat flux, Nu and ΔT carry the same information (Spearman $\rho = -1$ in all 45 groups). Therefore, an entropy–COPRAS evaluation based on Nu and film temperature does not provide a suitable framework for fluid selection in electrospray cooling; MCDM methods can be used only with independent, physically meaningful criteria.

Keywords: Electrospray Cooling, Shannon Entropy, COPRAS, Multi-Criteria Decision Making, Nusselt Number, Thermal Conductivity

1. INTRODUCTION

The increasing power density of electronic components requires the safe dissipation of high heat fluxes from small surface areas, which highlights the limitations of traditional air/liquid cooling solutions. The electrospray (ES) cooling technique is a solution that is attracting attention in this context. This is because it stands out for its low pump power requirements, fine droplet generation and high heat flux removal capacity. This makes it a contender for next-generation electronic thermal management solutions (Gibbons & Robinson, 2017; Kabakuş, Öztürk, vd., 2024; Sönmez vd., 2026; Xu vd., 2021).

In ES cooling, an electric field is applied to the liquid meniscus emerging from the capillary tip, causing it to transform into a Taylor cone. The fine jet that separates from the tip of the cone is fragmented into micro/mini droplets due to electrohydrodynamic forces. When these droplets strike a heated surface, they facilitate high heat transfer via a combination of evaporation, boiling and thin-film flow (Gibbons & Robinson, 2017; Xu vd., 2021). Fine charged droplets offer advantages such as the suppression of splash back, improved wetting of the surface and the ability to cool large areas using single or multiple nozzle arrays (Gibbons & Robinson, 2017, 2018; Xu vd., 2021).

The performance of ES cooling is heavily reliant on the properties of the working fluid. Although water possesses superior thermophysical properties, such as high latent heat and thermal conductivity, its high surface tension and electrical conductivity make it difficult to maintain a stable conical jet regime, which limits the use of pure water in ES applications (Kabakuş, Sönmez, vd., 2024; Kim vd., 2020; Taheri vd., 2024). A balance between thermal properties and electrohydrodynamic stability is achieved by various binary mixtures that have been proposed; water–alcohol mixtures are particularly prominent in this context (Liu vd., 2018, 2019; Sonmez, 2026; Taheri vd., 2024).

In electrospray cooling, the primary parameters governing system performance include working fluid properties, volumetric flow rate, applied voltage, nozzle-to-surface distance, and nozzle geometry. Once a steady cone-jet mode is established, the geometric configuration of the nozzle exerts a secondary influence compared to fluid properties and flow rate (Gibbons & Robinson, 2017, 2018; Jowkar vd., 2019; Yakut, 2024). Nevertheless, the majority of existing literature remains confined to single-objective assessments, typically evaluating cooling performance solely through a single metric such as maximum critical heat flux or minimum surface temperature (Kim vd., 2020; Taheri vd., 2024; Tian vd., 2023; Xu vd., 2021, 2022). In contrast, the design objective for electronic cooling systems requires concurrently limiting surface temperature (minimising Tsur) and enhancing convective heat transfer (maximising Nu), which inherently transforms the selection of ES fluids and operating parameters into a multi-criteria decision-making (MCDM) problem (Chakraborty vd., 2024).

For this reason, the use of multi-criteria decision-making (MCDM) methods is becoming increasingly widespread. This is in the selection of heat sinks and thermal system design. A review study focused

on the selection of electronic heat sinks. It demonstrates that a number of factors must be taken into account. These are thermophysical and electrical properties. Also safety, cost and environmental impacts. This multi-dimensional problem can be solved more rationally. This can be done using MCDM techniques such as TOPSIS (Chakraborty vd., 2024). In this system, the Shannon Entropy method is used to decide how important each thing is based on the information we have. Ranking algorithms like COPRAS then use these weights to see how good different fluid/condition combinations are for a certain cost (Chakraborty vd., 2024; Shannon, 1948; Zavadskas vd., 1994).

The objective of this study is to examine the heat transfer properties of nine distinct fluids, including pure ethanol, methanol, and isopropyl alcohol, as well as combinations of these with water at concentrations of 50% and 75% by volume. The study will explores a broad range of experimental conditions, spanning a flow rate range of 10–90 mL/h and a heat flux spectrum of 2717.2–4912.0 W/m². The fluid–operating parameter combinations are ranked according to the film temperature (Ts) and Nusselt number (Nu) criteria. The experimental data were taken from Sonmez (2026); no new experiments were conducted, and the contribution of this study is the Shannon Entropy–COPRAS post-processing of that data set.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Experimental Setup

In the experimental setup, five different heat fluxes ranging from 2717.2 to 4912.0 W/m² were supplied to the system via silicone heaters, and temperature distributions were measured using T-type thermocouples. For the spraying process, the liquid was pumped through using a special machine (Hedy 15) to a small hole in the nozzle. The hole was made of stainless steel and was 0.25 mm wide, 0.51 mm wide at the outside, and 13 mm long. The establishment of a stable cone-jet mode was achieved through the fixing of a distance of 60 mm between the nozzle and the heat sink, and the connection of a high-voltage power supply (Nanoliz NL-K25) to the nozzle tip, resulting in the operation of the system at a constant voltage of 10 kV. A sum of nine distinct liquids were concocted by blending ethanol, methanol and isopropyl alcohol with H2O in volumetric proportions of 50 per cent, 75 per cent and 100 per cent; these liquids were pumped into the apparatus at flow rates of 10, 30, 50, 70 and 90 mL/h, and a grand total of 225 distinct amalgamations were examined through experimentation (Sonmez, 2026). The heat sink was fabricated from 6063-series aluminum with dimensions of 50 ×50 ×5mm (Asur = 2.5 ×10-3 m2, Lc = 0.05m), heated by a 50 ×50 ×2 mm silicone heater.

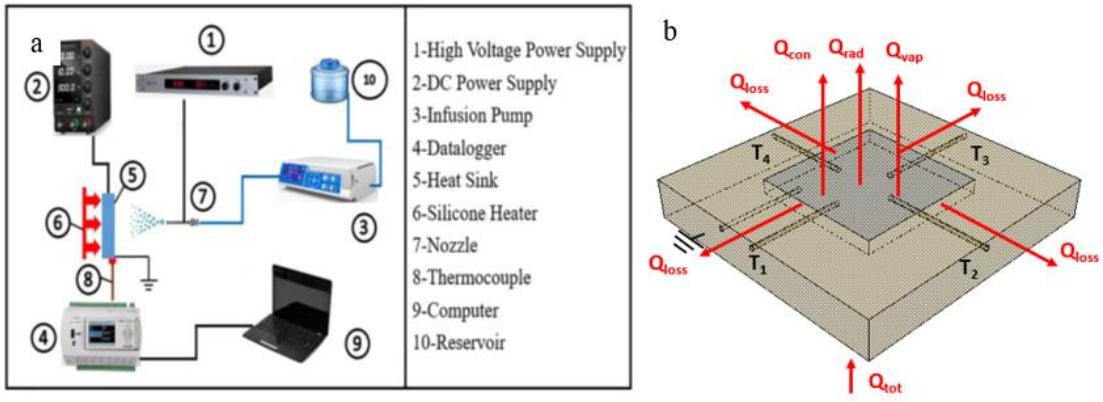


Figure 1. a) Schematic representation of the experimental setup, (b) heat transfer mechanisms on the heat sink (Adapted from Sonmez (2026))

A silicone heating element was attached to the back of the heat sink powered by a DC power supply, with thermal paste applied to minimize thermal contact resistance. The surface temperature was established by calculating the mean of the information collected from four T-type thermocouples (T1–T4) positioned in deep apertures on the lateral surfaces of the heat sink, and all temperature readings were documented using a Novus Fieldlogger data logger (Sonmez, 2026).

As demonstrated in Figure 1b, the overall heat equilibrium on the heat sink is represented as the aggregate of convection (Qcon), radiation (Qrad), evaporation (Qvap) and experimental heat losses (Qloss) (Eq. 1).

$$Qtot = Qcon + Qrad + Qvap + Qloss \quad (1)$$

Analyses carried out at low operating temperatures of around 90 °C have shown that the radiative component is less than 0.5 per cent, whilst ambient heat losses are less than 2.5 per cent. As these two components are negligible, the net heat transfer in the system has been modelled on the basis of convection and evaporation (Eq. 2):

$$Qtot = Qcon + Qvap \quad (2)$$

The total thermal power transferred from the DC power supply to the system was calculated as the product of the voltage (V) and current (I) values (Eq. 3); the total heat flux per unit area (q″) was determined by considering the active surface area of the heat sink (Asur) (Eq. 4). In the final stage, the average heat transfer coefficient (have) was calculated based on the difference between the average surface temperature of the heat sink (Tsur) and the ambient temperature (T∞) (Eq. 5), and the Nusselt number was obtained by normalising h_ave by the characteristic length and the thermal conductivity of the respective working fluid (Sonmez, 2026).

$$Qtot = V \cdot I \quad (3)$$

$$q'' = Qtot / A_sur \quad (4)$$

$$have = q'' / (Tsur - T\infty) \quad (5)$$

Upon examination of the accuracy and uncertainty values of the instruments in the measurement system, it is observed that the high-voltage power supply has an accuracy of ±0.01 per cent and an uncertainty of ±5 mV for voltage, and an accuracy of ±0.2 per cent and an uncertainty of ±2 mA for current. The accuracy of the infusion pump supplying the fluid to the system is ±2 per cent, whilst its deviation/uncertainty value is ±0.2 mL. The data logger recording the temperature data has an accuracy of ±0.2 per cent and a measurement uncertainty of ±1 °C. As a result of the analysis carried out using the general uncertainty equation defined by Holman (Holman, 2012), the total experimental uncertainty for the heat transfer coefficient, the key parameter of the study was determined to be 0.78 per cent (Sonmez, 2026).

2.2. The Shannon Entropy Method

The decision matrix consists of m alternatives (experimental/operational conditions) and n = 2 criteria (Tsur and Nu). Tsur is classified as a cost criterion to be minimised, whilst Nu is classified as a benefit criterion to be maximised. The Shannon Entropy method objectively determines the criterion weights by measuring the irregularity of the information distribution in the decision matrix (Chakraborty vd., 2024; Şengül vd., 2015; Shannon, 1948).

$$p_{ij}^{l} = \frac{x_{ij}^{l}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{u}}, p_{ij}^{u} = \frac{x_{ij}^{u}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{u}}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$h_j^{l} = \min\left\{-h_0 \sum_{i=1}^{m} p_{ij}^{l} \cdot \ln p_{ij}^{l}, -h_0 \sum_{i=1}^{m} p_{ij}^{u} \cdot \ln p_{ij}^{u}\right\}, j = 1, \dots, n \quad (7)$$

where h_0 is equal to $(\ln m)^{-1}$, and $p_{ij}^{l} \cdot \ln p_{ij}^{l}$ or $p_{ij}^{u} \cdot \ln p_{ij}^{u}$ is defined as 0 if $p_{ij}^{l} = 0$ or $p_{ij}^{u} = 0$

$$h_j^{u} = \max\{-h_0 \sum_{i=1}^{m} p_{ij}^{l} \cdot \ln p_{ij}^{l}, -h_0 \sum_{i=1}^{m} p_{ij}^{u} \cdot \ln p_{ij}^{u}\}, j = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$d_j^{l} = 1 - h_j^{u}, d_j^{u} = 1 - h_j^{l}, j = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$w_j^{l} = \frac{d_j^{l}}{\sum_{s=1}^{n} d_s^{u}}, w_j^{u} = \frac{d_j^{u}}{\sum_{s=1}^{n} d_s^{l}}, j = 1, \dots, n \quad (10)$$

Each value x_{ij} in the decision matrix is normalised using Eq. (6) to obtain p_{ij}; the entropy h_j of criterion j is calculated using Eqs. (7-8). A low entropy value indicates that the relevant criterion carries more information in the decision-making process. Criteria with a high degree of diversification d_j (Eq. 9), that is, criteria exhibiting a more irregular or wider distribution amongst the alternatives, are assigned a higher objective weight (w_j).

2.3. The COPRAS Method

The Complex Proportional Assessment (COPRAS) method is a multi-criteria decision-making (MCDM) technique that ranks alternatives according to their relative significance, determined directly and proportionally from the weighted sums of the benefit and cost criteria, which are processed separately within the same algorithm (Zavadskas vd., 1994).

$$\bar{r}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}}, \hat{r}_{ij} = w_j \cdot \bar{r}_{ij}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (11)$$

$$S_{+i} = \sum_{j \in B} \hat{r}_{ij}, S_{-i} = \sum_{j \in C} \hat{r}_{ij}, i = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-min} \sum_{i=1}^{m} S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{S_{-min}}{S_{-i}}\right)}, i = 1, \dots, m \quad (13)$$

The weighted normalised matrix $\hat{r}_{ij}$ (see Eq. 11) is constructed by applying the weights w_j derived from Shannon entropy. For each of the aforementioned alternatives, a calculation is performed in order to determine the total S_{+i} relating to the benefit criterion (Nu) and the total S_{-i} relating to the cost criterion (Tsur). This is achieved by means of the implementation of equation (12), and the determination of the relative importance Q_i is achieved by means of equation (13). The alternative with the highest Q_i is ranked first under the criteria and weights used; this ranking is a property of the criteria set and does not necessarily indicate the best physical cooling performance.

2.4. Criteria dependence check

To examine whether Nu and Ts carry independent information, two checks were applied. First, Spearman's rank correlation coefficient between Nu and ΔT was computed within each group of constant fluid, alcohol fraction and heat flux (n = 5 flow rates per group; 45 groups). Second, non-dominated (Pareto) alternatives were identified for the criteria pair (ΔT minimised, Nu maximised) across all 225 conditions. These checks are consistency checks of the identity Nu = q″L/(kΔT), not independent tests of a hypothesis.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Objective Criterion Weights Based on Shannon Entropy

The criterion weights obtained as a result of the Shannon Entropy analysis applied to the decision matrix comprising 225 conditions are presented in Table 1.

Table 1. Criterion weights determined using the Shannon Entropy method

Criterion	Criterion Type	Shannon Entropy Weight (w_j)
Surface Temperature, Tsur (°C)	Cost (minimisation)	0.2094
Nusselt Number, Nu	Benefit (maximisation)	0.7906
Total	–	1.0000

The Nu criterion was assigned a weight of w = 0.7906, whereas the Tsur criterion was assigned a weight of w = 0.2094. These weights indicate that, in the data set under consideration, the Nusselt number exhibits a more expansive and sporadic distribution in response to variations in fluid type, flow rate,

and heat flux. It is evident that the Nu value fluctuates within the range of approximately 10 to 170 under various fluid typologies and conditions. In comparison, the Tsur value demonstrates a more constrained variation, thus resulting in the asymmetric distribution. This observation consequently prompts the Shannon entropy approach to accord precedence to the Nu value as the primary criterion.

3.2. Ranking of Alternatives Using COPRAS

In this study, the weights obtained from Shannon entropy are used in the COPRAS algorithm to rank the 225 alternatives according to their relative importance (Q_i). The alternative that ranked first is presented in Table 2.

Table 2. The top-ranked alternative according to the Nu- and Tsur-based COPRAS analysis

Fluid	*Flow Rate (mL/h)*	*Heat Flux (W/m²)*	*Nu Value*
100 per cent Isopropyl Alcohol (IPA)	90	2717.2	168.73 (1st place, highest Q_i)

The findings indicate that operating at an isopropyl alcohol (IPA) flow rate of 90 mL/h at the lowest permissible heat flux level of 2717.2 W/m² in the experimental apparatus corresponds to a Nusselt number of 168.73, thereby resulting in the maximum Q_i value. An investigation of the upper echelons of the COPRAS ranking revealed that within the Shannon Entropy paradigm, characterised by the predominance of the Nu weighting, all the leading eight positions were occupied by combinations comprising isopropyl alcohol (see Table 3). This shows that the Nu-based ranking systematically favours isopropyl alcohol, which has the lowest thermal conductivity among the tested fluids; it does not indicate superior cooling performance.

Table 3. Top 10 fluid and operating parameter combinations ranked by the COPRAS method using Shannon entropy weights

Rank	*Fluid*	*Mixing Ratio*	*Heat Flux (W/m²)*	*Flow Rate (mL/h)*
1	Isopropyl	100%	2717.2	90
2	Isopropyl	75%	2717.2	90
3	Isopropyl	100%	3232.2	90
4	Isopropyl	75%	3684.8	90
5	Isopropyl	75%	3684.8	70
6	Isopropyl	75%	4264	90
7	Isopropyl	75%	2717.2	70
8	Isopropyl	75%	3232.2	90
9	Methanol	75%	2717.2	90
10	Isopropyl	75%	3684.8	50

The top-ranked alternative (100% IPA, 90 mL/h, 2717.2 W/m²) had ΔT = 6.1 K and h = 445 W/m²K; under the same conditions, 75% methanol had ΔT = 6.0 K, h = 453 W/m²K and Nu = 75.5. Nearly identical ΔT and h, but a 2.2-fold difference in Nu (168.73 vs 75.5), show that the ranking is governed by thermal conductivity (k = 0.132 W/m·K for IPA). The first-ranked point is a single unreplicated measurement: ΔT falls from 14.7 K at 70 mL/h to 6.1 K at 90 mL/h, and its Nu is 1.8 times that of the second-ranked alternative (92.2). Possible contributions of film spreading or cone-jet mode were not verified in this study. Six of the top eight entries in Table 3 are 75 per cent isopropyl–water mixtures and two are 100 per cent isopropyl alcohol.

Although methanol-water mixtures provide the highest heat transfer coefficients experimentally due to superior thermophysical properties, the significantly lower thermal conductivity of isopropyl alcohol (0.132 W/m·K) results in exceptionally high calculated Nusselt numbers (Nu = 168.73). Because the Shannon Entropy method assigned a dominant weight to Nu (w = 0.7906), this elevated Nusselt value heavily favored isopropyl alcohol in the COPRAS ranking.

The findings support the observation that, given the difficulty of maintaining a stable conical jet regime due to high surface tension, pure water and mixtures with low alcohol content lag behind in the COPRAS ranking as expected. Conversely, isopropyl alcohol, a substance characterised by its minimal latent heat and thermal conductivity, ranked highest under the Nu criterion within this framework; as shown above, this reflects its low thermal conductivity rather than a genuine cooling advantage, since it recorded the lowest h and highest surface temperatures among the tested fluids (Sonmez, 2026). This outcome has been attributed to its favourable impact on atomisation dynamics and film spreading.

A critical comparative takeaway emerges between the original experimental evaluation and the present MCDM model: While the experimental study (Sonmez, 2026) identified methanol-water mixtures as the superior fluid based on dimensional heat transfer coefficient (h) and surface temperature reduction, the entropy-weighted COPRAS framework favored isopropyl alcohol. This discrepancy is directly attributable to the definition of the dimensionless Nusselt number which penalizes high-conductivity fluids in its denominator. Because Shannon entropy assigned a dominant weight (0.7906) to Nu due to its broad variation across test cases, the ranking became largely governed by this dimensionless ratio rather than the raw heat dissipation capability.

3.3 Suitability of the criteria set

The two criteria used here are not independent of one another: since, for a given heat flux, Nu = q″L/(kΔT), the same information is conveyed by Nu and Ts, apart from the fluid's thermal conductivity k. Within each fluid–ratio–heat flux group, a perfect ranking correlation between Nu and ΔT was found (Spearman's ρ = −1 across all 45 groups), and only two points with ΔT values differing by 0.1 K were contained in the (ΔT, Nu) Pareto front. It is known that MCDM rankings are steered towards alternatives that perform well in repeated pairs by repeated criteria (Pelegrina vd., 2022), and the criterion is further emphasised with a broader distribution by entropy weighting (Mukhametzyanov, 2021). Therefore, selecting fluids for electrospray cooling is not possible using an entropy–COPRAS evaluation based on Nu and Ts. This does not mean that MCDM methods cannot be used for electrospray cooling. These methods can be used with different ways to measure things (for example temperature, how much liquid is used, power needed, safety, cost). But this needs more information that we did not look at in this study.

4. Conclusions

The present study applies an integrated Shannon Entropy–COPRAS evaluation to fluid type and operating parameters (flow rate, heat flux) in electrospray cooling. The results reveal a divergence between Nu-based rankings, which favour low-conductivity fluids, and h/ΔT-based rankings; this divergence arises from the conductivity term in the Nu definition and is not a physical trade-off between the criteria. A comprehensive evaluation of the performance of nine distinct water-alcohol mixtures under 225 operative conditions has been conducted. The ensuing summary encapsulates the salient conclusions derived from this evaluation.

1. The Shannon Entropy method assigned objective weights of 79.06 per cent to the Nu criterion and 20.94 per cent to the Tsur criterion, a determination based on the information content of the data set, thereby indicating that variability in the Nusselt number is a definitive factor in the decision-making process.

2. A comprehensive analysis of the COPRAS data revealed that operating at a flow rate of 90 mL/h and a heat flux of 2717.2 W/m² was identified as the top-ranked alternative under the Nu-weighted criteria,

reaching a Nusselt number of 168.73; this reflects the highest Nu-to-conductivity ratio rather than the lowest absolute surface temperature or highest cooling capacity. The analysis further revealed that all of the top eight entries were mixtures containing isopropyl alcohol.

3. This result is primarily governed by the low thermal conductivity of isopropyl alcohol in the Nu definition, a possible contribution of the cone-jet mode or film spreading was not verified in this study.

4. Because Nu and Ts are physically dependent, an entropy–COPRAS evaluation based on these two criteria is not suitable for fluid selection in electrospray cooling; MCDM may be considered only with independent, physically meaningful criteria.

This study highlights that selecting dimensionless groups (Nu) versus dimensional parameters (h) as decision criteria can fundamentally invert MCDM rankings in thermal management problems. Designers seeking the highest convective-to-conductive heat transfer ratio should reference Nu-based rankings, whereas applications demanding the lowest absolute surface temperatures and the maximum raw heat dissipation must prioritise dimensional heat transfer coefficients (h).

Limitations. The analysis uses two criteria that are physically related ($h = q''/\Delta T$), so it does not constitute an independent multi-criteria problem. Each condition was measured once, ΔT reaches about 6 K at the top-ranked point (relative uncertainty about 20–25 per cent), flow rate and applied voltage (10 kV) were fixed across fluids without spray-mode imaging, and the entropy weights depend on data dispersion and on the choice of temperature scale.

The research indicates that, in the design of electrospray (ES) cooling systems, the selection of fluid should not be based on a single performance criterion. Rather, criteria should be chosen with care, since dimensionless groups such as Nu may distort rankings when fluid properties enter their definition. Under the Nu-based ranking used here, 75–100 per cent isopropyl alcohol ranks highest; this reflects the conductivity term in Nu and should not be interpreted as superior cooling performance. Conversely, where the objective is to minimise the surface temperature or maximise the dimensional heat transfer coefficient (h)—i.e., the actual cooling capacity of the fluid—methanol mixtures with elevated water content are recommended, consistent with the parent experimental study (Sonmez, 2026). In order to verify possible mechanisms, it is recommended that future studies be supported by measurements of droplet size distribution and high-speed imaging studies.

REFERENCES

Chakraborty, S., Shukla, D., & Kumar Panigrahi, P. (2024). A review on coolant selection for thermal management of electronics and implementation of multiple-criteria decision-making approach. *Applied Thermal Engineering*, *245*, 122807. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.122807

Gibbons, M. J., & Robinson, A. J. (2017). Heat transfer characteristics of single cone-jet electrosprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *113*, 70–83. https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2017.04.119

Gibbons, M. J., & Robinson, A. J. (2018). Electrospray array heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*, *129*, 451–461. https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2018.03.021

Holman, J. P. . (2012). *Experimental methods for engineers*. 739.

Jowkar, S., Jafari, M., & Morad, M. R. (2019). Heat transfer characteristics of high flow rate electrospray and droplet cooling. *Applied Thermal Engineering*, *162*, 114239. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.114239

Kabakuş, A., Öztürk, A., & Sönmez, F. (2024). A new approach to cooling photovoltaic panels: Electrospray cooling. *Case Studies in Thermal Engineering*, *64*, 105545. https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2024.105545

Kabakuş, A., Sönmez, F., & Öztürk, A. (2024). Thermal Analysis of Photovoltaic Panel Cooled by

Electrospray Using Different Fluids. *Duzce University Journal of Science and Technology*, *12*(4), 2271–2282. https://doi.org/10.29130/DUBITED.1492678

Kim, Y., Jung, S., Kim, S., Choi, S. T., Kim, M., & Lee, H. (2020). Heat transfer performance of water-based electrospray cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *118*, 104861. https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2020.104861

Liu, H., Cai, C., Jia, M., Gao, J., Yin, H., & Chen, H. (2019). Experimental investigation on spray cooling with low-alcohol additives. *Applied Thermal Engineering*, *146*, 921–930. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.10.054

Liu, H., Cai, C., Yin, H., Luo, J., Jia, M., & Gao, J. (2018). Experimental investigation on heat transfer of spray cooling with the mixture of ethanol and water. *International Journal of Thermal Sciences*, *133*, 62–68. https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2018.07.018

Mukhametzyanov, I. Z. (2021). Specific character of objective methods for determining weights of criteria in MCDM problems: Entropy, CRITIC and SD. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, *4*(2), 76–105. https://doi.org/10.31181/DMAME210402076I

Pelegrina, G. D., Duarte, L. T., Grabisch, M., & Romano, J. M. T. (2022). Dealing with redundancies among criteria in multicriteria decision making through independent component analysis. *Computers & Industrial Engineering*, *169*, 108171. https://doi.org/10.1016/J.CIE.2022.108171

Şengül, Ü., Eren, M., Eslamian Shiraz, S., Gezder, V., & Sengül, A. B. (2015). Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable Energy*, *75*, 617–625. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2014.10.045

Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, *27*(3), 379–423. https://doi.org/10.1002/J.1538-7305.1948.TB01338.X;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Sonmez, F. (2026). EXPERIMENTAL STUDY AND COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTROSPRAY COOLING WITH WATER-ALCOHOL MIXTURES. *Heat Transfer Research*, *57*(4). https://doi.org/10.1615/HEATTRANSRES.2025061208

Sönmez, F., Kabakuş, A., & Öztürk, A. (2026). Determination of optimum parameters in photovoltaic panel with electrospray cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, *17*(5), 104106. https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2026.104106

Taheri, V., Ebrahimi Rahnama, H., & Morad, M. R. (2024). High flow rate electrospray cooling performance of water–ethanol mixtures. *Applied Thermal Engineering*, *239*, 122200. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.122200

Tian, J., Kong, L., Li, B., Chen, Y., Wang, Z., Wang, J., & others. (2023). Experimental investigation on heat transfer performance during electrospray cooling with ethanol--R141b mixture. *Applied Thermal Engineering*, *230*, 120879.

Xu, H., Wang, J., Li, B., Yu, K., Tian, J., Wang, D., & Zhang, W. (2021). Effect of spray modes on electrospray cooling heat transfer of ethanol. *Applied Thermal Engineering*, *189*, 116757.

Xu, H., Wang, J., Li, B., Yu, K., Wang, H., Tian, J., & Li, B. (2022). Electrospray characteristics and cooling performance of dielectric fluid HFE-7100. *Energy*, *259*, 125072.

Yakut, R. (2024). Response surface methodology-based multi-nozzle optimization for electrospray cooling. *Applied Thermal Engineering*, *236*, 121914.

Yakut, R., Yakut, K., Sabolsky, E., & Kuhlman, J. (2021). Determination of heat transfer and spray performances of isopropyl alcohol electrospray. *Sensors and Actuators A: Physical*, *332*, 113135.

Zavadskas, E., Kaklauskas, A., & Šarka, V. (1994). *The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects*. https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/111916

EFFECTS OF VERMICOMPOST ON STRAWBERRY CULTIVATION

Dr. Ahmet Safak MALTAS

Akdeniz University, Finike Vocational School, Department of Plant and Animal Production, Finike, Turkiye.

ORCID ID: 0000-0001-7056-3771

Abstract

This study aimed to determine the effects of different application rates of vermicompost fertilizer on the vegetative growth, leaf development, fruit characteristics, and yield per plant of strawberry. The experiment was conducted under plastic greenhouse conditions using three different treatments: control (A1), 75 kg da^{-1} vermicompost fertilizer (A2), and 150 kg da^{-1} vermicompost fertilizer (A3), with three replications. The average stem length, stem diameter, number of leaves, and chlorophyll content of strawberry plants, as well as fruit width, fruit length, fruit weight, and yield per plant, were investigated. The effects of vermicompost applications on average stem length and stem diameter were statistically insignificant, whereas their effects on the number of leaves and chlorophyll content were significant. The average number of leaves per plant was 12.68 in the control treatment, while it was 14.33 and 15.72 in the 75 and 150 kg da^{-1} vermicompost treatments, respectively. Chlorophyll content was 32.5 in the control treatment and reached 34.7 and 34.5 in the 75 and 150 kg da^{-1} vermicompost treatments, respectively. Fruit width was significantly affected by the treatments, with the value increasing from 30.31 mm in the control treatment to 31.07 and 33.62 mm in the 75 and 150 kg da^{-1} vermicompost treatments, respectively. No statistically significant differences were found among the treatments in terms of fruit length and fruit weight. Yield per plant increased from 245.0 g in the control treatment to 287.0 and 318.0 g in the 75 and 150 kg da^{-1} vermicompost treatments, respectively. In conclusion, the application of 150 kg da^{-1} vermicompost fertilizer provided the highest values in terms of leaf development, fruit width, and yield per plant.

Keywords: Organic fertilizer, strawberry, vermicompost, chlorophyll.

1. INTRODUCTION

Strawberries (Fragaria×ananassa Duch.) are one of the most important fruit species cultivated worldwide due to their distinctive aroma, flavor, and color, as well as their high nutritional value. They are also economically significant because they can be used not only for fresh consumption but also in processed products, adapt to various cultivation systems, and produce a crop quickly under suitable conditions. In strawberry cultivation, achieving high-quality yields depends on the proper management of numerous factors, including the plant's vegetative growth, leaf formation, photosynthetic activity, fruit development, and the adequate supply of nutrients.

From the perspective of sustainable crop production, it is important that fertilization practices not only meet the plant's nutrient requirements but also contribute to the preservation of the growing environment's physical, chemical, and biological properties (Kayişoğlu and Türksoy 2023; Akkeçeci 2025). In this context, research on the use of organic-based fertilizers and soil conditioners is becoming increasingly important. The use of organic materials in agricultural production can contribute not only to providing nutrients to plants but also to supporting organic matter content and microbial activity (Akınoğlu et al. 2025).

Vermicompost is an organic material produced through the decomposition and stabilization of organic matter by the combined activity of earthworms and microorganisms; it may contain plant nutrients and biologically active compounds. It has been reported that during the vermicomposting process, the breakdown of organic materials can convert certain nutrients into more accessible forms and enable the material to acquire properties that support plant growth (Abacıoğlu et al. 2020). It is also noted that

vermicompost may contain beneficial microorganisms, humic substances, and biological compounds that can influence plant growth (Abacıoğlu et al. 2020).

The effects of vermicompost on plant growth may not be limited solely to the provision of nutrients. It has been reported that the humic substances, microorganisms, and various biologically active compounds contained in vermicompost can support plant growth (Oyege and Balaji Bhaskar). However, the effect of vermicompost may vary depending on the characteristics of the organic material used, the application rate, the plant species, the growing medium, and environmental conditions. Therefore, studies conducted on different plant species and at different application rates are important for determining the agricultural potential of vermicompost.

Previous studies on the use of vermicompost in strawberry plants have also yielded positive results. A study conducted by Arancon et al. (2003) found that different vermicompost applications could increase growth and yield characteristics of strawberry plants, such as leaf area, shoot biomass, number of flowers, and marketable fruit weight. It has been reported that vermicompost applications increase plant spread, leaf area, dry matter content, and total fruit yield in strawberries (Singh et al. 2010). Additionally, it has been noted that vermicompost application may have positive effects on fruit quality and certain physiological disorders (Singh et al. 2010).

The effects of vermicompost on physiological processes in strawberry plants have also been investigated. It has been reported that vermicompost applications may support the growth and development of strawberry plants by enhancing photosynthetic properties and soil enzymatic activity (Kılıç et al. 2023). However, it should be noted that plant responses to vermicompost applications may vary depending on the application rate, and higher application rates may not necessarily result in greater growth or yield under all conditions. This underscores the importance of determining the appropriate vermicompost rate in strawberry cultivation.

In strawberries, traits such as the number of leaves and chlorophyll content are among the key indicators used to assess the plant's vegetative growth and photosynthetic capacity (Shirko et al. 2018). In addition, traits such as fruit width, fruit length, fruit weight, and yield per plant serve as key criteria for determining the impact of treatments on crop performance (Roussos et al. 2022). Therefore, evaluating vermicompost applications in terms of both vegetative growth and fruit traits and yield will contribute to the identification of appropriate fertilization practices.

The objective of this study was to determine the effects of vermicompost fertilizer applied at different rates on the vegetative growth, leaf characteristics, fruit characteristics, and yield per plant of the Albion strawberry variety grown under plastic greenhouse conditions. Accordingly, by comparing the control treatment with vermicompost applications at 75 and 150 kg da^{-1}, the study aimed to reveal the effects of different vermicompost rates on the development and yield performance of strawberry plants.

2. MATERIAL AND METHODS

The experiment was conducted under plastic greenhouse conditions on the experimental plot belonging to the Finike Vocational School of Akdeniz University, using a randomized block design. In the study, three treatments—control, 75 kg da^{-1} of vermicompost fertilizer, and 150 kg da^{-1} of vermicompost fertilizer—were applied in triplicate. The composition of the vermicompost fertilizer used in the experiment is presented in Table 1.

Table 1. Composition of the vermicompost used in the experiment.

Parameter	Content
pH	6.0-8.0
Organic matter (%)	45
EC (dS m^{-1})	6.0
Total N (%)	3.0

Total P_2O_5 (%)	1.5
Total K_2O (%)	1.0
Total humic-fulvic acid (%)	25
C N^{-1} ratio	9.1

Organic fertilizer applications were carried out 7 days before the planting of strawberry seedlings. Black plastic mulch was used throughout the growing season to limit weed growth.

To determine vegetative growth and leaf development in strawberry plants, average stem height, stem diameter, number of leaves, and chlorophyll content (SPAD value) were examined. Measurements of these traits were taken on 10 plants selected from each plot 65 days after seedling planting. The averages of the measured values were calculated to obtain a single value for each plot, which was then used in statistical analyses.

To determine fruit characteristics, fruit width, fruit length, and fruit weight were measured, and yield per plant was also determined. Fruit measurements were taken during each harvest period, and the values obtained were evaluated by calculating their averages over the growing season. Yield per plant was calculated by dividing the total fruit yield from each plot by the number of plants in the plot and was expressed in g $plant^{-1}$.

Statistical analyses were performed using the XLSTAT software package. Analysis of variance (ANOVA) was conducted to determine the effects of the treatments on the characteristics under study. The significance level for differences between treatments was set at 5%, and the Duncan multiple range test was used to compare significantly different means.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The effects of vermicompost fertilizer applied at different rates on the vegetative growth and leaf characteristics of strawberry plants are presented in Table 2. The effects of vermicompost applications on average stem length and stem diameter were found to be statistically insignificant. While the average stem length ranged from 16.58 to 16.89 cm, the highest value of 16.89 cm was observed with the 75 kg da^{-1} vermicompost application. Stem diameter ranged from 13.24 to 14.87, and the highest value was again obtained with the 75 kg da^{-1} application. However, the fact that these differences were not statistically significant indicates that the applied vermicompost doses did not have a pronounced effect on these two growth characteristics. Although previous studies have reported that vermicompost can enhance plant growth in strawberries, it has been noted that this effect may vary depending on the application rate, growing medium, and growing conditions (Arancon et al. 2003). It has been reported that vermicompost applications increase leaf area, shoot biomass, and fruit weight—which is a market value indicator—in strawberries (Arancon et al. 2003).

Table 2. Effects of treatments on the average stem height, average stem age, average number of leaves, and chlorophyll content of strawberry plants

Application	Average stem height (cm)	Average stem diameter (mm)	Average number of leaves (per plant)	chlorophyll content
A1	16.58	13.61	12.68b	32.5b
A2	16.89	14.87	14.33a	34.7a
A3	16.82	13.24	15.72a	34.5a
Significance	n.s.	n.s.	**	***
Minimum	16.58	13.61	12.68	32.5
Maximum	16.89	14.87	15.72	34.7
Mean	16.76	13.91	14.24	33.9
% ratio	1.87	9.26	16.09	6.77

** : P ≤0.01, *** : P ≤0.001, n.s.: Non significant

The effect of vermicompost applications on the average number of leaves was found to be significant at the $P \leq 0.01$ level. The average number of leaves, which was 12.68 in the control treatment, increased to 14.33 and 15.72, respectively, in the 75 and 150 kg da^{-1} vermicompost treatments. Thus, the highest number of leaves was obtained in the 150 kg da^{-1} treatment, resulting in a value approximately 24% higher than that of the control. However, the fact that the 75 and 150 kg da^{-1} treatments fell within the same statistical group indicates that increasing the dose from 75 kg da^{-1} to 150 kg da^{-1} did not elevate the numerical increase in leaf count to a statistically significant level. Previous studies have also demonstrated that different vermicompost applications can increase leaf number and leaf area in strawberries (Zuo et al. 2018). A greenhouse study reported that vermicompost applications significantly increased leaf number and leaf area in strawberries (Bai et al. 2025).

The difference in chlorophyll content among the treatments was found to be significant at the $P \leq 0.001$ level. The chlorophyll value, which was 32.5 in the control treatment, was determined to be 34.7 and 34.5, respectively, in the treatments with 75 and 150 kg da^{-1} of vermicompost. The fact that both vermicompost treatments yielded values higher than the control indicates that vermicompost applications have a positive effect on leaf chlorophyll levels. However, the fact that the 75 and 150 kg da^{-1} treatments fell within the same statistical group suggests that the higher dose did not result in an additional statistically significant increase in chlorophyll content. It has previously been reported that vermicompost application can increase chlorophyll content and net photosynthesis rate in strawberries (Sahana et al. 2020).

Results regarding fruit characteristics are presented in Table 3. The effect of vermicompost applications on average fruit width was found to be significant at the $P \leq 0.001$ level.

Table 3. Effects of the treatments on the average fruit width, average fruit length, average fruit weight, and average yield per plant of the strawberry plant

Application	Average fruit width (mm)	Average fruit length (mm)	Average fruit weight (g fruit^{-1})	Average yield (g plant^{-1})
A1	30.31b	34.02	5.77	245.0b
A2	31.07a	35.27	6.04	287.0ab
A3	33.62a	36.11	6.21	318.0a
Significance	***	Ö.d.	Ö.d.	**
Minimum	30.31	34.02	5.77	245.0
Maximum	33.62	36.11	6.21	318.0
Mean	31.67	35.13	6.01	283.33
% ratio	10.92	5.88	7.63	29.80

** : $P \leq 0.01$, *** : $P \leq 0.001$, n.s.: Non significant

The average fruit width, which was 30.31 mm in the control treatment, increased to 31.07 and 33.62 mm, respectively, in the 75 and 150 kg da^{-1} vermicompost treatments. The fact that the A2 and A3 treatments fall within the same statistical group indicates that both vermicompost rates resulted in greater fruit width compared to the control treatment. Similarly, various studies have reported that vermicompost applications can have positive effects on fruit development and yield in strawberries. Singh et al. reported that vermicompost applications increased plant growth and total fruit yield in strawberries and that the application rate could affect fruit characteristics. However, in the present study, differences between treatments in terms of fruit length and fruit weight were not found to be statistically significant. Fruit length ranged from 34.02 to 36.11 mm, while fruit weight ranged from 5.77 to 6.21 g. Therefore, it can be concluded that the effect of vermicompost on fruit development in this study was particularly evident in fruit width.

The difference in yield per plant among the treatments was found to be significant at the $P \leq 0.01$ level. The yield per plant, which was 245.0 g in the control treatment, increased to 287.0 g in the 75 kg da^{-1} treatment and to 318.0 g in the 150 kg da^{-1} treatment. Accordingly, the 150 kg da^{-1} treatment yielded

approximately 29.8% higher yield compared to the control treatment. The fact that the A3 treatment yielded the highest yield indicates that the positive effects of vermicompost application on plant growth are also reflected in yield values. Previous studies also support the finding that vermicompost increases yield in strawberries. Arancon et al. (2003) reported that vermicompost applications increased the average fruit weight, which is a key market value indicator, while Singh et al. (2010) noted that vermicompost applications resulted in a significant increase in total fruit yield. Furthermore, a recent study demonstrated that vermicompost-based fertilization can positively influence plant growth and yield in strawberries (Li et al. 2024; Hussein and Salih 2026).

Overall, it was determined that vermicompost applications did not result in statistically significant changes in stem length and stem diameter in strawberry plants; however, they did have significant effects on the number of leaves, chlorophyll content, fruit width, and yield per plant. In particular, the application of 150 kg da^{-1} of vermicompost yielded the highest values for leaf number, fruit width, and yield per plant. These results indicate that vermicompost may serve as a potential organic fertilizer source in strawberry cultivation, particularly in supporting plant leaf development and yield performance. However, it should be noted that the effects of vermicompost may vary depending on the growing medium, application method, application rate, and growing conditions.

4. CONCLUSION

In this study, the effects of vermicompost fertilizer applied at different rates on plant growth, leaf characteristics, fruit characteristics, and yield per plant in the Albion strawberry variety grown under plastic greenhouse conditions were investigated. According to the results, vermicompost applications had no statistically significant effect on average stem length and stem diameter. In contrast, the average number of leaves and chlorophyll content were significantly affected by the applications. Vermicompost applications resulted in higher numbers of leaves and higher chlorophyll values compared to the control treatment.

When fruit characteristics were evaluated, it was determined that vermicompost applications had a significant effect on fruit width but did not result in a statistically significant difference in fruit length or fruit weight. Yield per plant was significantly affected by the treatments, with the highest yield of 318.0 g per plant achieved with the 150 kg da^{-1} vermicompost application. This value is approximately 29.8% higher than the yield of 245.0 g per plant determined in the control treatment.

In conclusion, under the conditions studied, the 150 kg da^{-1} vermicompost application provided the highest values, particularly in terms of leaf development, fruit width, and yield per plant. However, evaluating the effects of vermicompost application rates in strawberry cultivation under different growing conditions will contribute to determining the appropriate application rate.

REFERENCES

Abacıoğlu, E., Yatgın, S., Tokel, E., & Yücesoy, P. (2020). Vermikompostun (solucan gübresi) üretimi ve bitki beslemesindeki önemi. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, *3*(1), 1-10.

Akınoğlu, G., Rakıcıoğlu, S., Demirkaya, S., Civelek, Z., Horuz, A., Ay, A., & Kuleyin, İ. (2025). Kimyasal ve organik gübrelerin toprak sağlığına etkileri. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *8*(5), 2546-2573.

Akkeçeci, Ş. (2025). Tarımda Gübre Uygulamasının Tarihsel Süreci: Tarla Bitkileri Perspektifiyle Bir Değerlendirme. *Agro Science Journal of Igdir University*, *3*(2), 72-84.

Arancon N.Q., Edwards C.A., Bierman P., Metzger J.D., Lee S., Welch C. (2003) Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries. Pedobiologia 47: 731-735.

Bai, X., Lu, W., Xu, J., Li, Q., Xue, Z., & Wang, X. X. (2025). Effects of cattle manure and sludge vermicompost on nutrient dynamics and yield in strawberry cultivation with distinct continuous cropping histories in a greenhouse. *Frontiers in plant science*, *15*, 1514675.

Hussein, N. I., & Salih, S. H. (2026). Response of the Strawberry Plant Variety "Rubygem" to the Addition of Vermicompost and Foliar Application With Potassium and Boron. *Journal of Kirkuk University for Agricultural Sciences*, *17*(2), 264.

Kayişoğlu, Ç., & Türksoy, S. (2023). Tarımda sürdürülebilirlik ve gıda güvenliği. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *37*(1), 289-303.

Kılıç, N., Daşgan, H. Y., & İkiz, B. (2023). Çilek Yetiştiriciliğinde Farklı Organik Gübre Uygulamalarının Verim, Meyve Kalitesi, Bitki Büyümesi ve Beslenmesi Üzerine Etkisi. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, *9*(1), 1-12.

Li, J., Brecht, J. K., Agehara, S., & Zhao, X. (2024). Effects of Sunn Hemp, Vermicompost, and Organic Fertilizers on Organic Strawberry Plant Growth, Yield, and Fruit Quality. *International Journal of Fruit Science*, *24*(1), 273-292.

Oyege, I., & Balaji Bhaskar, M. S. (2023). Effects of vermicompost on soil and plant health and promoting sustainable agriculture. *Soil Systems*, *7*(4), 101.

Roussos, P. A., Triantafillidis, A., Kepolas, E., Peppas, P., Piou, A., Zoti, M., & Gasparatos, D. (2022). Effects of integrated and organic management on strawberry (cv. Camarosa) plant growth, nutrition, fruit yield, quality, nutraceutical characteristics, and soil fertility status. *Horticulturae*, *8*(2), 184.

Sahana, B. J., Madaiah, D., Shivakumar, B. S., Sridhara, S., & Pradeep, S. (2020). Influence of organic manures on growth, yield and quality of strawberry (Fragaria× ananassa Duch.) under naturally ventilated polyhouse. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *9*(5), 3284-3287.

Shirko, R., Nazarideljou, M. J., Akbar, M. A., & Naser, G. (2018). Photosynthetic reaction, mineral uptake, and fruit quality of strawberry affected by different levels of macronutrients. *Journal of Plant Nutrition*, *41*(14), 1807-1820.

Singh, R., Sharma, R. R., & Singh, D. B. (2010). Effect of vermicompost on plant growth, fruit yield and quality of strawberries in irrigated arid region of northern plains. *Indian journal of Horticulture*, *67*(3), 318-321.

Zuo, Y., Zhang, J., Zhao, R., Dai, H., & Zhang, Z. (2018). Application of vermicompost improves strawberry growth and quality through increased photosynthesis rate, free radical scavenging and soil enzymatic activity. *Scientia Horticulturae*, *233*, 132-140.

EFFECTS OF LEONARDITE APPLICATION ON LETTUCE GROWTH UNDER GREENHOUSE CONDITIONS

Dr. Ahmet Safak MALTAS

Akdeniz University, Finike Vocational School, Department of Plant and Animal Production, Finike, Turkiye.

ORCID ID: 0000-0001-7056-3771

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the effects of applying different doses of powder leonardite on the vegetative growth, leaf formation, and plant biomass of lettuce (Lactuca sativa L.). To this end, leonardite applications at rates of 100 kg/da, 200 kg/da, and 400 kg/da, along with a control, were evaluated, and plant height, leaf width, root diameter, chlorophyll content, number of green leaves, number of shed leaves, weight of shed leaves, and average plant weight were examined. While the applications resulted in statistically significant differences in plant height and root diameter, their effects on leaf width and chlorophyll content were not found to be significant. While plant height was 17.19 cm in the control treatment, it was determined to be 17.77, 18.93, and 18.85 cm in the 100 kg/da, 200 kg/da, and 400 kg/da leonardite treatments, respectively, with the highest value obtained from the 200 kg/da leonardite treatment. Root diameter ranged from 25.48 to 28.63 mm, with the highest value observed in the 400 kg/da leonardite application. The effects of leonardite applications on leaf formation and plant weight were more pronounced. The highest number of green leaves (36.05 per plant), fresh leaf weight (30.01 g per plant), and average plant weight (556.13 g per plant) were obtained from the 200 kg/da leonardite application. The average plant weight was 52.25% higher than that of the control treatment. However, increasing the leonardite dose to 400 kg/da did not result in any further increase in plant weight. In conclusion, it was determined that, under current growing conditions, the application of 200 kg/da of powdered leonardite is the most suitable dose in terms of the vegetative growth and biomass production of lettuce plants.

Keywords: Greenhouse, leonardite, soil conditioner, lettuce, chlorophyll.

1. INTRODUCTION

Lettuce (Lactuca sativa L.) is one of the major leafy vegetable species widely cultivated worldwide due to its short growing period and high vegetative growth capacity. Since the economic value of the crop depends largely on the quantity and quality of the marketable green foliage, ensuring rapid and balanced vegetative growth is crucial in lettuce cultivation. Therefore, meeting the plant's nutrient requirements through appropriate fertilization programs is one of the fundamental practices for achieving high biomass production, particularly in lettuce, which has a short growing season.

The widespread use of mineral fertilizers in intensive and continuous crop production systems, while ensuring that plant nutrient requirements are met rapidly, can lead to various problems in the long term regarding soil properties and environmental sustainability (Dwivedi and Dwivedi 2015; Krasilnikov et al. 2022). For this reason, the evaluation of alternative and sustainable sources in plant nutrition programs is becoming increasingly important. Organic materials are of interest not only because of their potential to provide nutrients to plants but also because they can contribute to the improvement of soil properties (Rosen and Allan 2007; Larney and Angers 2012; Panday et al. 2024; Zhao et al. 2025). In this context, it is important to determine the potential of various organic and organomineral materials to support plant growth in vegetable cultivation.

Leonardite is used in agricultural production as a material containing a high proportion of oxidized organic matter and is particularly rich in humic substances. The potential effects of leonardite on soil and plant growth are associated with the humic and fulvic substances it contains (Arrobas et al. 2022; Campos et al. 2026). The fact that these compounds can influence the availability of nutrients in the

soil, root development, and the processes by which plants utilize nutrients demonstrates that leonardite is one of the materials that can be utilized in crop production. However, the effect of leonardite on plant growth may vary depending on the material's properties, application rate, soil conditions, and the type of plant being grown (Aguiar et al. 2024).

With fast-growing leafy vegetables such as lettuce, the effectiveness of fertilization practices should be evaluated not only based on a single growth parameter—such as plant height—but also on interrelated characteristics such as leaf formation, root development, and total plant biomass. In lettuce, where leaves constitute a large portion of the marketable product, increases in leaf number and plant weight are directly related to production performance. Therefore, a combined evaluation of the effects of leonardite application rates on various vegetative growth characteristics and plant weight in lettuce can help determine the appropriate application level.

Furthermore, more information is needed regarding the fact that the plant's developmental response to different application rates of leonardite powder in lettuce cultivation is not consistent across all growth parameters, and that higher rates may not always result in better plant growth. In particular, a combined evaluation of the effects of different doses on multiple growth traits—such as plant height, root diameter, leaf formation, and total plant weight—is important for determining the appropriate application level.

The aim of this study is to determine the effects of powdered leonardite applications at different doses on the vegetative growth, leaf formation, and plant biomass of lettuce. In this context, the control treatment was compared with leonardite applications at 100, 200, and 400 kg, and plant height, leaf width, root diameter, chlorophyll content, number of green leaves, number of shed leaves, weight of shed leaves, and average plant weight were evaluated. The results of this study are expected to contribute to determining the appropriate application rate of powdered leonardite in lettuce cultivation and to the development of sustainable plant nutrition practices.

2. MATERIAL AND METHODS

The study was conducted using a randomized block design with four treatments—A1 (control), A2 (100 kg da^{-1} of powdered leonardite), A3 (200 kg da^{-1} of powdered leonardite), and A4 (400 kg da^{-1} of powdered leonardite)—each with three replicates. The leonardite treatments were applied to the soil two weeks before planting the lettuce seedlings and were thoroughly mixed with the soil to ensure uniform distribution. The seedlings were planted with an inter-row and intra-row spacing of 40 cm. Curly lettuce seedlings purchased as ready-to-plant seedlings were used in the study, and 30 lettuce plants were grown in each plot. Harvesting was conducted 55 days after planting the lettuce seedlings. During harvesting, 10 lettuce plants were randomly selected from each plot, and all measurements and evaluations were performed on these plants. Leaf chlorophyll content was determined using an SPAD meter.

Statistical analyses of the obtained data were performed using XLSTAT software (version 2016.02.28451; Addinsoft, France). The Least Significant Difference (LSD) test was used to compare the mean values of the treatments at a 5% significance level ($P \leq 0.05$).

3. RESULTS AND DISCUSSION

When the effects of leonardite powder applications on the growth of lettuce were evaluated, it was observed that the applications had varying degrees of effect on different growth characteristics of the plant (Table 1).

Table 1. Effect of leonardite powder applications on plant height, leaf width, root diameter, and chlorophyll content of lettuce plants

Applications	Plant height (cm/plant)	Leaf width (cm/leaf)	Root diameter (mm/plant)	Chlorophyll content
A1	17.19b	13.26	25.48b	21.69
A2	17.77b	13.84	27.61ab	22.53
A3	18.93a	13.62	27.07ab	21.14
A4	18.85a	13.38	28.63a	22.06
Significance	**	n.s.	***	n.s.
Minimum	17.19	13.26	25.48	21.14
Maximum	18.93	13.84	28.63	22.53
Mean	18.19	13.53	27.20	21.86
% difference	10.12	4.37	12.36	6.58

** : P ≤0.01, *** : P ≤0.001, n.s.: Non significant

Plant height was 17.19 cm in the control treatment, while it was determined to be 17.77, 18.93, and 18.85 cm in the 100, 200, and 400 kg leonardite treatments, respectively. The highest plant height was obtained in the 200 kg treatment, showing a 10.12% increase compared to the control treatment. Root diameter increased from 25.48 mm in the control treatment to 28.63 mm in the 400 kg treatment, with a difference of 12.36% between the maximum values. In contrast, changes in leaf width and chlorophyll content associated with the different treatments were not found to be statistically significant. The increases observed in plant height and root diameter may be related to the ability of humic substances contained in leonardite to promote plant growth by supporting root development and nutrient uptake. It has been reported that humic substances can specifically improve root architecture and root development, which in turn can positively affect shoot development (Canellas and Olivares, 2014). Indeed, it has been determined that humic substances derived from leonardite can increase shoot and root biomass in lettuce, although the plant response may vary depending on the application rate and method (Atero-Calvo et al., 2024). Conversely, the absence of significant differences in leaf width and chlorophyll content suggests that the effect of leonardite may vary depending on the developmental traits examined.

The effect of leonardite applications was more pronounced in terms of leaf formation and biomass accumulation in the plants (Table 2). While the number of green leaves was 26.36 per plant in the control treatment, it was determined to be 32.41, 36.05, and 33.71 per plant in the 100, 200, and 400 kg treatments, respectively. The highest value was obtained in the 200 kg application, representing a 36.76% increase compared to the control treatment. Similarly, the number of discarded leaves was 5.25 per plant in the control treatment, while it reached 7.74 per plant in the 200 kg application.

Table 2. Effect of leonardite powder applications on the average number of green leaves, average number of discarded leaves, average weight of discarded leaves, and average plant weight of lettuce plants

Applications	Average number of green leaves (number/plant)	Average number of discarded leaves (leaves/ plant)	Average weight of discarded leaves (g/ plant)	Average plant weight (g/plant)
A1	26.36c	5.25c	20.41b	365.27c
A2	32.41b	7.13a	28.63ab	502.39b
A3	36.05a	7.74a	30.01a	556.13a
A4	33.71b	6.09b	27.34ab	497.16b
Significance	**	**	***	*
Minimum	26.36	5.25	20.41	365.27
Maximum	36.05	7.74	30.01	556.13

Mean	32.13	6.55	26.60	480.24
% difference	36.76	47.73	47.04	52.25

* : P ≤0.05, ** : P ≤0.01, *** : P ≤0.001

The weight of discarded leaves also increased from 20.41 g plant^{-1} in the control treatment to 30.01 g plant^{-1} in the 200 kg application, resulting in a 47.04% difference. The increases in the number of green leaves and leaf biomass indicate that leonardite applications supported the vegetative growth of lettuce. This may be related to the fact that humic substances derived from leonardite contribute to shoot development by promoting root development and nutrient uptake. Indeed, it has been reported that leonardite-derived humic substances can increase shoot biomass and leaf development in lettuce (Atero-Calvo et al., 2024). Furthermore, it has been reported that humic substances can increase nutrient uptake and biomass production in lettuce (Savarese et al., 2022). These results are consistent with the increases in leaf development and biomass observed in the present study, particularly with the 200 kg leonardite application.

The most pronounced effect of leonardite applications was observed in average plant weight. The average plant weight, which was 365.27 g plant^{-1} in the control treatment, increased to 502.39 g plant^{-1} with the 100 kg application and to 556.13 g plant^{-1} with the 200 kg application. With the 400 kg application, plant weight was determined to be 497.16 g plant^{-1}. Thus, the 200 kg leonardite application resulted in a plant weight that was 52.25% higher than that of the control treatment. However, increasing the application rate from 200 kg to 400 kg did not result in a further increase in plant weight; on the contrary, the value decreased from 556.13 g to 497.16 g. This indicates that lettuce's response to leonardite application is not linear across the entire dose range. The increase in plant weight following leonardite application can be explained by the fact that humic substances may contribute to plant biomass formation by supporting root development and nutrient uptake. Indeed, it has been reported that humic substances derived from leonardite increase shoot biomass in lettuce (Atero-Calvo et al., 2024). However, the decrease in plant weight at the 400 kg application rate compared to the 200 kg application rate indicates that the effect of leonardite does not increase linearly with dose. It has been reported that the effect of humic substances on plant growth can vary depending on the application rate, source, and growing conditions, and that the positive effect may diminish at high rates (Rose et al., 2014; Nardi et al., 2002). These results support the high biomass value observed in the current study following the application of 200 kg of leonardite.

When the findings are evaluated as a whole, it is observed that the application of 200 kg of leonardite produced the most pronounced positive response in terms of the vegetative growth and biomass formation of lettuce. In this application, plant height, number of green leaves, leaf weight, and average plant weight reached their maximum values. In contrast, increasing the dose to 400 kg did not result in any further improvement in these traits. The fact that root diameter reached its highest value at the 400 kg application rate indicates that the leonardite dose may affect different growth components of the plant in different ways. Therefore, among the applications examined, the 200 kg leonardite dose emerged as a more suitable application level in terms of the lettuce's overall vegetative performance and plant biomass.

4. CONCLUSION

In this study, the effects of applying different doses of powdered leonardite on the vegetative growth and biomass production of lettuce plants were investigated. The results showed that leonardite applications had a positive effect on several important aspects of plant growth. In particular, the 200 kg leonardite application yielded the highest values for plant height, number of green leaves, leaf weight, and average plant weight. The fact that the average plant weight was 52.25% higher in this treatment compared to the control indicates that the 200 kg leonardite application has remarkable potential in terms of lettuce biomass production. In contrast, increasing the application rate to 400 kg did not result in any further increase in any of the growth traits examined. Although the highest root diameter was

observed in the 400 kg treatment, when overall vegetative growth and plant weight were evaluated together, the 200 kg treatment demonstrated more favorable performance.

In conclusion, within the examined application conditions and dose range, the application of 200 kg of powdered leonardite emerged as the most suitable application level in terms of the lettuce plant's vegetative growth and plant biomass. However, evaluating the effectiveness of leonardite in lettuce cultivation under different soil conditions, growing seasons, and application rates would be beneficial for determining appropriate application levels more comprehensively.

REFERENCES

Aguiar, P., Corrêa, G. M. G., Rodrigues, M. Â., & Arrobas, M. (2024). Reduced effect of commercial leonardite and seaweed extract on lettuce growth under mineral, organic, and no fertilization regimes. *Agronomy*, *14*(9), 1939.

Arrobas, M., de Almeida, S. F., Raimundo, S., da Silva Domingues, L., & Rodrigues, M. Â. (2022). Leonardites rich in humic and fulvic acids had little effect on tissue elemental composition and dry matter yield in pot-grown olive cuttings. *Soil Systems*, *6*(1), 7.

Atero-Calvo, S., Magro, F., Masetti, G., Navarro-León, E., Rios, J. J., Blasco, B., & Ruiz, J. M. (2024). Comparative effects of root and foliar leonardite-suspension concentrate application on plant growth and photosynthetic efficiency of lettuce plants (Lactuca sativa L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, *43*(12), 4667-4679.

Campos, D. F., de Miranda, N. B., Serrano, D. C., Gehrke, A. G., & Botton, V. (2026). Extraction of humic and fulvic acids from leonardite for agricultural biostimulant applications. *Engineering and Sustainability Journal*, *1*(1), e006-e006.

Canellas, L. P., & Olivares, F. L. (2014). Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *1*(1), 3.

Dwivedi, A. K., & Dwivedi, B. S. (2015). Impact of long term fertilizer management for sustainable soil health and crop productivity: Issues and challenges. *Volume: 49 Research Journal*, *49*(3), 374.

Krasilnikov, P., Taboada, M. A., & Amanullah. (2022). Fertilizer use, soil health and agricultural sustainability. *Agriculture*, *12*(4), 462.

Larney, F. J., & Angers, D. A. (2012). The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, *92*(1), 19-38.

Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, *34*(11), 1527-1536.

Panday, D., Bhusal, N., Das, S., & Ghalehgolabbehbahani, A. (2024). Rooted in nature: the rise, challenges, and potential of organic farming and fertilizers in agroecosystems. *Sustainability*, *16*(4), 15

Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., & Cavagnaro, T. R. (2014). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture. *Advances in agronomy*, *124*, 37-89.

Rosen, C. J., & Allan, D. L. (2007). Exploring the benefits of organic nutrient sources for crop production and soil quality. *HortTechnology*, *17*(4), 422-430.

Savarese, C., Cozzolino, V., Verrillo, M., Vinci, G., De Martino, A., Scopa, A., & Piccolo, A. (2022). Combination of humic biostimulants with a microbial inoculum improves lettuce productivity, nutrient uptake, and primary and secondary metabolism. *Plant and Soil*, *481*(1), 285-314.

Zhao, Y., Bian, Q., Dong, Z., Rao, X., Wang, Z., Fu, Y., & Chen, B. (2025). The input of organic fertilizer can improve soil physicochemical properties and increase cotton yield in southern Xinjiang. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1520272.

DÖNGÜSEL EKONOMİYE GEÇİŞ GÖSTERGELERİNİN KARBONDİOKSİT EMİSYONLARINA ETKİSİ: AB ÜLKELERİ ÜZERİNE PANEL VERİ ANALİZİ

Arş. Gör. İlay TİLKİ TOMAY

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Finansman Bölümü, Muğla

ORCID ID: 0000-0002-7289-3755

ÖZET

İklim değişikliğiyle mücadele ve çevresel sürdürülebilirlik kapsamında karbondioksit emisyonlarının azaltılması gerekliliği döngüsel ekonomi gibi çevreci yönetim yaklaşımlarının benimsenmesini giderek daha kritik bir hale getirmiştir. Bu doğrultuda çalışmanın amacı döngüsel ekonomiye geçiş göstergelerinin karbondioksit emisyonları üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Çalışmada döngüsel ekonomiye geçiş göstergelerini temsil eden bağımsız değişkenler; ekonomik büyüme, malzeme ayak izi, döngüsel ekonomi sektörlerine yönelik özel yatırımlar ve katma değer ve geri dönüştürülebilir ham madde ticareti olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bağımlı değişkeni ise kişi başına karbondioksit emisyonudur. Araştırma 27 Avrupa Birliği üye ülkesi üzerinde gerçekleştirilmiş ve 2000-2025 yıllarına ait veriler kullanılmıştır. Ülkelere ait veriler panel veri analizi yöntemiyle incelenmiştir. Araştırma sonuçları, ekonomik büyüme, malzeme ayak izi ve döngüsel ekonomi sektörlerine yönelik özel yatırımlar ve katma değer değişkenlerinin karbondioksit emisyonları üzerinde pozitif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Buna karşılık geri dönüştürülebilir ham madde ticaretinin ise karbondioksit emisyonları üzerinde negatif yönlü ve anlamlı bir etkisinin bulunduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, döngüsel ekonomiye geçiş göstergelerinin niteliğine göre çevresel sonuçlarının farklılaşabildiğini ve döngüsel ekonomiye yönelik her gelişmenin emisyon azaltımı sağlamadığını göstermektedir. Bu doğrultuda AB ülkelerinin geleneksel büyüme anlayışı çerçevesinde yatırım ve ekonomik faaliyet hacmini artırmaya odaklanmak yerine yeşil büyümeye, kaynak kullanımını azaltmaya, düşük karbonlu üretim teknolojilerini benimseyip teşvik etmeye ve ikincil ham madde piyasalarını güçlendirmeye öncelik vermesi büyük bir önem taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: Döngüsel Ekonomi, Karbondioksit Emisyonu, Panel Veri Analizi

THE IMPACT OF TRANSITION INDICATORS TO CIRCULAR ECONOMY ON CARBON DIOXIDE EMISSIONS: PANEL DATA ANALYSIS FOR EU COUNTRIES

ABSTRACT

Within the scope of combating climate change and ensuring environmental sustainability, the necessity of reducing carbon dioxide emissions has made the adoption of environmentally friendly management approaches, such as the circular economy, increasingly critical. In this direction, the objective of this study is to reveal the impact of transition indicators to circular economy on carbon dioxide emissions. In the study, the independent variables representing the transition indicators to circular economy are determined as economic growth, material footprint, private investments and value added in circular economy sectors, and the trade of recyclable raw materials. The dependent variable of the study is carbon dioxide emissions per capita. The research was conducted on 27 European Union member states using data covering the years 2000-2025. The data belonging to the countries were analyzed using the panel data analysis method. The research results indicated that the variables of economic growth, material footprint, and private investments and value added in circular economy sectors have a positive and statistically significant impact on carbon dioxide emissions. Conversely, the trade of recyclable raw materials was found to have a negative and significant impact on carbon dioxide emissions. These findings demonstrate that environmental outcomes can vary depending on the characteristics of the

circular economy transition indicators, and not every advancement toward a circular economy yields emission reductions. Accordingly, rather than focusing on increasing the volume of investment and economic activities within the framework of a traditional growth approach, it is of utmost importance for EU countries to prioritize green growth, reduce resource consumption, adopt and promote low-carbon production technologies, and strengthen secondary raw material markets.

Keywords: Circular Economy, Carbon Dioxide Emission, Panel Data Analysis

1. GİRİŞ

Giderek artan nüfus, insan faaliyetleri, küresel ısınma gibi birçok unsur doğal çevre üzerinde olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. Özellikle küresel ısınma, çevre için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Küresel ısınma, yenilenemeyen enerji kaynakları ve sera gazları ile doğrudan ilişkilidir. Sera gazları içinde ise karbondioksit emisyonu, yaklaşık %70'lik bir paya sahiptir. Bu noktada politika yapıcılar ve uluslararası örgütler başta olmak üzere karbondioksit emisyonlarının azaltılması ve çevresel sürdürülebilirlik konuları küresel ölçekte kritik gündem başlıkları haline gelmiştir (Kara, 2022).

Çevresel sürdürülebilirlik anlayışının yaygınlaşmasıyla birlikte karbondioksit emisyonunu azaltıcı, çevreye yönelik zararın en aza indirildirildiği sistemlerin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda "al-kullan-at" anlayışının hakim olduğu mevcut doğrusal ekonomik modelin yetersiz ve verimsiz bir model olduğu kabul görmüştür (Walker vd., 2020). Döngüsel ekonomi, doğrusal ekonomik modele güçlü bir alternatif olarak ham maddelerin yeniden kullanımını mümkün kılan, atık geri kazanımı sağlayan, enerji ve tüm kaynakların verimli kullanıldığı, temiz üretim anlayışının benimsendiği sürdürülebilir bir model olarak ortaya çıkmıştır (Veral, 2021).

Döngüsel ekonomik sistem, temel olarak benimsediği 3R prensibiyle açıklanmaktadır (Koçan vd., 2019):

- Azaltma: üretim sürecinde ortaya çıkan atık düzeyinin minimuma indirilmesini ifade etmektedir.
- Geri Dönüşüm: atıkların yeni ürünlere dönüştürülmesi veya yeniden kullanım amacıyla geri dönüştürülmesi sürecini ifade etmektedir.
- Yeniden Kullanım: bakım, onarım ve yenileme gibi süreçlerle birlikte atığın yeniden kullanılması veya başka ürünlerin üretimi için kullanılmasını ifade etmektedir.

Döngüsel ekonomi atıkların azaltımı, geri dönüşüm ve yeniden kullanım uygulamaları ile karbondioksit emisyonlarının ve diğer çeşitli çevresel zararların azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Çevresel kazançlara ek olarak sosyal ve ekonomik kazanımlar da sağlayarak yerel ekonomilerin güçlendirilmesi açısından da önemli fırsatlar sunmaktadır (Özkan, 2024).

Bu çalışma döngüsel ekonomiye geçiş göstergelerinin karbondioksit emisyonları üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmanın yöntemi, veri seti ve değişkenler açıklanmış ve araştırma bulguları sunulmuştur. Çalışmanın son bölümünde ise tartışma ve sonuç kısmına yer verilerek araştırma sonuçları sunulmuş ve literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Mongo vd. (2022) 15 AB ülkesi üzerinde panel ARDL yöntemiyle gerçekleştirdiği çalışma sonucunda döngüsel ekonomi göstergelerinden malzeme ayak izi, kaynak verimliliği ve belediye atığı geri dönüşüm oranının karbon emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre tüm değişkenlerin uzun vadede karbon emisyonları üzerinde azaltıcı bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Pao ve Chen (2022) döngüsel ekonomi göstergeleri ile karbon emisyonları arasındaki ilişkiyi incelediği çalışmada, belediye atıklarının geri dönüşüm oranındaki artışın karbon emisyonlarını azalttığını; kişi

başına belediye atığı oluşumu ile geri dönüştürülebilir ham madde ticaretindeki artışın ise emisyonları artırdığını saptamıştır.

Hailemariam vd. (2023), 2000-2020 dönemini kapsayan 29 Avrupa ülkesinden oluşan panel veri seti üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada döngüsel ekonomi göstergesi olarak belediye atığı, biyolojik atık ve ambalaj atığı geri dönüşüm oranlarını kullanmıştır. Çalışma sonucunda atık geri dönüşüm oranlarındaki artışın kişi başına karbon emisyonlarını azalttığı ve döngüsel ekonomiye geçişin çevresel sürdürülebilirliği geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Mohsin vd., (2024), 13 AB ülkesinin 2000–2022 dönemi verileri kullanılarak yeşil tedarik zinciri yönetimi, döngüsel ekonomi uygulamaları ve ekonomik büyümenin karbon emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular, yeşil tedarik zinciri uygulamalarının uzun dönemde karbon emisyonlarını azalttığını; ekonomik büyüme ile belediye atıklarının ise emisyonları artırdığını göstermektedir. Geri dönüşüm göstergeleri arasında yalnızca ambalaj atıklarının geri dönüşümünün emisyonları azaltıcı bir etkisi olduğu belirlenmiştir.

Sikder vd. (2024), 13 AB ülkesinin 2000–2020 dönemi verilerini inceledikleri çalışmada, uzun dönem sonuçlarına göre döngüsel ekonominin karbon emisyonlarını azalttığını tespit etmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda ekonomik büyüme ile karbon emisyonu arasında ters-U biçimindeki Çevresel Kuznets Eğrisi ilişkisini destekleyen sonuçlara ulaşılmıştır.

Abbas vd. (2025), Hollanda'nın 2010-2022 verilerini kullanarak yaptıkları çalışmada döngüsel ekonomi uygulamalarının sera gazı emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular, döngüsel ekonomi uygulamalarının sera gazı emisyonlarını kısa ve uzun dönemde azalttığını göstermiştir.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada yöntem olarak panel veri analizi kullanılmıştır. Panel veri analizinde ilk olarak değişkenler arasındaki ilişkilerin düzeyi korelasyon analizi ile incelenmiştir. Sonrasında ise değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı sorunu olup olmadığını incelemek amacıyla VIF testi yapılmıştır. Daha sonra klasik modelin geçerliliğini belirlemek üzere F testi yapılmıştır. Ardından sabit etkiler ve tesadüfi etkiler modelleri arasındaki seçim ise Hausman testiyle yapılmıştır. Ardından panel veri analizinin temel varsayımları sınanarak, uygun birim kök testi kullanılmış ve değişkenlerin durağanlık düzeyleri belirlenmiştir. Ön testlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda varsayımdan sapmalara karşı dirençli bir tahminci seçilmesiyle model katsayıları tahmin edilmiştir.

3.1. Veri Seti ve Değişkenler

Bu çalışmanın yatay kesitini 27 Avrupa Birliği üye ülkesi oluştumakta olup, zaman aralığı 2000-2025 yıllarını kapsamaktadır. Çalışmada bağımlı değişken olarak kişi başına karbondioksit emisyonu, bağımsız değişken olarak ise; ekonomik büyüme oranı, malzeme ayak izi, geri dönüştürülebilir ham madde ticareti, döngüsel ekonomi sektörlerine yönelik özel yatırımlar ve katma değer kullanılmıştır. Çalışmada oransal olmayan verilerin doğal logaritması alınmıştır. İstatistiksel analizler dengesiz panel veri analizi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında uygulanan panel veri analizi için Stata 14.1 paket programından yararlanılmıştır.

Tablo 1. Değişkenlere İlişkin Tanımlayıcı Bilgiler

Kod	Değişken Adı	Kaynak
lnco2	Kişi Başına Karbondioksit Emisyonunun Doğal Logaritması	Dünya Bankası
gdp	Ekonomik Büyüme (%)	Dünya Bankası
mai	Malzeme Ayak İzi (Kişi Başı)	Eurostat
deykd	Döngüsel Ekonomi Sektörlerine Yönelik Özel Yatırımlar ve Katma Değer (%GSYİH)	Eurostat
lngdhmt	Geri Dönüştürülebilir Ham Madde Ticaretinin Doğal Logaritması	Chatham House

3.2. Araştırma Bulguları

Tablo 2. Betimleyici İstatistikler

Değişkenler	Gözlem Sayısı	Ortalama	Standart Sapma	Min	Maks
lnco2	675	1.951	0,407	1.100	3.259
gdp	702	2.458	3,794	-16.040	24.623
mai	486	18.19	7,527	7.539	48.924
deykd	270	1.76	0,651	0.500	6.600
lngdhmt	675	20.82	1,523	16.556	24.258

Çalışma kapsamında, 27 AB ülkesi için döngüsel ekonomiye geçiş göstergeleri ile CO_2 emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 2'de sunulmuştur. Veri seti gözlem sayısı bakımında 270 ile 702 arasında değişen dengesiz panel yapısına sahiptir. Bu durum, analiz kapsamında incelenen ülkeler için sağlanan verilerin gecikmeli bir şekilde yayınlamasından kaynaklanmıştır. Çalışmanın bağımlı değişkeni olan CO_2 emisyonu 1.10-3.26 arasında değişirken, ekonomik büyüme oranı ortalama %2,46 olarak gerçekleşmiştir. Malzeme ayak izinin ortalama değeri 18,19 olup ülkeler ve dönemler arasında belirgin farklılıklar bulunduğu görülmüştür. Geri dönüştürülebilir ham madde ticareti göstergesi 0,50 ile 6,60 arasında değişmektedir. Döngüsel ekonomi sektörlerine yönelik özel yatırımlar ve katma değer değişkeninin logaritmik ortalaması ise 20,82 olarak hesaplanmıştır. Bulgular genel olarak değerlendirildiğinde AB ülkelerinin ekonomik, çevresel ve döngüsel ekonomiye geçiş göstergeleri bakımından farklılaştığını ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Korelasyon Analizi ve VIF Testi Sonuçları

Değişkenler	lnco2	gdp	mai	deykd	lngdhmt	VIF
lnco2	1.000					
gdp	-0,010	1.000				1,14
mai	0,230	-0,049	1.000			1,02
deykd	0,123	0,304	-0,106	1.000		1,11
lngdhmt	0,163	-0,174	-0,054	0,043	1.000	1,04
					Ort. VIF:	1,07

Tablo 3'te değişkenler arasındaki ilişkileri gösteren korelasyon katsayıları ve bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı sorununun bulunup bulunmadığını gösteren VIF değerlerine yer verilmiştir. Korelasyon analizine ait bulgular, karbon emisyonu değişkeninin; materyal ayak izi, geri dönüştürülebilir ham madde ticareti ve döngüsel ekonomi sektörlerine yönelik özel yatırımlar ve katma değer değişkenleriyle pozitif, ekonomik büyümeyle ise düşük düzeyde negatif ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bağımsız değişkenler arasındaki en yüksek korelasyon, ekonomik büyüme ile geri dönüştürülebilir ham madde ticareti arasında r=0,304 gerçekleşmektedir. Korelasyon katsayılarının düşük düzeylerde seyretmesi, bağımsız değişkenler arasında güçlü bir doğrusal ilişki olmadığını ortaya koymaktadır. VIF değerleri incelendiğinde ise değerlerin 1,02 ile 1,14 arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca ortalama VIF değeri ise 1,07'dir. VIF değerlerinin 5'ten küçük olması, çoklu doğrusal bağlantı sorunu bulunmadığını göstermektedir.

Tablo 4. Panel Veri Model Seçimi ve Varsayım Testi Sonuçları

Testler	H_0 Hipotezi	Test Değeri	Sonuç
F Testi	Birim etkileri sıfıra eşittir.	F=116,94 p=0,000	Klasik model geçerli değildir.
Hausman Testi	Katsayılar arasındaki fark sistematik değildir.	p=0,0486	Sabit etkiler modeli tercih edilmiştir.
Değiştirilmiş Wald Testi	Birimlere ait hata varyansları birbirine eşittir	p=0,000	Değişen varyans sorunu bulunmaktadır.
Durbin–Watson ve Baltagi–Wu LBI Testleri	Birinci dereceden otokorelasyon bulunmamaktadır.	Durbin Watson=1,770; Baltagi–Wu =2,057	Otokorelasyon sorunu bulunmaktadır.
Pesaran Yatay Kesit Bağımlılığı Testi	Yatay kesit bağımlılığı bulunmamaktadır.	p=0,000	Yatay kesit bağımlılığı bulunmaktadır.

Tablo 4'te panel veri modelinin belirlenmesi ve varsayımların sınanması amacıyla yapılan test sonuçları gösterilmektedir. Buna göre F testi sonucunda birim etkilerinin sıfıra eşit olduğunu öngören H_0 Hipotezi reddedilmiş ve klasik modelin geçerli olmadığı belirlenmiştir. Sabit ve rassal etkiler modelleri arasında seçim yapmak amacıyla uygulanan Hausman testi sonucunda sabit etkiler modeli tercih edilmiştir. Değiştirilmiş Wald testi ise modelde değişen varyans sorunu bulunduğunu göstermiştir. Otokorelasyon sorununun varlığını incelemek için ise Durbin–Watson ve Baltagi–Wu LBI testlerinden yararlanılmıştır. Buna göre iki sonuçtan biri 2 değerinden düşük diğeri ise çok yakın olmasından kaynaklı olarak modelde otokorelasyon sorunu olabileceği değerlendirilmiştir. Son aşamada ise birimler arasında bağımlılık bulunup bulunmadığını belirlemek amacıyla Pesaran yatay kesit bağımlılığı testi uygulanmıştır. Buna göre modelde birimler arası korelasyon sorunu olduğu saptanmıştır.

Modelde yatay kesit bağımlılığı bulunduğundan dolayı ikinci nesil birim kök testlerinin kullanılması uygun görülmüş ve değişkenlerin durağanlığı Pesaran CADF testiyle incelenmiştir (Pesaran, 2021). Pesaran CADF panel birim kök testi sonuçları Tablo 5'de sunulmuştur.

Tablo 5. Pesaran CADF (CIPS) Panel Birim Kök Testi Sonuçları

Değişkenler	t-bar	cv10	Cv5	Cv1	Z(t-bar)	Olasılık	Sonuç
lnco2	-1,508	-2,070	-2,150	-2,300	1,282	0,900	Düzeyde durağan değildir.
D.lnco2	−3,559	-2,070	-2,150	-2,300	-9,593	0,000	Birinci farkında durağandır.
gdp	−2,917	−2,070	-2,150	-2,300	-6,186	0,000	Düzeyde durağandır.
mai	-1,735	-2,070	-2,150	-2,320	0,026	0,510	Düzeyde durağan değildir.
D.mai	-2,843	-2,070	-2,150	-2,320	-5,620	0,000	Birinci farkında durağandır.
deykd	-1,448	-2,100	-2,220	-2,440	0,937	0,826	Düzeyde durağan değildir.
D.deykd	−2,561	-2,100	-2,220	-2440	-3,378	0,000	Birinci farkında durağandır
lngdhmt	-2,241	-2,070	-2,150	-2,300	-2,604	0,05	Düzeyde durağandır.

Test sonucu doğrultusunda ekonomik büyüme ve geri dönüştürülebilir ham madde ticareti değişkenleri düzeyde durağandır. Karbondioksit emisyonu, malzeme ayak izi ve döngüsel ekonomi sektörlerine yönelik özel yatırımlar ve katma değer ise düzeyde birim kök içermekle birlikte birinci farkları alındığında durağan hâle geldiği görülmüştür.

Ardından modelde tespit edilen değişen varyans, otokorelasyon ve yatay kesit bağımlılığı sorunları göz önünde tutularak bu sapmalara karşı dirençli olan Driscoll–Kraay standart hatalar (sabit etkiler) tahmincisi kullanılmıştır (Driscoll ve Kraay, 1998). Bu doğrultuda Driscoll–Kraay Standart Hatalar (Sabit Etkiler) Tahmincisi Sonuçları tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Driscoll–Kraay Standart Hatalar (Sabit Etkiler) Tahmincisi Sonuçları

Değişkenler	**Katsayı**	**Standart Hata**	**T-İstatistik Değeri**	**Olasılık**
gdp	0,0107	0,0009	12,01	0,000***
mai	0,0060	0,0029	2,05	0,075*
deykd	0,00569	0,0094	6,02	0,000***
lngdhmt	-0,0508	0,0162	-3,12	0,014**
Sabit Terim	1,0245	0,3455	2,96	0,018**
Model İstatistikleri		**Değer**		
R^2		0,3359		
F-İstatistiği		81,38		
Prob > F		0,0000***		

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 düzeyinde istatistiksel anlamlılığı göstermektedir.

Durağan olmayan değişkenler modele durağan şekilde dahil edilmiştir.

Bağımlı değişken: lnco2'dir.

Tablo 6'daki Driscoll–Kraay standart hatalı sabit etkiler tahmin sonuçlarına göre model bir bütün olarak istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuştur (F=81,83; p<0,01). Modelin R^2 değeri ise 0,3359'dur. Buna göre bağımsız değişkenler (ekonomik büyüme, malzeme ayak izi, döngüsel ekonomi sektörlerine yönelik özel yatırımlar ve katma değer, geri dönüştürülebilir ham madde ticareti), bağımlı değişkendeki varyansın yaklaşık %33,6'sını açıklamaktadır. Böylece modelin açıklayıcılık oranı makul bir düzeydedir. Sonuçlar incelendiğinde ekonomik büyümenin karbondioksit emisyonlarındaki değişim üzerinde pozitif ve %1 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmaktadır. Buna göre ekonomik büyümedeki her %1'lik artış, CO_2 emisyonu üzerinde %0,0107 birimlik bir artışa sebep olmaktadır. Malzeme ayak izinin CO_2 üzerindeki etkisi incelendiğinde %10 anlamlılık düzeyinde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı etkisinin olduğu görülmüştür. Katsayılara bakıldığında malzeme ayak izindeki %1'lik artışın CO_2 değişkeni üzerinde %0,0060'lık bir artışa sebep olduğu görülmektedir. Döngüsel ekonomi sektörlerine yönelik özel yatırımlar ve katma değer göstergesinin CO_2 emisyonlarındaki değişim üzerindeki etkisi ise pozitif yönlü ve %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır. Buna göre döngüsel ekonomi sektörlerine yapılan yatırım ve katma değerlerdeki her 1 birimlik artış, CO_2 emisyonlarında %0,00569 birimlik artışa neden olmaktadır. Son olarak geri dönüştürülebilir ham madde ticaretinin CO_2 emisyonlarındaki değişim üzerindeki etkisi %5 anlamlılık düzeyinde negatif ve istatistiksel olarak anlamlıdır. Buna göre geri dönüştürülebilir ham madde ticaretindeki her 1 birimlik artış, CO_2 emisyonları üzerinde 0,0508 birimlik bir azalışa yol açmaktadır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Araştırma bulguları yatay kesit bağımlılığı, değişen varyans ve otokorelasyonu dikkate alan Driscoll–Kraay standart hatalar tahmincisi çerçevesinde değerlendirildiğinde; ele alınan bağımsız değişkenlerin tamamının karbondioksit emisyonu üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilere sahip olduğu ortaya konulmaktadır. Araştırmanın bağımsız değişkenlerinden ekonomik büyümenin karbondioksit emisyonlarını arttırıcı yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. Bu durum incelenen AB ülkelerinde üretim artışının halen çevre üzerinde olumsuz etkileri arttırdığını ve geleneksel büyüme yöntemlerinin kirlilik yoğun yapısını sürdürdüğünü göstermektedir. Çalışmada elde edilen bu sonuç literatürde yapılan çalışmalar ile paralellik göstermektedir (Ang, 2007; Apergis ve Payne, 2009; Halıcıoğlu, 2009; Shahbaz vd., 2013; Doğan ve Seker, 2016; Mitić vd., 2017). Çalışmanın bir diğer sonucu malzeme ayak izinin

karbondioksit emisyonlarını pozitif yönde etkilediği yönündedir. Buna göre AB ülkelerinde artan talebin henüz ikincil/geri dönüştürülmüş kaynaklar ile karşılanamadığını ve ülkelerin karbon yoğun birincil kaynak tüketimini sürdürdüğünü ortaya koymaktadır. Çalışmanın bu sonucu literatürdeki çalışma sonuçları ile örtüşmektedir (Wiedmann vd., 2015; Berrill vd., 2020; Safi vd., 2021; Hertwich, 2021; Sofuoğlu ve Kırıkkaleli, 2023). Çalışmanın bir başka sonucuna göre döngüsel ekonomi sektörlerine yapılan özel yatırımlar ve katma değerdeki artışların da karbondioksit emisyonunu arttırdığı yönündedir. Literatürdeki araştırma sonuçları ise genel olarak döngüsel ekonomi sektörlerine yapılan yatırımların uzun vadede karbondioksit emisyonlarını azalttığı yönündedir (Saidi ve Omri, 2020; Mongo vd., 2022; Murshed vd., 2022; Zheng vd., 2025; Yue ve Rasool, 2026). Ancak Shi ve Nisar (2025) yaptıkları çalışma sonucunda döngüsel ekonomi yatırımlarının altyapı oluşturma aşamasında kısa vadeli olumsuz sonuçlar doğurabileceğini, sistemin işlerlik kazanmasıyla birlikte çevresel faydaların ortaya çıktığı sonucuna varmıştır. Mawutor vd. (2025) ise döngüsel ekonomi yatırımlarının karbondioksit emisyonlarını arttırabileceğini ancak yeterli yönetişim kalitesine ulaşıldığında bu etkinin tersine döndüğünü ortaya koymuştur. Buna göre çalışmada elde edilen pozitif yönlü ilişkinin nedeni, AB ülkelerindeki döngüsel ekonomiye yönelik geri dönüşüm tesisleri, atık ayrıştırma altyapısı, inşaat vb. gibi kapsamlı yatırımlar sonucunda ülkelerin ekonomik faaliyetleri ve üretim hacminin genişlemesi bu durumun da başlangıçta karbondioksit emisyonunu arttırabileceği şeklinde değerlendirilmektedir. Bu noktada gözle görülür çevresel kazanımların ise daha uzun dönemlerde ortaya çıkabileceği şeklinde değerlendirilmektedir. Çalışmada son olarak geri dönüştürülebilir ham madde ticaretinin karbondioksit emisyonu üzerinde azaltıcı bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgu, AB ülkelerinde geri dönüştürülebilir ham madde ticaretinin birincil ham madde kullanımı, atık bertarafı ve buna bağlı olarak enerji tüketimini azaltmasıyla ve bunun sonucunda karbondioksit emisyonlarını düşürmesiyle açıklanmaktadır. Çalışmanın bu sonucu literatürde yapılan çalışmalar ile desteklenmektedir (Kapçak, 2024; Burinskienė vd., 2025; Lin vd. 2026).

Araştırma sonuçları göz önüne alındığında ülkelerin politika ve uygulamalarında çevreye yönelik etkilerini en aza indireceği döngüsel ekonomi odaklı modellerinin benimsenmesinin kritik bir gereklilik olduğu anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda, AB Yeşil Mutabakatı ve Döngüsel Ekonomi Eylem Planı hedefleriyle uyumlu olarak; emisyonu düşüren döngüsel mekanizmaların kullanılması, daha temiz üretim ve etkili geri kazanım süreçlerinin gerçekleştirilmesi ve bu uygulamaların politika yapıcılar tarafından teşvik edilmesinin büyük önem taşıdığı değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Ang, J. B. (2007). CO2 emissions, energy consumption, and output in France. Energy policy, 35(10), 4772-4778.

Apergis, N., & Payne, J. E. (2009). CO2 emissions, energy usage, and output in Central America. *Energy policy*, *37*(8), 3282-3286.

Berrill, P., Miller, T. R., Kondo, Y., & Hertwich, E. G. (2020). Capital in the American carbon, energy, and material footprint. Journal of Industrial Ecology, 24(3), 589-600.

Burinskienė, A., Lingaitienė, O., & Byčenkaitė, G. (2025). Dynamics of trade of recycled raw materials and the connection with the circular economy. Discover Sustainability, 6(1), 1-37.

Chatham House. (2021). Circular Economy Trade Database. Erişim tarihi: 01.09.2026. Erişim adresi: https://circulareconomy.earth/trade

Dogan, E., & Seker, F. (2016). An investigation on the determinants of carbon emissions for OECD countries: empirical evidence from panel models robust to heterogeneity and cross-sectional dependence. Environmental Science and Pollution Research, 23(14), 14646-14655.

Driscoll, J. C., & Kraay, A. C. (1998). Consistent covariance matrix estimation with spatially dependent panel data. Review of economics and statistics, 80(4), 549-560.

Eurostat. (2026). Material footprint (cei_pc020). Erişim tarihi: 01.09.2026. Erişim adresi: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_pc020/default/table?lang=en.

Eurostat. (2026). Trade in recyclable raw materials *(cei_srm020)*. Erişim tarihi: 01.09.2026. Erişim adresi: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm020/default/table?lang=en

Hailemariam, A., & Erdiaw-Kwasie, M. O. (2023). Towards a circular economy: Implications for emission reduction and environmental sustainability. Business Strategy and the Environment, 32(4), 1951-1965.

Halicioglu, F. (2009). An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. Energy policy, 37(3), 1156-1164.

Hertwich, E. G. (2021). Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments. Nature Geoscience, 14(3), 151-155.

Kapçak, S. (2024). Döngüsel Ekonomi Bileşenlerinin Ekolojik Ayak İzi Üzerindeki Etkisi: Panel Veri Analizi. Uluslararası Ekonomi İşletme ve Politika Dergisi, 8(1), 124-138.

Kara, T. (2022). Döngüsel ekonomi teori ve pratik. Efe akademi Yayınları.

Koçan, A., Gültekin, D. G., & BAŞTUĞ, M. (2019). Yeni Ekonomi ve İş Modelleri: Döngüsel Ekonomi ve Paylaşim Ekosistemleri. *Uluslararası Ekonomi Araştırmaları ve Finansal Piyasalar Kongresi*, 7-9.

Lin, G., Wei, F., Li, J., Liang, L., Ngo, H. T. T., Zhang, Z., & Tan, Q. (2026). Carbon reduction potential of international secondary resource circulation: A case study among six major trading economies. Environmental Impact Assessment Review, 116, 108101.

Mawutor, J. K. M., Sogah, E., & Gborse, F. C. (2025). Circular economy and carbon emissions: threshold effect of quality of governance. Management of Environmental Quality: An International Journal, 36(4), 948-970.

Mitić, P., Munitlak Ivanović, O., & Zdravković, A. (2017). A cointegration analysis of real GDP and CO2 emissions in transitional countries. *Sustainability*, *9*(4), 568.

Mohsin, A. K. M., Gerschberger, M., Plasch, M., Ahmed, S. F., Rahman, A., & Rashed, M. (2024). Examining the synergy of green supply chain practices, circular economy, and economic growth in mitigating carbon emissions: Evidence from EU countries. Journal of Environmental Management, 371, 123109.

Mongo, M., Laforest, V., Belaïd, F., & Tanguy, A. (2022). Assessment of the Impact of the Circular Economy on CO2 Emissions in Europe. Journal of Innovation Economics & Management, 39(3), 15-43.

Murshed, M., Saboori, B., Madaleno, M., Wang, H., & Doğan, B. (2022). Exploring the nexuses between nuclear energy, renewable energy, and carbon dioxide emissions: the role of economic complexity in the G7 countries. Renewable Energy, 190, 664-674.

Özkan, G. (2024). Katma değerli tarım, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir kalkınma: Ekonomik, çevresel ve sosyal perspektifler. JENAS Journal of Environmental and Natural Studies, 6(3 (In Honour of Nesrin Algan)), 287-298.

Pao, H. T., & Chen, C. C. (2022). The dynamic interaction between circular economy and the environment: Evidence on EU countries. Waste Management & Research, 40(7), 969-979.

Pesaran, M. H. (2021). General diagnostic tests for cross-sectional dependence in panels. *Empirical economics*, *60*(1), 13-50.

Safi, A., Chen, Y., Wahab, S., Zheng, L., & Rjoub, H. (2021). Does environmental taxes achieve the carbon neutrality target of G7 economies? Evaluating the importance of environmental R&D. Journal of Environmental Management, 293, 112908.

Saidi, K., & Omri, A. (2020). Reducing CO2 emissions in OECD countries: do renewable and nuclear energy matter?. Progress in Nuclear Energy, 126, 103425.

Shahbaz, M., Solarin, S. A., Mahmood, H., & Arouri, M. (2013). Does financial development reduce CO2 emissions in Malaysian economy? A time series analysis. *Economic modelling*, *35*, 145-152.

Shi, S., & Nisar, A. (2025). The Effects of Circular Economy, Green Finance, and ICT Developments on Resource Productivity aimed Ecological Sustainability: Evidence from OECD Countries Using a CS-ARDL Approach. Problemy Ekorozwoju, 20(2), 223-244.

Sofuoğlu, E., & Kirikkaleli, D. (2023). Towards achieving net zero emission targets and sustainable development goals, can long-term material footprint strategies be a useful tool?. Environmental Science and Pollution Research, 30(10), 26636-26649.

Veral, E. S. (2021). Döngüsel ekonomi: Engeller, stratejiler ve iş modelleri. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi*, *8*(1), 7-18.

Walker, T., Gramlich, D., & Dumont-Bergeron, A. (2020). The case for a plastic tax: A review of its benefits and disadvantages within a circular economy.

Wiedmann, T. O., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S., West, J., & Kanemoto, K. (2015). The material footprint of nations. Proceedings of the national academy of sciences, 112(20), 6271-6276.

World Bank. (2026). *Carbon dioxide (CO_2) emissions excluding LULUCF per capita (t CO_2e/capita).* Erişim tarihi: 01.09.2026. Erişim adresi: https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.PC.CE.AR5

World Bank. (2026). GDP Growth (annual %). Erişim Tarihi: 01.09.2026 Erişim Adresi: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG.

Yue, W., & Rasool, Y. (2026). Does the Circular Economy Reduce CO2 Emissions? Evidence from European Countries. Sustainability, 18(10), 4790.

Zheng, X., Imran, M., Umair, M., Lin, C., & Dong, Y. (2025). Modern panelizing and optimization techniques for renewable energy projects; perspectives on how CO2 emissions impact the circular economy. Energy, 323, 135881.

BAĞIMSIZ DENETİMDE MAKİNE ÖĞRENMESİ: KAP ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Doç. Dr. Hüseyin ÖZYİĞİT

Erzincan Binali Yıldırım University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Business Administration, Accounting and Finance Division, Erzincan

ORCID ID: 0000-0002-0632-7931

ÖZET

Bilgi teknolojileri ve yapay zekâ alanındaki hızlı gelişmeler, muhasebe ve bağımsız denetim mesleğini köklü bir dönüşüm süreciyle karşı karşıya bırakmıştır. Dijitalleşen iş dünyasında işletmelerin ürettiği finansal verilerin hacmi ve hızındaki logaritmik artış, geleneksel denetim tekniklerini ve örnekleme yöntemlerini yetersiz kılmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı; Kamuyu Aydınlatma Platformu'nda (KAP) kayıtlı bağımsız denetim kuruluşlarında makine öğrenmesi algoritmalarının entegrasyon düzeyini, denetim kapsamı ve uygulamaları üzerindeki etkilerini ve karşılaşılan yapısal güçlükleri uygulayıcı bakış açısıyla derinlemesine incelemektir. Çalışmada, KAP'ta yer alan 24 bağımsız denetim kuruluşunu temsilen 24 yetkili profesyonel (10 Sorumlu Denetçi, 8 Kıdemli Denetim Müdürü, 6 Bilgi Teknolojileri Denetçisi) ile yarı yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, Braun ve Clarke'ın (2006) altı aşamalı tematik analiz süreci izlenerek çözümlenmiştir. Araştırma bulguları; "Denetim Faaliyetlerinin Kapsamı" ve "Denetim Faaliyetlerinin Uygulamaları" olmak üzere iki ana tema altında şekillenmiştir. Bulgulara göre; makine öğrenmesi modelleri geleneksel örnekleme riskini ortadan kaldırarak veri popülasyonunun tamamının (%100) test edilmesini sağlamakta, hileli işlemler ve sıra dışı yevmiye kayıtlarının tespitinde öngörü gücünü belirgin biçimde artırmaktadır. Buna karşın modellerin "kara kutu" niteliği, yanlış alarm (false positive) yükü, yüksek teknolojik altyapı maliyetleri ve veri bilimi yetkinliğine sahip hibrit denetçi açığı sürecin temel güçlükleri olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak makine öğrenmesinin; mesleki yargı ve şüpheciliğin bir ikamesi değil, denetim kalitesini artıran ve sürekli denetimi uygulanabilir kılan tamamlayıcı bir karar destek mekanizması olduğu öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: Bağımsız denetim, makine öğrenmesi, denetim kapsamı, sürekli denetim

MACHINE LEARNING IN INDEPENDENT AUDITING: A STUDY ON KAP

ABSTRACT

Rapid advancements in information technology and artificial intelligence have confronted the accounting and independent auditing profession with a process of radical transformation. In the increasingly digital business world, the logarithmic increase in the volume and velocity of financial data generated by enterprises renders traditional audit techniques and sampling methods inadequate. The primary objective of this study is to conduct an in-depth examination—from the perspective of practitioners—of the level of machine learning algorithm integration within independent audit firms registered on the Public Disclosure Platform (KAP), the impact of these algorithms on audit scope and practices, and the structural challenges encountered. Semi-structured interviews were conducted with 24 authorized professionals (10 Engagement Partners, 8 Senior Audit Managers, and 6 IT Auditors) representing 24 independent audit firms listed on the KAP. The data obtained were analyzed using Braun and Clarke's (2006) six-phase thematic analysis process. The research findings were structured around two main themes: "Scope of Audit Activities" and "Implementation of Audit Activities." According to the findings, machine learning models enable the testing of the entire data population (100%)—thereby eliminating traditional sampling risk—and significantly enhance predictive capabilities regarding the detection of fraudulent transactions and anomalous journal entries. Conversely, the "black box" nature of the models, the burden of false positives, high technological

infrastructure costs, and a shortage of "hybrid auditors" possessing data science competencies emerge as the primary challenges of this process. In conclusion, it is envisaged that machine learning is not a substitute for professional judgment and skepticism, but rather a complementary decision-support mechanism that enhances audit quality and makes continuous auditing feasible.

Keywords: Independent audit, machine learning, audit scope, continuous auditing

1. GİRİŞ

Bilgi teknolojilerinde, veri depolama kapasitelerinde ve yapay zekâ disiplininde yaşanan ilerlemeler; kurumsal iş modellerini, işletmelerin muhasebe bilgi sistemlerini ve denetim ortamını kökten değiştirmiştir. Günümüzde kurumsal kaynak planlaması sistemlerinin gelişmesiyle birlikte iş dünyasında üretilen dijital ve finansal işlemlerin hacmi, çeşitliliği ve üretim hızı devasa boyutlara ulaşmıştır. International Data Corporation (IDC, 2018) projeksiyonlarına göre, 2011 yılında 5 Zettabayt (ZB) olan küresel veri üretim hacmi 2018'de 33 ZB seviyesine çıkmış; 2025 yılı projeksiyonunda ise 175 ZB seviyesine ulaşmıştır. Üretilen finansal ve operasyonel verilerdeki bu logaritmik genişleme, muhasebe denetiminde on yıllardır kullanılan geleneksel örnekleme yaklaşımlarını yapısal bir çıkmaza sürüklemektedir. Belirli eşik değerler veya yargısal/istatistiki yöntemlerle popülasyondan çekilen sınırlı örneklemler üzerinden güvence sağlama yaklaşımı, doğası gereği örnekleme riski barındırmakta ve karmaşık defter-i kebir kayıtları içine gizlenmiş hile veya suiistimalleri saptamada yetersiz kalabilmektedir. Bu noktada gözetimli ve gözetimsiz makine öğrenmesi algoritmaları, doğal dil işleme (NLP) ve gelişmiş veri analitiği teknikleri denetim metodolojisine dahil olmaktadır.

Uluslararası ve ulusal denetim ağları (Big 4 ve küresel denetim konsorsiyumları), geleceğin denetim metodolojisinin salt kural bazlı geçmiş kontrollerden ziyade, tahmine dayalı analitik ve makine öğrenmesi algoritmaları üzerine kurgulanacağını belirtmektedir. ICAEW ve meslek örgütleri de denetçilerin rutin mutabakat süreçlerinden uzaklaşarak, algoritmaların işaret ettiği yüksek riskli anomalilere odaklanacağını ifade etmektedir. Uluslararası Denetim ve Güvence Standartları Kurulu (IAASB - ISA 315 & ISA 240) ile Kamu Gözetimi Kurumu (KGK) standartları; denetçilerin işletmeyi tanıma, iç kontrolleri anlama ve hata/hile risklerini değerlendirme aşamalarında ileri teknolojik araçlardan yararlanmasını teşvik etmektedir. Bu çalışma; Kamuyu Aydınlatma Platformu'nda (KAP) kayıtlı bulunan 24 bağımsız denetim kuruluşunun yetkili profesyonelleri ile gerçekleştirilen nitel görüşmeler üzerinden, makine öğrenmesi teknolojilerinin denetim kapsamı ve operasyonel uygulamaları üzerindeki etkilerini tespit etmeyi amaçlamaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bağımsız denetim metodolojisinde makine öğrenmesi entegrasyonu, veri işleme mantığını reaktif denetimden sürekli ve proaktif denetime dönüştürmektedir. Denetim süreçlerinde kullanılan algoritmalar temel olarak gözetimli ve gözetimsiz modeller olarak yapılandırılmaktadır:

- Gözetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning): Etiketlenmemiş muhasebe kayıtları ve büyük hacimli yevmiye popülasyonlarında doğal kümelenmelerin dışında kalan sıra dışı işlem örüntülerini (anomalileri) belirlemek için k-ortalama (k-means) kümeleme veya İzolasyon Ormanı (Isolation Forest) gibi tekniklerle uygulanmaktadır.
- Gözetimli Öğrenme (Supervised Learning): Geçmiş hileli kayıtlar, muhasebe manipülasyonları ve risk profilleri üzerinden eğitilerek yeni işlemlerin risk sınıflarını tahmin eden Random Forest, XGBoost veya Lojistik Regresyon modellerinden oluşmaktadır.

Bununla birlikte algoritmaların "kara kutu" (black-box) yapısı; bir işlemin neden şüpheli olarak sınıflandırıldığının denetim kanıtı ve çalışma kâğıtlarında gerekçelendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) yaklaşımları, denetçinin mesleki şüpheciliğini ve mesleki yargısını koruyabilmesi açısından kritik bir kuramsal bileşen haline gelmiştir.

3. YÖNTEM

Araştırmada, bağımsız denetimde makine öğrenmesi uygulamalarının getirdiği dönüşümü uygulayıcıların bakış açısıyla derinlemesine irdeleyebilmek amacıyla nitel araştırma metodolojisi ve fenomenolojik yaklaşım benimsenmiştir.

3.1. Katılımcı Profili ve Örneklem

Araştırmanın çalışma grubunu; Kamuyu Aydınlatma Platformu'nda yer alan 24 bağımsız denetim kuruluşunun her birinden birer yetkili temsilci olmak üzere toplam 24 profesyonel oluşturmaktadır. Katılımcıların mesleki pozisyon dağılımı:

- 10 Sorumlu Denetçi / Ortak (Lead Partner): Denetim görüşünün oluşturulması ve metodoloji kararlarından sorumlu
- 8 Kıdemli Denetim Müdürü (Audit Manager): Saha denetim ekiplerinin yönetimi ve test prosedürlerinin koordinasyonundan sorumlu
- 6 Bilgi Teknolojileri (BT) Denetçisi / Direktörü: Bilgi sistemleri, algoritma güvenliği ve veri analitiği altyapısından sorumlu

3.2. Veri Toplama Aracı

Veriler, literatür (Sarens; Miles ve Huberman; ICAEW) taranarak hazırlanan yarı yapılandırılmış görüşme formu aracılığıyla toplanmıştır. Görüşme protokolü 9 temel sorudan oluşmaktadır:

- 1. Kendinizden, unvanınızdan ve denetim tecrübenizden bahseder misiniz?
- 2. Kurumunuzda bağımsız denetim süreçlerinde makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı araçlar ne düzeyde kullanılmaktadır?
- 3. Geleneksel denetim prosedürleri ile makine öğrenmesi destekli prosedürler arasında süreç ve iş yükü açısından ne tür farklılıklar gözlemliyorsunuz?
- 4. Makine öğrenmesi algoritmalarının, denetim riskini (hile ve hata tespiti) minimize etmedeki rolünü nasıl değerlendiriyorsunuz?
- 5. Makine öğrenmesi çıktılarının denetçinin mesleki yargısı ve şüpheciliği ile uyumunu nasıl değerlendiriyorsunuz?
- 6. Denetim departmanınızda yeni teknolojilere, veri bilimi ve algoritma okuryazarlığına verilen önemi nasıl nitelendirirsiniz?
- 7. Denetim kanıtı toplama aşamasında makine öğrenmesi tekniklerinin (anomali tespiti, kümeleme vb.) kullanım düzeyi nedir?
- 8. Bağımsız denetimde makine öğrenmesi kullanımının sağladığı temel artılar ve eksiler nelerdir?
- 9. Denetim kuruluşunuz algoritmik modellerin güvenilirliğini ve standartlara uygunluğunu nasıl optimize etmektedir?

Görüşmeler 35 ile 45 dakika arasında sürmüş, katılımcıların rızası ile ses kayıt cihazı kullanılarak kayıt altına alınmış ve metne (transkript) dönüştürülmüştür.

3.3. Veri Analizi

Verilerin çözümlenmesinde Braun ve Clarke (2006) tarafından geliştirilen altı aşamalı tematik analiz süreci takip edilmiştir. Transkriptlerin defalarca incelenmesi sonucu 48 bağımsız kod oluşturulmuş; kodlar harmanlanarak iki ana tema altında yapılandırılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

KAP'ta yer alan 24 bağımsız denetim kuruluşu yetkilisinin görüşleri neticesinde elde edilen tematik yapı ve teyit frekansları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Tematik Yapı ve Frekanslar

Ana Tema	Belirlenen Alt Boyutlar ve Tematik Görüşler	Katılımcı (n=24)
Tema 1: Denetim Faaliyetlerinin Kapsamına Etkisi	Geleneksel örnekleme yerine veri tabanının %100'ünü analiz edebilme imkânı	**24 Firma**
	Finansal manipülasyon ve olağandışı yevmiye kayıtlarının tespitinde öngörü gücünün artması	**22 Firma**
	Algoritmik hata payı ve siber risklerin denetim planlamasını doğrudan etkilemesi	**21 Firma**
	Denetim planının sürekli ve dinamik olarak güncellenmesi gerekliliği	**19 Firma**
	Makine öğrenmesi çıktılarının kanıt olmasında mesleki yargı ve şüpheciliğin kritik rolü	**24 Firma**
	Büyük veri setlerinde gözetimsiz öğrenme (kümeleme) algoritmalarının etkinliği	**17 Firma**
	Denetim firmalarının geriye dönük teyitten risk öngörüsüne yönelmesi	**16 Firma**
	Algoritmaların "kara kutu" yapısı nedeniyle denetçilerin temkinli duruşu	**11 Firma**
Tema 2: Denetim Faaliyetlerinin Uygulamalarına Etkisi	Gözetimsiz anomali tespiti ve kümeleme algoritmalarının aktif kullanımı	**9 Firma**
	Orta ölçekli denetim firmalarında gelişmiş algoritmalar yerine geleneksel analitik araçların baskınlığı	**15 Firma**
	Denetim prosedürlerinde makine öğrenmesi modüllerinin kurumsal standardizasyon arayışı	**18 Firma**
	Algoritmik yazılım lisansı, altyapı ve model bakım maliyetlerinin yüksekliği	**23 Firma**
	Klasik muhasebe nosyonunun yanında veri bilimi yetkinliğine sahip hibrit denetçi ihtiyacı	**24 Firma**

Ana Tema	Belirlenen Alt Boyutlar ve Tematik Görüşler	Katılımcı (n=24)
	Denetim kadrolarına veri analistleri ve endüstri mühendislerinin dahil edilmesi	**14 Firma**
	Modellerin ürettiği yanlış alarmların (false positive) ayıklanmasında oluşan iş yükü	**16 Firma**

4.1. Tema 1: Denetim Faaliyetlerinin Kapsamına Etkisi

Katılımcıların tamamı (n=24), makine öğrenmesi entegrasyonunun getirdiği en köklü dönüşümün örnekleme kısıtının aşılması olduğunu teyit etmiştir. Yevmiye kayıtlarının tamamının saniyeler içinde taranabilmesi, finansal tablo manipülasyonu ve hile tespitinde öngörü gücünü belirgin biçimde artırmaktadır (f=22). Bir Sorumlu Denetçi (K2) bu durumu şu şekilde ifade etmiştir:

> "Geleneksel denetimde örnekleme riski her zaman masadaydı; ne kadar titiz olursanız olun seçilmeyen işlemde hile saklanabilirdi. Makine öğrenmesi algoritmaları bu kör noktayı ortadan kaldırıyor; müşterinin 2 milyon satırlık verisini sisteme yüklüyoruz ve model bize olağan dışı kümelenmeleri doğrudan işaret ediyor."

Bununla birlikte denetim planlaması periyodik bir belge olmaktan çıkarak risklerin anlık izlendiği dinamik bir yapıya evrilmiştir (f=19). Ancak 11 yetkili, algoritmaların "kara kutu" doğasının denetim çalışma kâğıtlarında gerekçelendirilmesinde zorluklar yaşandığına dikkat çekmiştir.

4.2. Tema 2: Denetim Faaliyetlerinin Uygulamalarına Etkisi

Uygulama boyutunda, KAP bünyesindeki 24 firmanın 9'unun (ağırlıklı olarak uluslararası denetim firmalarına bağlı olanlar) gözetimsiz öğrenme ve anomali tespitini operasyonel olarak kullandığı; 15 firmanın ise yüksek lisans maliyetleri nedeniyle geleneksel analitik araçlara ağırlık verdiği belirlenmiştir. Yazılım ve altyapı maliyetlerinin yüksekliği (f=23) ile modellerin ürettiği yanlış alarmların manuel incelenmesi sonucu ortaya çıkan iş yükü (f=16) sürecin temel operasyonel darboğazlarıdır. Katılımcıların tamamı (n=24), muhasebe bilgisi ile veri analitiğini harmanlayan "hibrit denetçi" profiline ihtiyaç duyulduğunu vurgulamış; 14 kuruluş kadrolarına veri analistleri, yazılımcı ve endüstri mühendislerini dahil ettiklerini ifade etmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kamuyu Aydınlatma Platformu'nda yer alan 24 bağımsız denetim kuruluşu ölçeğinde gerçekleştirilen bu çalışma; makine öğrenmesinin örnekleme riskini minimize ederek denetim kalitesini, güvence düzeyini ve hile saptama kabiliyetini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. Makine öğrenmesi, denetçinin mesleki yargısının yerine geçen otonom bir sistem değil; denetim ekiplerini katma değeri yüksek risk alanlarına odaklayan tamamlayıcı bir karar destek mekanizmasıdır. Araştırma bulguları ışığında uygulayıcılara, meslek örgütlerine ve düzenleyici kurumlara yönelik öneriler şunlardır:

- Açıklanabilir Yapay Zekâ Entegrasyonu: Modellerin kara kutu niteliğini aşmak ve denetim izini (audit trail) mevzuata uygun şekilde belgelendirebilmek için açıklanabilir algoritmik yapılar sisteme dahil edilmelidir.
- Sürekli Denetim Mimarisi: Firmalar, dönemsel denetim rutinlerinden makine öğrenmesi destekli sürekli denetim altyapısına geçişi stratejik hedef olarak belirlemelidir.

- Eğitim ve Disiplinlerarası İstihdam: Denetçilerin mesleki gelişim müfredatlarına veri analitiği ve algoritma okuryazarlığı eklenmeli; finansal denetçiler ile veri analistlerinin eşgüdümlü çalıştığı hibrit takımlar oluşturulmalıdır.
- Düzenleyici Rehberler: KGK ve IAASB gibi otoriteler, algoritmik modellerden elde edilen denetim kanıtlarının geçerliliği ve belgelendirilmesine yönelik bağlayıcı uygulama rehberleri yayımlamalıdır.

KAYNAKÇA

Appelbaum, D., Kogan, A. ve Vasarhelyi, M. A. (2017). Big data and analytics in the modern audit engagement: Research needs. *Auditing: A Journal of Practice & Theory*, 36(4), 1-27.

Braun, V. ve Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101.

Brown-Liburd, H., Issa, H. ve Lombardi, D. (2015). Behavioral implications of Big Data's impact on audit judgment and decision making and future research directions. *Accounting Horizons*, 29(2), 451-468.

Cho, S., Vasarhelyi, M. A., Sun, T. ve Zhang, C. (2020). Modeling aggregate journal entries using machine learning for anomaly detection. *Journal of Information Systems*, 34(3), 139-160.

IAASB. (2020). *Non-authoritative support material: Using automated tools and techniques in identifying and assessing risks of material misstatement in accordance with ISA 315*. New York: IFAC.

ICAEW. (2019). *Artificial intelligence and the future of accountancy*. London: ICAEW Thought Leadership.

IDC. (2018). *The digitization of the world from edge to core*. Data Age 2025 White Paper.

Kokina, J. ve Davenport, T. H. (2017). The emergence of artificial intelligence: How automation is changing auditing. *Journal of Emerging Technologies in Accounting*, 14(1), 115-122.

Miles, M. B. ve Huberman, A. M. (1994). *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook* (2. Baskı). Thousand Oaks: SAGE Publications.

Munoko, I., Brown-Liburd, H. L. ve Vasarhelyi, M. (2020). The ethical implications of using artificial intelligence in auditing. *Journal of Business Ethics*, 167(2), 209-234.

Sarens, G. ve Abdolmohammadi, M. J. (2011). Monitoring effects of the internal audit function: Agency theory versus other perspectives. *International Journal of Auditing*, 15(1), 1-20.

Sun, T. (2019). Applying deep learning to audit procedures: An innovative approach to anomaly detection in financial data. *Auditing: A Journal of Practice & Theory*, 38(4), 175-194.

Vasarhelyi, M. A., Kogan, A. ve Tuttle, B. M. (2015). Big Data in accounting: An overview. *Accounting Horizons*, 29(2), 381-396.

GELENEKSEL YAKLAŞIMLARDAN AKILLI SÜREÇLERE: OTONOM SİSTEMLERİN MALİYET MUHASEBESİ VE YÖNETİMİNDEKİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ ROLÜ

Doç. Dr. Hüseyin ÖZYİĞİT

Erzincan Binali Yıldırım University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Business Administration, Accounting and Finance Division, Erzincan

ORCID ID: 0000-0002-0632-7931

ÖZET

Endüstri 4.0 paradigması ve yapay zekâ eksenli teknolojik dönüşümler, üretim ortamlarını siber-fiziksel sistemler, endüstriyel robotlar ve otonom karar destek algoritmaları ile yeniden yapılandırmaktadır. Bu yapısal kırılma, geleneksel maliyet muhasebesinin doğrudan insan emeğine ve hacim tabanlı dağıtım ölçütlerine dayanan yüzyıllık varsayımlarını derinden sarsmaktadır. "Karanlık fabrikalar" ve otonom üretim hatlarında doğrudan işçilik giderleri marjinal düzeylere gerilerken; amortisman, yazılım lisansları, siber güvenlik, kestirimci bakım ve sensör ağları gibi genel üretim giderleri toplam ürün maliyetinin baskın bileşeni haline gelmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, otonom sistemlerin maliyet muhasebesi sistematiği, maliyet havuzları, dağıtım anahtarları ve stratejik yönetim muhasebesi araçları üzerindeki dönüştürücü etkisini kavramsal ve metodolojik olarak incelemektir. Nitel araştırma desenlerinden sistematik doküman incelemesi yöntemiyle yürütülen bu çalışmada, Web of Science, Scopus ve Google Akademik veri tabanları üzerinden ulaşılan 22 adet nitelikli akademik çalışma taranmış ve içerik analizine tabi tutulmuştur. Bulgular; hacim tabanlı geleneksel maliyet yöntemlerinin otonom ortamlarda ürün maliyetlerini ciddi biçimde saptırdığını; buna karşılık Nesnelerin İnterneti (IoT) ve dijital ikiz altyapılarıyla desteklenen Faaliyet Tabanlı Maliyetleme (FTM) ile Zaman Etkenli Faaliyet Tabanlı Maliyetleme (TDABC) modellerinin anlık ve objektif maliyet tahsisine imkân tanıdığını göstermektedir. Ayrıca otonom süreçlerin, maliyet muhasebesini geçmişe dönük kayıt tutma fonksiyonundan çıkararak Yaşam Döngüsü Maliyetlemesi (LCC) ve Kaizen maliyetleme ile entegre, gerçek zamanlı ve proaktif bir stratejik karar mekanizmasına dönüştürdüğü belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapay zekâ, otonom sistemler, maliyet muhasebesi

FROM TRADITIONAL APPROACHES TO SMART PROCESSES: THE TRANSFORMATIVE ROLE OF AUTONOMOUS SYSTEMS IN COST ACCOUNTING AND MANAGEMENT

ABSTRACT

Technological transformations centered on the Industry 4.0 paradigm and artificial intelligence are restructuring production environments through cyber-physical systems, industrial robots, and autonomous decision-support algorithms. This structural shift profoundly challenges the century-old assumptions of traditional cost accounting, which rely on direct human labor and volume-based allocation criteria. In "dark factories" and autonomous production lines, direct labor costs recede to marginal levels, while manufacturing overheads—such as depreciation, software licenses, cybersecurity, predictive maintenance, and sensor networks—become the dominant component of total product costs. The primary objective of this study is to examine, both conceptually and methodologically, the transformative impact of autonomous systems on cost accounting frameworks, cost pools, allocation bases, and strategic management accounting tools. Conducted using a systematic document review method—a qualitative research design—this study analyzed 22 high-quality academic papers sourced from the Web of Science, Scopus, and Google Scholar databases. The findings indicate that traditional volume-based costing methods significantly distort product costs in autonomous environments; conversely, Activity-Based Costing (ABC) and Time-Driven Activity-Based Costing

(TDABC) models—supported by Internet of Things (IoT) and digital twin infrastructures—facilitate real-time and objective cost allocation. Furthermore, it has been determined that autonomous processes transform cost accounting from a function of retrospective record-keeping into a real-time, proactive strategic decision-making mechanism integrated with Life Cycle Costing (LCC) and Kaizen costing.

Keywords: Artificial intelligence, autonomous systems, cost accounting

1. GİRİŞ

Maliyet muhasebesinin tarihsel gelişimi incelendiğinde, kuramsal ve pratik temellerinin 19. yüzyılın sonları ile 20. yüzyılın başlarındaki Taylorist fabrika rejimine ve kitlesel üretim ortamına dayandığı görülmektedir (Kaplan, 1984). Bu klasik dönemde ürün maliyeti; Direkt İlk Madde ve Malzeme (DİMM), Doğrudan İşçilik (Dİ) ve nispeten düşük hacimli Genel Üretim Giderleri (GÜG) olmak üzere üç temel unsur üzerinden kurgulanmıştır. Söz konusu dönemde insan emeği, katma değerin ve dönüştürme maliyetinin birincil itici gücü olarak kabul edilmiş; dolayısıyla dolaylı giderlerin mamullere dağıtımında "doğrudan işçilik saati" veya "doğrudan işçilik tutarı" evrensel bir dağıtım anahtarı olarak kanıksanmıştır. Ancak 21. yüzyılda dördüncü sanayi devrimi (Endüstri 4.0), siber-fiziksel sistemler (CPS), Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut bilişim ve yapay zekâ destekli otonom sistemleri üretim sahasının merkezine yerleştirmiştir (Lee vd., 2014). Otonom sistemler; insan müdahalesine ihtiyaç duymadan algılayan, karar veren, optimize eden ve fiziksel operasyonları kesintisiz yürüten entegre donanım ve yazılım bütünlüklerini ifade etmektedir. Özellikle tam otomasyonun uygulandığı "ışıksız/karanlık fabrikalar" (lights-out manufacturing), geleneksel muhasebe kurgusunun merkezinde yer alan insan emeğini üretim hattından neredeyse tamamen tasfiye etmiştir (Baur ve Wee, 2015). Bu radikal dönüşüm sonucunda maliyet bileşenlerinin ağırlığı köklü bir kırılmaya uğramıştır. Toplam maliyet havuzunda doğrudan işçiliğin payı %2-5 gibi ihmal edilebilir seviyelere gerilerken; yüksek teknoloji amortismanları, kestirimci bakım harcamaları, yazılım lisansları, siber güvenlik protokolleri, sensör ve haberleşme altyapıları gibi kalemlerin oluşturduğu Genel Üretim Giderleri toplam maliyetin %60-70'inden fazlasını teşkil etmeye başlamıştır (Cooper ve Kaplan, 1988; Möller vd., 2020). Bu yapısal değişim, geleneksel dağıtım anahtarlarının geçerliliğini yitirmesine, ürün maliyetlerinde çapraz sübvansiyon (cross-subsidization) ve maliyet sapmalarının ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, otonomlaşan üretim ve hizmet mimarilerinin maliyet muhasebesi kuramı ve uygulamaları üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmanın temel amacı; siber-fiziksel altyapılar, endüstriyel robotlar ve otonom algoritmalarla şekillenen yeni nesil üretim modellerinin maliyet muhasebesi sistematiği, maliyet havuzları, genel üretim gideri dağıtım yöntemleri ve stratejik yönetim muhasebesi araçları üzerindeki dönüştürücü etkisini bütüncül bir yaklaşımla ortaya koymaktır. Çalışmanın önemi ise, mevcut muhasebe literatüründe dijitalleşme ve Endüstri 4.0 kavramlarının çoğunlukla genel hatlarıyla ve betimsel düzeyde tartışılması; doğrudan insan müdahalesiz otonom sistemlerin maliyet hesaplama yöntemleri (özellikle FTM, TDABC, Yaşam Döngüsü Maliyetlemesi ve Hedef Maliyetleme) üzerindeki somut metodolojik ve kuramsal sonuçlarını ele alan çalışmaların sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma, otonom sistemlerin maliyet yapısı üzerindeki asimetrik etkilerini ve muhasebe meslek mensuplarının dönüşen rollerini sentezleyerek literatüre kavramsal ve yöntemsel bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

2. ARAŞTIRMANIN YÖNTEM

Araştırmada nitel araştırma yöntemlerinden doküman incelemesi (sistematik literatür taraması) tekniği kullanılmıştır. Doküman incelemesi; araştırılan olgu veya olgular hakkında bilgi içeren yazılı materyallerin derinlemesine ve sistematik olarak analiz edilmesini sağlayan bir nitel veri toplama ve çözümleme yöntemidir. Araştırma süreci Bowen (2009) tarafından önerilen üç aşamalı protokol doğrultusunda yürütülmüştür:

- 1. Gözden Geçirme ve Filtreleme: Web of Science (WoS), Scopus ve Google Akademik veri tabanlarında "Autonomous Systems", "Cost Accounting", "Industry 4.0", "Activity-

Based Costing", "Robotic Process Automation", "Smart Manufacturing" ve "Life Cycle Costing" anahtar kelimeleri taranmıştır.

- 2. Ayrıntılı İnceleme ve Sınıflandırma: Taranan yayınlar arasından doğrudan maliyet muhasebesi tasarımı, maliyet etkenleri ve yönetimsel kontrol sistemlerine odaklanan hakemli, etki değeri yüksek 22 adet akademik makale ve kitap bölümü seçilerek içerik analizine tabi tutulmuştur.
- 3. Yorumlama ve Sentez: Elde edilen veriler tematik olarak ayrıştırılmış; maliyet yapısı, dağıtım anahtarları, çağdaş maliyetleme teknikleri ve muhasebecinin rolü başlıkları altında sentezlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

İncelenen 22 akademik çalışma doğrultusunda elde edilen bulgular, otonom sistemlerin maliyet muhasebesi ekosisteminde köklü bir paradigma değişimine neden olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1. Maliyet Bileşenlerindeki Yapısal Kayma ve Geleneksel Yöntemlerin Yetersizliği

Otonom üretim sistemlerinin hayata geçirilmesiyle birlikte birim ürün içerisindeki doğrudan işçilik payı marjinalleşmektedir (Kaplan, 1984; Bokrantz vd., 2017). Geleneksel maliyet muhasebesinin temel taşı olan hacim tabanlı dağıtım ölçütleri (doğrudan işçilik saati, direkt işçilik ücreti vb.), genel üretim giderlerini ürünlere yüklemede yetersiz kalmakta ve "maliyet yanılsaması" (cost distortion) yaratmaktadır. Yüksek hacimli basit ürünlere gereğinden fazla, düşük hacimli karmaşık ürünlere ise gereğinden az dolaylı maliyet yüklenmekte; bu durum hatalı fiyatlama ve hatalı stratejik kârlılık kararlarına yol açmaktadır.

Tablo 1. Geleneksel Üretim ve Otonom Üretim Karşılaştırması

Maliyet Unsuru / Parametre	Geleneksel Üretim Ortamı	Otonom Üretim Ortamı (Endüstri 4.0)
Doğrudan İşçilik (Dİ)	Toplam maliyetin %30 - %50'si	Toplam maliyetin %2 - %5'i (Marjinal/Sıfıra yakın)
Genel Üretim Giderleri (GÜG)	Toplam maliyetin %15 - %25'i	Toplam maliyetin %60 - %75'i (Baskın unsur)
Maliyet Davranışı	Ağırlıklı olarak değişken maliyet yapısı	Ağırlıklı olarak sabit ve yarı-sabit (CAPEX odaklı)
GÜG Dağıtım Anahtarları	Doğrudan işçilik saati, direkt işçilik ücreti	Makine döngü süresi, sensör verisi, IoT veri logları
Maliyet Hesaplama Zamanlaması	Dönem sonu periyodik kayıtlar (Reaktif)	Gerçek zamanlı ve simülasyona dayalı (Proaktif)

4.2. Faaliyet Tabanlı Maliyetleme (FTM) ve TDABC'nin Yeniden Yükselişi

Geleneksel ortamlarda FTM uygulamasının önündeki en büyük engel; personelin faaliyetlere harcadığı zamanın belirlenmesindeki öznellik ve yüksek veri toplama maliyeti olmuştur (Kaplan ve Anderson, 2004). Otonom sistemlerde ise makineler, robotik kollar ve taşıma araçları (AGV'ler) IoT sensörleri ile

donatılmıştır. Bu altyapı, her bir faaliyetin (kalıp değiştirme, işleme süresi, enerji tüketimi, bekleme süresi vb.) tam olarak ne kadar süre aldığını mikrosaniye düzeyinde dijital log olarak kaydetmektedir (Möller vd., 2020; Saidani vd., 2020). Böylece Zaman Etkenli Faaliyet Tabanlı Maliyetleme (TDABC), veri toplama maliyeti sıfıra yakın bir kesinlikle otonomlaşmakta ve maliyet tahsisinde insan hatası tamamen ortadan kalkmaktadır.

4.3. Dijital İkiz (Digital Twin) ve Kestirimci Maliyetleme

Otonom üretim sistemlerinin en kritik bileşenlerinden biri "Dijital İkiz" teknolojisidir (Lee vd., 2014; Baur ve Wee, 2015). Ürün fiziksel hatta girmeden önce, üretim hattının sanal kopyası üzerinde simülasyonu yapılmaktadır. Bu süreçte otonom algoritmalar; parçanın işlenme süresini, harcanacak elektrik enerjisini, robot takım aşınma payını ve potansiyel fire oranını önceden hesaplayabilmektedir. Bu durum, maliyet muhasebesini fiili üretim bittikten sonra raporlama yapan reaktif bir yapıdan; ürün tasarlanırken birim maliyeti ve sapmaları sıfır hata toleransıyla modelleyen proaktif bir "kestirimci maliyet yönetimi" aracına dönüştürmektedir.

4.4. Yaşam Döngüsü Maliyetlemesi (LCC) ve Kalite Maliyetleri Dönüşümü

Otonom sistemler, yüksek başlangıç sermaye harcaması (CAPEX) gerektiren ancak işletme döneminde düşük marjinal işletme gideri (OPEX) üreten yapılardır. Bu nedenle maliyet analizinin yalnızca üretim aşamasıyla sınırlandırılması yanıltıcıdır. Saidani vd. (2020) tarafından vurgulandığı üzere, otonom yatırımların kârlılığı ancak AR-GE, yazılım geliştirme, entegrasyon, siber güvenlik, bakım ve hurda aşamalarını kapsayan Yaşam Döngüsü Maliyetlemesi (LCC) ve Toplam Sahip Olma Maliyeti (TCO) çerçevesinde doğru ölçülebilmektedir. Kalite maliyetleri açısından bakıldığında ise otonom görüntü işleme ve yapay zekâlı kalite kontrol üniteleri, mamul sonrasındaki iç ve dış başarısızlık maliyetlerini minimize ederken; maliyetleri algoritma doğrulama ve önleme faaliyetlerine kaydırmaktadır (Campanella, 1999; Sower ve Quarles, 2003).

4.5. Muhasebe Süreçlerinde Robotik Süreç Otomasyonu

Otonomlaşma yalnızca fabrika tabanında kalmamış, yönetim muhasebesi ofislerinin operasyonlarına da nüfuz etmiştir. Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) yazılımları; faturaların eşleştirilmesi, genel üretim gideri varyanslarının hesaplanması, amortisman tablolarının güncellenmesi ve bütçe sapma raporlarının oluşturulması gibi rutin ve kural tabanlı görevleri insan müdahalesiz üstlenmektedir (Cooper vd., 2019; Leitner-Hanetseder vd., 2021). Bu durum hem muhasebe departmanının idari maliyetlerini düşürmekte hem de hata payını ortadan kaldırmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, otonom sistemlerin maliyet muhasebesi üzerindeki yansımalarını kavramsal ve metodolojik olarak değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda şu temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Geleneksel Dağıtımın Çöküşü: Doğrudan işçiliğin tasfiye edildiği otonom üretim alanlarında, hacim tabanlı geleneksel dağıtım anahtarları ürün maliyetlerini saptırmakta ve stratejik karar alma süreçlerini olumsuz etkilemektedir.
- Nesnel FTM ve TDABC: Otonom sistemlerin ürettiği sensör ve IoT verileri, Faaliyet Tabanlı Maliyetleme modellerini öznellikten arındırarak son derece düşük veri toplama maliyetiyle uygulanabilir kılmaktadır.
- Reaktiften Proaktife Geçiş: Dijital ikiz ve yapay zekâ destekli simülasyonlar sayesinde maliyetleme, dönem sonu kayıt faaliyeti olmaktan çıkmış; üretim öncesinde şekillenen dinamik bir kestirimci modele evrilmiştir.

- Muhasebecinin Dönüşen Kimliği: Rutin muhasebe kayıtlarının RPA tarafından devralınmasıyla birlikte maliyet muhasebecisinin rolü; "veri işleyicisi" kimliğinden, algoritmaların maliyet modellerini tasarlayan, veri tutarlılığını denetleyen ve stratejik kararlara yön veren "stratejik iş ortağı" düzeyine yükselmiştir.

Uygulayıcılara ve akademik araştırmacılara yönelik öneriler ise şunlardır:

- Otonom üretim sistemlerine geçen işletmeler, hacim tabanlı genel üretim gideri dağıtım anahtarlarını ivedilikle terk etmeli; ERP sistemlerine entegre IoT tabanlı Zaman Etkenli FTM modellerini devreye almalıdır.
- Maliyet yönetiminde yalnız üretim safhası değil, yüksek teknoloji yatırımlarının tüm yaşam döngüsünü (LCC ve TCO) kapsayan sermaye bütçelemesi modelleri uygulanmalıdır.
- Üniversitelerin ve meslek örgütlerinin muhasebe müfredatları revize edilerek; veri analitiği, algoritma okuryazarlığı ve RPA entegrasyonunu kapsayan yeni nesil yönetim muhasebesi eğitimlerine ağırlık verilmelidir.
- Gelecek ampirik araştırmalarda, otonom sistemlere geçiş yapmış Türk imalat işletmelerinde birim maliyet sapmalarını ve kârlılık etkilerini inceleyen nicel vaka analizleri ve sektörel karşılaştırmalar yapılmalıdır.

KAYNAKÇA

Baur, C., & Wee, D. (2015). *Manufacturing's next act: Industry 4.0*. McKinsey & Company Operations Practice Insights.

Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., & Stahre, J. (2017). Maintenance in digitalised manufacturing: Delphi-based scenarios for 2030. *International Journal of Production Economics*, 191, 154-169.

Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27-40.

Campanella, J. (1999). *Principles of Quality Costs: Principles, implementation, and use*. ASQ Quality Press.

Cooper, R. (1988). The rise of activity-based costing-part one: what is an activity-based cost system?. *Journal of Cost Management*, 2(2), 45-54.

Cooper, R., & Kaplan, R. S. (1988). How cost accounting distorts product costs. *Management Accounting*, 69(10), 20-27.

Cooper, L. A., Holderness, D. K., Sorensen, T. L., & Wood, D. A. (2019). Robotic process automation in public accounting. *Accounting Horizons*, 33(4), 15-35.

Imai, M. (1986). *Kaizen: The key to Japan's competitive success*. McGraw-Hill.

Kaplan, R. S. (1984). The evolution of management accounting. *The Accounting Review*, 59(3), 390-418.

Kaplan, R. S., & Anderson, S. R. (2004). Time-driven activity-based costing. *Harvard Business Review*, 82(11), 131-138.

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2014). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.

Leitner-Hanetseder, B., Lehner, O. M., Eisl, C., & Forstenlechner, C. (2021). A tolerance-maturity framework for revolutionary artificial intelligence in digital accounting. *Journal of Applied Accounting Research*, 22(5), 834-850.

Möller, K., Schäffer, U., & Verbeeten, F. (2020). Digitalization in management accounting and control: An editorial. *Journal of Management Control*, 31(1), 1-8.

Monden, Y. (2011). *Toyota production system: An integrated approach to just-in-time (4th ed.)*. CRC Press.

Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2020). Heavy vehicles on the move towards cleaner configurations: A systematic review of life cycle costing and total cost of ownership models. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122822.

Sower, V. E., & Quarles, R. (2003). Cost of quality: Why more organizations do not use it. *Total Quality Management & Business Excellence*, 14(6), 725-734.

FELEKTEN NÛRA: FEHÎM-İ KADÎM DÎVÂNI'NDA KOZMİK ÂLEMİN TASAVVUFÎ BİR VAHDET HARİTASINA DÖNÜŞÜMÜ

Senem AKÇADAĞ
Kırıkkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Temel İslam Bilimleri Anabilim Dalı, Tezli Yüksek Lisans Öğrencisi
ORCID: 0009-0002-2456-9800

Prof. Dr. Güldane GÜNDÜZÖZ
Kırıkkale Üniversitesi, İslami İlimler Fakültesi, Temel İslam Bilimleri Bölümü
ORCID: 0000-0003-3007-6746

ÖZET

Klasik Türk şiirinde felek, güneş, ay, yıldız, nûr, zulmet, gölge ve ateş gibi kozmik unsurlar yalnızca astronomik gerçekliğin tasvirine hizmet etmez; varlık, kader, aşk ve hakikat tasavvurunun ifade edilmesinde de önemli bir sembolik işleve sahiptir. XVII. yüzyıl şairlerinden Fehîm-i Kadîm'in Dîvânı, kozmik unsurların yoğun ve özgün biçimde kullanıldığı metinlerden biridir. Bu çalışmada Fehîm-i Kadîm Dîvânı'ndaki kozmik unsurlar, tasavvufî kavramlarla kurdukları ilişkiler esas alınarak incelenmiştir. Çalışmanın temel hareket noktasını felek ile nûr arasındaki anlam ilişkisi oluşturmaktadır. Felek; değişkenlik, fanilik ve kader karşısındaki insan tecrübesini temsil eden bir alan oluştururken nûr, güneş ve ay bazı beyitlerde tecellî ve hakikatin sembolik görünümlerine dönüşmektedir. Hz. Mûsâ'nın Tûr tecrübesi, Hallâc-ı Mansûr'un "Ene'l-Hak" söylemi, tevhid, vahdet, mânevî sarhoşluk ve Hz. Peygamber'e yönelik nûr merkezli telmihler bu çerçevede değerlendirilmiştir. Özellikle "rûz u şeb" redifli na'tta güneş ve ayın Hz. Peygamber'in nûru karşısında ikincil bir konuma yerleştirilmesi, kozmik sembolizmin ulaştığı önemli bir anlam aşamasını göstermektedir. İnceleme sonucunda Fehîm'in kozmik dünyasının yalnızca astronomik bir tasvir alanı olmadığı; felekten nûra, karanlıktan tecellîye ve kesret görüntüsünden birlik idrakine uzanan çok katmanlı bir anlam örgüsü meydana getirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tasavvuf, Fehîm-i Kadîm Dîvânı, Kozmik Sembolizm, Vahdet-i Vücûd, Felek, Nûr

THE CELESTIAL SPHERE TO NŪR: THE TRANSFORMATION OF THE COSMIC REALM INTO A SUFI MAP OF UNITY IN FEHÎM-İ KADÎM'S DÎVÂN

ABSTRACT

In Classical Turkish poetry, cosmic elements such as the celestial sphere (*felek*), stars, the sun, the moon, light (*nūr*), darkness, shadow, meteors, and clouds are not merely references to astronomical reality; rather, they function as multilayered symbols through which poets articulate their conceptions of existence, destiny, love, and truth. The *Dîvân* of Fehîm-i Kadîm, one of the prominent poets of the seventeenth century, is likewise a work in which cosmic elements are employed extensively and distinctively. However, interpreting Fehîm's cosmic imagination solely within the framework of conventional poetic motifs and astronomical knowledge may obscure the Sufi layers of meaning embedded in these elements. This paper examines the cosmic elements in Fehîm-i Kadîm's *Dîvân* within a Sufi semantic map that moves from multiplicity toward unity.

The central point of departure is the semantic opposition between the celestial sphere and *nūr*. The ever-turning and ever-changing celestial sphere that encompasses human existence represents multiplicity, transience, and the mutable face of destiny, whereas *nūr* and its various manifestations—the sun, the moon, and flame—are interpreted as symbolic manifestations of divine self-disclosure (*tajallī*) and

ultimate truth. Within this framework, shadow is understood as a derivative reality whose existence depends upon *nūr*, while the "wine of unity" (*şarâb-ı vahdet*) symbolizes the attainment of unity through the dissolution of the self, mystical intoxication (*sukr*), and annihilation (*fanāʾ*). The intoxication of the sun and the moon is interpreted as suggesting that even cosmic beings lose their apparent autonomy in the face of the experience of unity.

Furthermore, allusions to Moses' experience at Mount Ṭūr, al-Ḥallāj's proclamation "Anā al-Ḥaqq," Bāyazīd al-Bisṭāmī's states of ecstasy and *fanāʾ*, and light-centred references to the Prophet Muhammad are examined as examples that illuminate the Sufi dimension of cosmic symbolism. Particular attention is given to the *naʿt* in the *Dîvân* with the refrain "Rūz u şeb," in which the cosmic realm acquires meaning around the Prophet's *nūr*, marking the culmination of this symbolic structure.

Within this framework, the paper aims to demonstrate that Fehîm's cosmic world is not merely a realm of astronomical description; rather, it constitutes a Sufi map of existence and meaning that unfolds from the celestial sphere to *nūr*, from darkness to divine self-disclosure, from shadow to truth, and from multiplicity to unity.

Keywords: Sufism, Fehîm-i Kadîm, *Dîvân*, Cosmic Symbols, Unity of Being, Celestial Sphere, Nūr

1. GİRİŞ

Klasik Türk şiirinde tabiata ve kozmosa ait unsurlar, yalnızca dış dünyanın tasvirinde kullanılan estetik unsurlar değildir. Felek, güneş, ay, yıldız, gece, gündüz, ışık ve karanlık gibi kavramlar; geleneksel şiir dilinin içerisinde aşk, kader, güzellik, fanilik ve hakikat gibi meselelerin ifade araçlarına dönüşebilmektedir. Bu durum, klasik şiirin görünen âlem ile anlam arasında kurduğu güçlü ilişkinin bir sonucudur. Bununla birlikte bir şiirde kozmik unsurların bulunması, söz konusu şiirin doğrudan tasavvufî olduğu anlamına gelmez. Tasavvufî anlamın belirlenmesinde kavramın kullanıldığı bağlamın ve diğer unsurlarla kurduğu ilişkinin dikkate alınması gerekir.

Tasavvufî düşüncede kozmik âlemin anlamlandırılması, varlığın çokluk görünümünden birlik hakikatine doğru okunmasıyla yakından ilişkilidir. Bu anlayışta insan âlemi, görünüşte birbirinden farklı unsurlardan meydana gelse de haddizâtında tek bir hakikatin tezahürü olarak değerlendirilir. Bu çerçevede İnsân-ı kâmil, bu âlemin ruhu ve müdebbiri olarak âlemdeki farklı varlık mertebelerini birleştiren merkezi bir konuma sahiptir. Buna göre akıllar, mufârıkat ve âlemin diğer cüzleri, İnsân-ı kâmilin kuvveleri ve fiillerinin farklı görünümleri olarak düşünülebilir. Bu yaklaşım, kozmik unsurların birbirinden bağımsız semboller olarak değil, kesretten vahdete uzanan bütüncül bir varlık tasavvurunun unsurları olarak okunmasına imkân vermektedir.

XVII. yüzyıl klasik Türk şiirinin önemli isimlerinden Fehîm-i Kadîm, özellikle yoğun hayal dünyası ve özgün söyleyiş biçimiyle dikkat çeken bir şairdir. Fehîm'in hayatı, sanatı ve eserleri üzerine bilgi veren Üzgör (1991), onun genç yaşta güçlü bir edebî birikim kazandığını ve Fars şiirine hâkim olduğunu ortaya koymaktadır. Fehîm'in şiir dili aynı zamanda Sebk-i Hindî'nin Türk edebiyatındaki dikkate değer örneklerinden birini meydana getirmektedir. Fehîm'in şiirinde uzun ve birleşik yapılar, örtük teşbihler, kapalı istiâreler ve yenilenen mazmunların belirgin olduğunu; şairin özgünlüğünün önemli ölçüde bu hayal ve anlam yapısından kaynaklandığını belirtmektedir.

Fehîm'in Dîvânı'nda kozmik unsurlar da bu yoğun hayal örgüsünün önemli parçaları arasındadır. Güneş ve ay bazen sevgilinin güzelliğini, bazen memduhun üstünlüğünü, bazen şairin ruh hâlini ifade ederken bazı şiirlerde nûr, tecellî, Tûr, tevhid ve vahdet gibi tasavvufî kavramlarla aynı anlam alanına girmektedir.

Fehîm'in kozmik tasavvurunda bu unsurların anlamı, tek tek sembolik karşılıklardan ziyade aralarındaki ilişkiler üzerinden belirginleşmektedir. Felek, güneş, ay, gece, gündüz ve nûr, şiirin farklı bağlamlarında birbirinden bağımsız imgeler olarak kalmamakta, kesret, değişkenlik, tecellî ve hakikat arasında kurulan anlam ilişkilerinin taşıyıcılarına dönüşmektedir. Bu bakımdan kozmik âlem, sadece dış dünyaya ait bir görüntüler bütünü olmaktan çıkarak varlığın çokluk içerisindeki görünüşünü ve bu çokluğun birlik idrakine doğru yorumlanmasını mümkün kılan sembolik bir düzleme dönüşmektedir.

Çalışmada "vahdet haritası" olarak adlandırılan bu düzlem, kozmik unsurların birbirinden kopuk anlamlarını değil, felekten nûra ve kesretten vahdete uzanan ilişkisel bütünlüğü ifade etmektedir.

Dolayısıyla Fehîm'in kozmik unsurlarının tamamına tasavvufî anlam yüklemek yerine, söz konusu unsurların tasavvufî kavramlarla doğrudan ilişkiye girdiği örnekler merkeze alınmıştır. Bu doğrultuda Dîvân'daki felek, güneş, ay ve nûr imgeleri; Tûr, Hz. Mûsâ, Hallâc-ı Mansûr, tecellî, tevhid, vahdet, Elest ve şarap kavramlarıyla birlikte değerlendirilmiştir.

Başlıkta kullanılan "felekten nûra" ifadesi, Dîvân boyunca kronolojik biçimde gerçekleşen bir dönüşümü değil, çalışmanın yorumlayıcı çerçevesini ifade etmektedir. Feleğin değişkenliği ile nûrun tecellî ve hakikat çağrışımı arasındaki ilişki üzerinden, Fehîm'in kozmik unsurlarının tasavvufî bir anlam alanı içerisinde nasıl anlam kazandığı araştırılmaktadır.

2. FELEK: DEĞİŞKENLİK VE KESRETİN SEMBOLİK ALANI

Felek, klasik şiirde sürekli dönüşü sebebiyle değişkenlik, talih ve kaderle yakından ilişkilendirilen kozmik unsurlardan biridir. Fehîm de feleği zaman zaman insan iradesini aşan, değişkenliği ve belirsizliğiyle insanın kader tecrübesini kuşatan bir güç olarak tasvir etmektedir. Dîvân'da feleğin devri, insanın dünyadaki değişken tecrübesinin şiirsel karşılığı hâline gelebilmektedir.

Fehîm'in "Gözünün perdesinde gece gündüz feleğin devri resmedilse de sen onun Güneş'ine aldanma, Ay şekline bakma" anlamındaki ifadesinde, görünür kozmik ihtişama karşı belirgin bir mesafe bulunmaktadır (Üzgör, 1991, s.101). Güneş ve ay, fiziksel parlaklıklarına rağmen hakikatin mutlak ölçüsü değildir. Şairin aynı bağlamda ârifleri "feleklere rağmen Ay ve Güneş'ten kadeh yaparak gece gündüz içen" kimseler şeklinde tasvir etmesi, kozmik hiyerarşiyi tersine çevirmektedir (Üzgör, 1991, s.101). Böylece feleğin temsil ettiği görünür kozmik düzen, ârifin idrakinde hakikatin nihai ölçüsü olmaktan çıkar ve yeniden anlamlandırılan bir unsura dönüşür.

Bu hayalde ârif, felek karşısında edilgen bir konumda değildir. Aksine güneş ve ay, onun mânevî tecrübesinde birer kadehe dönüşmektedir. Böylece insanı kuşatan kozmik unsurlar, ârifin idrak dünyası içerisinde yeniden anlamlandırılmaktadır.

Burada feleği doğrudan ve her kullanımda tasavvufî anlamdaki "kesret" kavramıyla özdeşleştirmek doğru değildir. Bununla birlikte feleğin dönüşü, değişkenliği ve insanı kuşatan yapısı, kesret düşüncesiyle ilişkilendirilebilecek sembolik bir zemin meydana getirmektedir. Bu sebeple çalışmada felek, daha çok değişen ve çokluk hâlinde görünen dünyanın şiirsel alanı olarak ele alınmaktadır.

3. NÛR, GÜNEŞ VE AY: KOZMİK IŞIKTAN TECELLÎYE

Nûr, tasavvufî kullanımında mânevî aydınlanma, ilâhî hakikatin idraki ve kalpte meydana gelen keşiflerle ilişkilendirilen geniş bir anlam alanına sahiptir. Nûr kavramının tasavvuf düşüncesindeki anlam genişliği, Hallâc-ı Mansûr'a nispet edilen Nûr-ı Muhammedî/Hakîkat-i Muhammediyye anlayışı çerçevesinde daha da belirginleşmektedir. Bu anlayışta Hz. Muhammed'in nûru, yaratılışın başlangıcına ilişkin metafizik bir hakikat olarak değerlendirilmiş; sonraki dönemlerde bu yaklaşım, varlığın ilk mertebelerine ilişkin farklı nazariyelerle birlikte ele alınmıştır **(Hallâc-ı Mansûr, 2010, s. 181).** Hallâc'ın bu görüşü, nûrun yalnızca fiziksel aydınlık değil, varlığın ve mânevî hakikatin kaynağına ilişkin sembolik bir kavram olarak anlaşılmasına imkân veren tasavvufî düşünce çizgisinin önemli örneklerinden biridir. Dîvân'da güneş ve ay çok farklı bağlamlarda kullanılmıştır. Bunların her birini tasavvufî bir sembol olarak değerlendirmek mümkün değildir. Ancak güneş ve ayın nûr ve tecellî kavramlarıyla birleştiği yerlerde kozmik ışığın metafizik bir anlam kazandığı görülmektedir.

Fehîm'in "Ben Allah'ın tecellî nûruna göz açmışım" anlamındaki ifadesi bunun belirgin örneklerinden biridir (Üzgör, 1991, s.119). Burada "göz açmak", yalnızca fiziksel görme eylemini değil, hakikatin farkına varmayı çağrıştırmaktadır. Nûr da böylelikle görünen ışığın ötesinde mânevî idrakin konusu hâline gelmektedir.

Tasavvuf terminolojisinde tecellî, Hakk'ın çeşitli mertebelerde zuhur etmesi ve sâlikin bu zuhuru keşif yoluyla idrak etmesiyle ilişkili bir kavramdır (Ceyhan, 2011). Bu anlam çerçevesi dikkate alındığında Fehîm'in "tecellî nûru" terkibi, kozmik ışık ile mânevî idrak arasındaki geçişi göstermesi bakımından önemlidir.

Şairin başka örneklerde güneşi sevgilinin güzelliği karşısında "zerre" seviyesine indirmesi de benzer bir hiyerarşik dönüşüm meydana getirir. Fiziksel âlemin en güçlü ışık kaynaklarından biri olan güneş, daha üstün kabul edilen güzellik veya tecellî karşısında ikincil bir varlık hâline gelir. Fehîm'in bu tür alışılmamış hayal ilişkileri, Sebk-i Hindî'nin kapalı istiâre ve uzak çağrışımlara dayanan şiir diliyle de uyumludur (Akın, 2024).

Dolayısıyla Fehîm'in şiirinde nûr, güneş ve ayın anlamı sabit değildir. Ancak bu unsurlar tecellî ve mânevî idrak kavramlarıyla birleştiğinde, fiziksel kozmosun sınırlarını aşarak tasavvufî bir anlam alanına geçebilmektedir.

4. TÛR, HZ. MÛSÂ VE HALLÂC-I MANSÛR: TECELLÎDEN BİRLİK İDRAKİNE

Fehîm'in kozmik sembolizminin tasavvufî boyutunun en belirgin biçimde ortaya çıktığı örnekler, Tûr ve Hz. Mûsâ telmihlerinin kullanıldığı şiirlerdir. Tûr, tecellî kavramıyla birleştiğinde yalnızca coğrafi bir mekân olmaktan çıkarak ilâhî hakikatin görünüşüne işaret eden sembolik bir alan hâline gelmektedir.

Fehîm'in: "Mûsâ hakikat gözüyle bakmadıkça vadilerin ve dağların hepsinin Tûr olduğunu nereden anlasın?" anlamındaki ifadesi, bu dönüşümün güçlü örneklerinden biridir (Üzgör, 1991, s.119). Beyitte asıl belirleyici unsur "hakikat gözü"dür. Bu gözle bakılmadığı müddetçe Tûr yalnızca belirli bir dağdır; fakat bakışın niteliği değiştiğinde vadiler ve dağların tamamı tecellîyi hatırlatan birer işarete dönüşmektedir.

Bu ifade, Ceyhan'ın (2011) tecellî kavramı için ortaya koyduğu "zuhur" ve bu zuhurun sâlik tarafından idrak edilmesi ekseniyle birlikte düşünüldüğünde daha anlamlı hâle gelmektedir. Fehîm'de dış dünyanın değişmesinden çok, ona yönelen idrakin dönüşümü önem kazanmaktadır.

Şairin hemen ardından: "Kulağı birlik nağmesi ile dolmayınca her ağacın 'ben Allah'ım' diyici olduğunu nasıl duysun?" ifadesini kullanması, görme üzerinden kurulan anlamı işitme üzerinden devam ettirmektedir (Üzgör, 1991, s.119). İlk beyitte "hakikat gözü", ikincisinde ise "birlik nağmesi" öne çıkar. Böylelikle dağlar, vadiler ve ağaçlardan meydana gelen çokluk, aynı hakikate işaret eden bir anlam bütününe dönüşmektedir.

Aynı şiirsel çevrede Hallâc-ı Mansûr'a yapılan gönderme de dikkat çekicidir. Fehîm, Hz. Mûsâ'nın Eymen Vadisi'ndeki tecrübesi ile Hallâc'ın "Ene'l-Hak" söylemini aynı imgesel yapı içerisinde bir araya getirir (Üzgör, 1991, s.185). Başka bir şiirde ise kendisini "tecellinin Tûr Dağı'nda beyaz kâfur mumu" şeklinde nitelendirir; ardından "tecellî ateşi", "tevhid" ve Mansûr'un "Ben Hakk'ım" söylemini birbirine bağlar (Üzgör, 1991, s.185).

Ancak Fehîm'in Hallâc telmihlerini değerlendirirken "Ene'l-Hak" ifadesini doğrudan ontolojik bir özdeşlik iddiası olarak yorumlamak ihtiyat gerektirir. Nitekim Hallâc'ın fenâ anlayışı, mâsivâdan sıyrılma ve benlik iddiasının ortadan kalkması ekseninde ele alınmış; bu çerçevede onun yaklaşımını vahdet-i vücûddan ziyade vahdet-i şuhûda yakın gören yorumlar da ortaya konmuştur (İbnü'l-Beşîr, *Felsefetü İbni 'Arabî*, 2021, 202). Sünnî tasavvuf geleneğinde ise fenâ, sâlikin kendi varlık ve iddiasını geride bırakarak Allah'ın vahdâniyetini idrak ve ikrar ettiği bir hâl olarak değerlendirilmiştir (İbnü'l-Beşîr, *Felsefetü İbni 'Arabî*, 191). İbnü'l-Arabî'de ise fenâ ve bekā, cem' ve fark gibi birbirini tamamlayan iki kavram olarak ele alınır (İbnü'l-Arabî, *el-Fütûhâtü'l-Mekkiyye*, II, 504).

Bu çerçeve, Fehîm'in Tûr, tecellî ve Hallâc telmihlerinin aynı şiirsel örgü içinde buluşmasını daha açık biçimde ortaya koymaktadır. Burada asıl mesele, benlik iddiasının silindiği bir fenâ hâlinde tevhid hakikatinin yoğun biçimde tecrübe edilmesidir. Hz. Mûsâ'nın Tûr'da tecellî ile karşılaşması ile Hallâc'ın "Ene'l-Hak" sözü böylece aynı anlam düzleminde birleşmektedir: İlkinde hakikat, tecellî yoluyla görülür, ikincisinde ise benlik iddiasını aşan bir şuhûd ve fenâ hâli içerisinde dile gelir. Fehîm'in şiirinde Tûr, tecellînin mekânı; Hallâc ise bu tecellî karşısında benliğin geri çekilmesinin sembolü

hâline gelir. Böylece kozmik unsurlar yalnızca ilâhî varlığın görünüşüne işaret eden unsurlar olmaktan çıkar; sâlikin çokluktan birliğe yönelen idrak sürecinin aşamalarını da temsil eder.

5. ŞARAP, SEKR VE VAHDET

Klasik Türk şiirinde şarap, bağlama göre rindâne yaşantıdan tasavvufî tecrübeye uzanan geniş bir anlam alanı içerisinde işlev kazanan çok katmanlı bir imgedir. Fehîm'in şiirinde de şarap, kimi beyitlerde meclis ve rindâne hayatın estetik dünyasına ait bir unsur olarak belirirken, kimi bağlamlarda cemâl, vahdet, Elest ve sır gibi kavramlarla birleşerek tasavvufî bir anlam katmanı kazanmaktadır.

Fehîm'in "Allah'ın cemâl şarabının sarhoşu olan varlığı ne bilsin?" anlamındaki ifadesinde şarap, açık biçimde "cemâl" kavramıyla ilişkilendirilmiştir (Üzgör, 1991, s.119). Aynı şiirde gönlün "sarhoşçasına sırrını ortaya koyması" ise sekr hâli ile sırrın açığa çıkışı arasında dikkat çekici bir anlam bağı oluşturmaktadır.

Şairin "aşk neyi vahdet nağmesi yaydığında" zahit ve rahiplerin semâ etmesinden söz etmesi ise vahdet kavramının doğrudan şiirsel söyleme dâhil edildiğini göstermektedir (Üzgör, 1991, s.119). Burada vahdet, soyut bir öğretinin açıklaması şeklinde değil, işitilen bir "nağme" ve insanı harekete geçiren bir aşk tecrübesi şeklinde somutlaştırılmıştır.

Benzer biçimde "Gönül, Elest meclisinin şarabını arzulayalı beri, devran sakisine ömür dolu bir kadehim" anlamındaki ifade, şarap sembolünü Elest telmihiyle ilişkilendirmektedir (Üzgör, 1991,s.669). Böylelikle şarap, dünyevî meclisin ötesine taşınarak ezelî ahdin hatırlanmasıyla ilişkilendirilebilecek mânevî bir çağrışım kazanmaktadır.

Bu noktada sekr ve fenâ kavramlarının şiirdeki kullanımını değerlendirirken tasavvuf düşüncesindeki ifade ve aktarım problemini de dikkate almak gerekir. Gazzâlî, bazı hakikatlerin muhatabın idrak seviyesine göre farklı biçimlerde ifade edilmesi veya kimi durumlarda açıkça aktarılmaması gerektiğini belirtmektedir. Ona göre özellikle sekr hâlinde söylenen şathiyeler, âşığın mânevî tecrübesinin yoğunluğu sebebiyle örtülü kalabilen ve doğrudan nakledilmesi uygun görülmeyen sözlerdir. Bu yaklaşım, sekr hâlinin yalnızca bir "sarhoşluk" durumu değil, mânevî tecrübenin dil üzerindeki etkisini de ifade ettiğini göstermektedir (Gazzâlî, 1407/1986, s. 138-140).

Tasavvuf terminolojisinde fenâ ise kulun kendi fiil ve varlık iddiasından sıyrılmasına ilişkin geniş bir mânevî tecrübeyi ifade etmekte ve sekr, sahv, cem' ve tefrika gibi kavramlarla ilişkilendirilmektedir (Kara,1995, s.333-335). Fehîm'in sarhoşluk ve vahdet imgeleri bu kavram alanıyla ilişkilendirilmeye elverişli olmakla birlikte, Dîvân'daki her şarap imgesini teknik anlamda fenâ makamının doğrudan ifadesi saymak doğru değildir.

Bu çerçevede Fehîm'de şarap ve sarhoşluk, tasavvufî kavramlarla desteklendiği örneklerde sekr, vecd ve benlik şuurunun aşk karşısında zayıflaması şeklinde yorumlanabilir. Özellikle "cemâl", "vahdet", "Elest" ve "sır" gibi kavramlarla birlikte kullanılan şarap imgeleri, dünyevî meclis bağlamını aşarak mânevî tecrübenin sembolik bir ifadesine dönüşebilmektedir. Bununla birlikte bu imgelerin her birini belirli bir tasavvufî makamın doğrudan karşılığı olarak görmek yerine, şiirin bağlamı içerisinde oluşan anlam ilişkileri üzerinden değerlendirmek daha isabetlidir. Böyle bir okuma, hem klasik şiirin çok anlamlı yapısını korumakta hem de metne dışarıdan kesin bir tasavvuf sistemi yüklenmesini önlemektedir.

6. "RÛZ U ŞEB" NA'TINDA NÛR MERKEZLİ KOZMOS

Fehîm'in kozmik unsurlarının dinî-tasavvufî anlam bakımından en yoğun biçimde kullanıldığı metinlerden biri "rûz u şeb" redifli na'ttır. Bu şiirde güneş, ay, gece, gündüz ve felek gibi kozmik unsurlar Hz. Peygamber'in nûru etrafında yeniden anlamlandırılmaktadır (Üzgör, 1991, s.99-107).

Şair, Hz. Peygamber'i "peygamberlik göğünün Güneş'i" ve "seçkinlik doruğunun Ay'ı" şeklinde tasvir etmektedir. Ancak şiirin asıl dikkat çekici yönü, güneş ve ayın yalnızca Hz. Peygamber'e benzetilmesi

değildir. Fehîm, onun nûrunun güneş ve aya dahi rehberlik ettiğini ifade ederek kozmik hiyerarşiyi tersine çevirmektedir.

"Nurunun ışığı çöl karanlığının bulanıklığından nura çıkmaları için Güneş'e ve Ay'a gece gündüz rehber olan o Peygamber'dir" anlamındaki ifade bu yapının açık örneklerindendir (Üzgör, 1991, s.101). Fiziksel âlemde karanlığı ortadan kaldıran güneş ve ay, şiirin mânevî düzeninde kendileri nûra ulaştırılması gereken varlıklar hâline gelmektedir.

Aynı düşünce:

"Senin nurunun aksi, dünyayı Güneş ve Ay'ın feyzine kavuşturduğundan…"

anlamındaki ifadede daha belirgin hâle gelir (Üzgör, 1991,103). Burada güneş ve ayın feyzinin kaynağı, Hz. Peygamber'in nûrunun aksi olarak tasavvur edilmektedir. Böylelikle fiziksel ışık ile mânevî nûr arasında belirgin bir hiyerarşi kurulmaktadır.

Tasavvuf düşüncesinde nûr kavramı mânevî aydınlanma ve hakikatin idrakiyle yakın ilişki içerisindedir (Uludağ, 2007,Cilt 33, s. 244–245). Fehîm'in na'tındaki kullanım ise bu genel tasavvufî anlamın yanında doğrudan Hz. Peygamber merkezli bir nûr anlayışına yönelmektedir.

Şiirde güneş ve ayın "ilk yaratılan nûrun sırrından" görünür olmalarına yapılan gönderme bu açıdan özellikle önemlidir (Üzgör, 1991, s.103). Tasavvuf geleneğinde Hz. Peygamber'in mânevî şahsiyetini yaratılışın başlangıcıyla ilişkilendiren Hakîkat-i Muhammediyye anlayışının erken dönemlerden itibaren nûr düşüncesiyle birlikte geliştiği bilinmektedir (Demirci, 1997,15.cilt, s.179-180). Bu anlayış, tasavvufî kozmolojide nûrun varlık mertebelerinin anlam kazanmasını mümkün kılan daha üst bir hakikat olarak düşünülmesiyle de ilişkilidir. Nitekim nazarî irfan geleneğinde taayyünler ve âlemler arasındaki varlık ilişkisi, ilâhî tecellî ve feyiz kavramları üzerinden açıklanırken, hissî âlemdeki varlıkların daha üst mertebelerle ilişkili olduğu kabul edilmektedir (Yezdan Penâh, 2016, s. 451). Bu kozmolojik çerçeve, Fehîm'in şiirinde güneş ve ay gibi görünür ışık kaynaklarının Hz. Peygamber'in nûru karşısında ikincil bir konuma yerleştirilmesini anlamlandırmak bakımından açıklayıcı bir arka plan sunmaktadır. Her ne kadar Fehîm'in bu nazarî kozmoloji sistemini bütün ayrıntılarıyla benimsediği söylenemese de, şiirinde görülen nûr merkezli kozmik hiyerarşi söz konusu tasavvufî düşünceyle anlamlı bir paralellik arz etmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, Fehîm'in beyitlerinden hareketle ona ayrıntıları belirlenmiş sistematik bir Hakîkat-i Muhammediyye öğretisi isnat etmemektir. Metnin açıkça gösterdiği husus, Hz. Peygamber'in nûrunun güneş ve ayın fiziksel ışığından daha üst bir mertebede konumlandırılmasıdır. Bu durum, şiirin nûr merkezli peygamber tasavvurunu göstermeye yeterlidir.

Dolayısıyla "rûz u şeb" na'tı, çalışmanın başlığındaki "felekten nûra" hareketinin en belirgin örneğini oluşturmaktadır. Kozmik düzenin merkezi, fiziksel büyüklük ve parlaklıktan mânevî değere doğru kaymakta; güneş ve ay daha yüksek bir nûrun göstergeleri hâline gelmektedir.

SONUÇ

Fehîm-i Kadîm Dîvânı'ndaki kozmik unsurlar üzerine yapılan bu inceleme, felek, güneş, ay, nûr, karanlık ve ateş gibi unsurların şairin hayal dünyasında farklı anlam katmanları kazandığını göstermektedir. Bu unsurların tamamını doğrudan tasavvufî semboller olarak değerlendirmek mümkün değildir. Ancak Tûr, tecellî, tevhid, vahdet, Elest, cemâl ve nûr gibi kavramlarla aynı şiirsel bağlam içerisinde kullanıldıkları örneklerde tasavvufî anlam belirginleşmektedir. Bu durum, Fehîm'in kozmik imge dünyasında anlamın tek tek sembollerin sabit karşılıklarından değil, bu sembollerin birbirleriyle ve tasavvufî kavramlarla kurdukları ilişkilerden doğduğunu göstermektedir. Dolayısıyla Fehîm'in şiirindeki kozmik unsurlar, hazır bir sembol sözlüğünün parçaları olmaktan ziyade, şiirsel bağlama göre yeniden anlam kazanan dinamik göstergeler olarak belirginleşmektedir.

Felek, Fehîm'in şiirinde değişkenlik, talih ve insanın dünyadaki istikrarsız tecrübesinin sembolik alanlarından birini oluştururken nûr, özellikle tecellî ve mânevî idrakle birleştiği örneklerde farklı bir anlam düzeyine ulaşmaktadır. Bu sebeple çalışmada felek ile nûr arasında mutlak bir karşıtlık kurmak

yerine, değişen ve çokluk hâlinde görünen âlemden onun ardındaki hakikati fark etmeye yönelen şiirsel bir hareket bulunduğu ileri sürülmüştür. Bu hareket, feleğin bütünüyle olumsuzlandığı veya nûrun feleğin karşıtı olarak konumlandırıldığı doğrusal bir dönüşüm değildir; aksine görünen âlemin değişkenliği içerisinden daha yüksek bir anlam mertebesinin fark edilmesini mümkün kılan yorumlayıcı bir ilişkidir.

Bu bağlamda çalışmada kullanılan "vahdet haritası" ifadesi, Fehîm'in şiirinde önceden kurulmuş ve sistematik biçimde uygulanmış bir tasavvufî kozmoloji bulunduğu anlamına gelmemektedir. Kavram, felek, güneş, ay, nûr, Tûr, tecellî ve vahdet gibi unsurların belirli şiirsel bağlamlarda birbirleriyle ilişkiye girerek görünür âlem ile mânevî hakikat arasında oluşturdukları anlam ağını ifade etmektedir. Bu yönüyle vahdet haritası, tek tek sembollerin karşılıklarından ziyade, semboller arasındaki ilişkilerin oluşturduğu bütüncül bir yorum düzlemidir.

Bu hareketin en güçlü örneklerinden biri Hz. Mûsâ ve Tûr telmihlerinde ortaya çıkmaktadır. "Hakikat gözü" ile bakıldığında bütün dağların Tûr hâline gelmesi ve "birlik nağmesi"ni işiten kişinin bütün varlıkta aynı hakikatin işaretlerini duyması, kozmik ve tabiî çokluğun birlik fikri etrafında yeniden anlamlandırılmasına imkân vermektedir. Hallâc-ı Mansûr, tecellî ve tevhid kavramlarının aynı şiirsel bağlama yerleştirilmesi de bu anlam alanını güçlendirmektedir. Böylece Fehîm'de vahdet, yalnızca kavramsal olarak dile getirilen bir öğreti değil, görmenin ve işitmenin dönüşmesiyle gerçekleşen bir idrak biçimi olarak şiirsel karşılık bulmaktadır.

Şarap ve sarhoşluk imgeleri ise özellikle cemâl, Elest ve vahdet kavramlarıyla birlikte kullanıldıklarında mânevî tecrübeyi anlatan sembolik bir dile dönüşmektedir. Bununla birlikte söz konusu imgelerin doğrudan ve her durumda teknik anlamdaki fenâ makamına karşılık geldiğini söylemek yerine, sekr, vecd ve benlik şuurunun aşk karşısında zayıflaması çerçevesinde değerlendirilmesi daha ihtiyatlıdır.

Çalışmanın temel tezinin en belirgin karşılığı "rûz u şeb" redifli na'tta görülmektedir. Bu şiirde güneş ve ay, Hz. Peygamber'in nûru karşısında ikincil bir konuma yerleştirilmekte; fiziksel ışık mânevî nûra tâbi kılınmaktadır. "İlk yaratılan nûr"a yapılan gönderme ise şiiri Hakîkat-i Muhammediyye ve nûr-ı Muhammedî etrafında gelişen tasavvufî çağrışım alanına yaklaştırmaktadır. Burada dikkat çekici olan, güneş ve ayın yalnızca Hz. Peygamber'e benzetilmesi değil, kozmik ışığın kaynağına ilişkin hiyerarşinin yeniden kurulmasıdır; fiziksel ışık kaynakları, daha üstün bir nûrun kendilerinde tecellî ettiği ve onlara yön verdiği unsurlar hâline gelmektedir.

Sonuç olarak Fehîm-i Kadîm'in kozmik dünyası, yalnızca astronomik unsurların estetik kullanımından oluşmamaktadır. Şair, Sebk-i Hindî'nin yoğun ve girift hayal imkânlarından yararlanarak görünen kozmik âlemi zaman zaman mânevî hakikatin göstergelerine dönüştürmektedir. Bu çerçevede "felekten nûra" hareketi; değişkenlikten tecellîye, görünür çokluktan birlik idrakine ve fiziksel ışıktan mânevî nûra yönelen bir anlam örgüsü olarak okunabilir. Son tahlilde Fehîm'in kozmik âlemi böylece, tasavvufî kavramlarla ilişkilendirildiği şiirlerde, yalnızca seyredilen bir gökyüzü olmaktan çıkarak hakikate işaret eden bir anlam haritasına dönüşmektedir.

KAYNAKÇA

Akın, M. (2024). Bir Sebk-i Hindî şairi olan Fehîm-i Kadîm'in şiirinde orijinalliğin anahtarları. *Eski Türk Edebiyatı Araştırmaları Dergisi, 7*(2), 945–971. https://doi.org/10.58659/estad.1475300

Ceyhan, S. (2011). Tecellî. *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi*. TDV İslâm Araştırmaları Merkezi.

Demirci, M. (1997). Hakîkat-i Muhammediyye. *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi*. TDV İslâm Araştırmaları Merkezi.

Gazzâlî, Ebû Hâmid el-. (1986). *Mişkâtü'l-envâr ve misfâtü'l-esrâr* (Abdülaziz İzzüddîn es-Seyravân, haz.). Âlemü'l-Kütüb.

Hallâc-ı Mansûr. (2010). *Kitâbü't-Tavâsîn* (R. es-Sahh, haz.). Dârü'l-Ferkad.

İbnü'l-Arabî. (1985). *el-Fütûhâtü'l-Mekkiyye* (C. 2; O. Yahyâ, haz.; İ. Medkûr, göz. geç.). el-Hey'etü'l-Mısriyye el-Âmme li'l-Kitâb.

İbnü'l-Beşîr, M. el-M. (2016). *Felsefetü İbn Arabî fi'l-ma'rifeti ve'l-vücûd: Dirâse tahlîliyye nakdiyye*. Âlemü'l-Kütübi'l-Hadîs.

Kara, M. (1995). Fenâ. *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi* (C. 12, ss. 333–335). TDV İslâm Araştırmaları Merkezi

Uludağ, S. (2007). Nûr. *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi*. TDV İslâm Araştırmaları Merkezi.

Üzgör, T. (Haz.). (1991). *Fehîm-i Kadîm: Hayatı, sanatı, Dîvân'ı ve metnin bugünkü Türkçesi*. Atatürk Kültür Merkezi Yayını.

Yezdan Penâh. (2016). *el-İrfânü'n-nazarî: Mebâdiuhû ve usûluhû* (Alî Abbâs el-Mûsevî, çev.). Merkezü'l-Hadâre li't-Tenmiyeti'l-Fikri'l-İslâmî.

TÜRKİYE'DE TERSİNE GÖÇ DİNAMİKLERİ VE BÖLGESEL KALKINMAYA ETKİLERİ

Dr. Öğretim Üyesi Filiz ASLAN
Mardin Artuklu Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, Mardin
ORCID ID: 0000-0002-5599-9021

Prof. Dr. Esra SİVEREKLİ
Gaziantep Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Maliye Bölümü, Gaziantep
ORCID ID: 0000-0001-8767-0741

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de tersine göç olgusunu kavramsal ve kuramsal boyutuyla ele alarak Türkiye'de tersine göçü destekleyen politika ve uygulamaların genel perspektifle değerlendirilmesi ve böylece bölgesel kalkınma üzerindeki çok boyutlu etkilerinin bütüncül bir yaklaşımla ortaya konulmasıdır. Bu doğrultuda çalışmada ilk olarak kavramsal ve kuramsal açıdan göç ve tersine göç kavramları, ardından Türkiye'de iç göçün tarihsel gelişimi, mekânsal dağılımı ve Türkiye'de tersine göçü teşvik eden uygulama ve politikalar değerlendirilmiş çalışmanın son bölümünde ise tersine göçün bölgesel kalkınma üzerindeki çok boyutlu etkileri genel olarak ele alınmıştır. Çalışma sonucunda; tersine göç hareketlerinin sadece mekânsal olarak yeniden dağılımdan ibaret olmadığı, bölgesel kalkınma üzerinde çok boyutlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Tersine göç hareketlerinin bölgesel kalkınma üzerinde; beşeri sermayeyi artırması, yerel bilgi ve deneyimi kitleler arası birbirine aktarması, işgücü arzını güçlendirmesi, nüfus hareketleri üzerinde dengeleyici bir etkiye sahip olması, girişimciliği teşvik ederek artırması ve kırsal alanları canlandırması gibi olumlu etkilere sahip olduğu görülmüştür. Ancak bu olumlu etkilerle beraber geri dönüşün gerçekleştiği bölgelerde konut ve arsa fiyatlarının yükselmesi, altyapı yetersizliği, yerel eşitsizliklerin artması, plansız yapılaşma ve istihdam imkânlarının yetersiz kalması gibi bazı riskleri de taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle tersine göç hareketlerinin bölgesel kalkınma üzerindeki katkısını daha olumlu ve gelişmeyi destekleyen bir hale getirebilmek için yalnızca nüfusun geri dönüşü değil istihdam, yatırım, girişimcilik, eğitim, sağlık ve yerel ekonomik kapasite gibi unsurların da dikkate alınarak bir bütün olarak politikaların geliştirilmesi çalışmanın ana eksenini oluşturmuştur.

Anahtar kelimeler: Göç, Tersine Göç, Bölgesel Kalkınma

DYNAMICS OF RETURN MIGRATION IN TURKEY AND ITS IMPACTS ON REGIONAL DEVELOPMENT

ABSTRACT

The aim of this study is to examine the phenomenon of return migration in Turkey from conceptual and theoretical perspectives, to evaluate the policies and practices supporting it, and thereby to reveal its multidimensional impacts on regional development through a holistic approach. Accordingly, the study first addresses the concepts of migration and return migration from conceptual and theoretical standpoints; it then evaluates the historical evolution and spatial distribution of internal migration in Turkey, as well as the policies and practices encouraging return migration; finally, it discusses the multidimensional impacts of return migration on regional development. The study concludes that return migration movements are not merely a matter of spatial redistribution but have a multidimensional impact on regional development. It is observed that return migration yields positive effects such as enhancing human capital, facilitating the transfer of local knowledge and experience, strengthening the

labor supply, balancing population movements, fostering entrepreneurship, and revitalizing rural areas. However, the study also identifies certain risks associated with these movements in the regions of return, including rising housing and land prices, inadequate infrastructure, increased local inequalities, unplanned urbanization, and insufficient employment opportunities. Therefore, the central focus of this study has been the development of holistic policies—considering not only population return but also factors such as employment, investment, entrepreneurship, education, healthcare, and local economic capacity—to ensure that reverse migration movements contribute more positively to regional development and foster growth.

Keywords: Migration, Reverse Migration, Regional Development

1. GİRİŞ

Göç, ekonomik, sosyal, siyasal ve çevresel nedenlerle geçici ve sürekli olarak bireylerin bir yerden başka bir yere ikamet etmesi olarak tanımlanabilmektedir. İnsanlık tarihi boyunca devam eden göç hareketlerinin değişken yapısı bireyleri daha önce göç etmiş oldukları yerleşim alanına geri dönmeleri şeklinde de gerçekleşebilmektedir. Bu geri dönüş literatürde tersine göç, geriye göç, eve dönüş ve geri dönüş göçü şeklinde karşılık bulmaktadır. Tersine göç bireylerin önemli bir süre yurt dışında ya da başka bir bölgede kaldıktan sonra tekrar kendi ülkelerine geri dönmeleri olarak ifade edilebilir. Tersine göç hareketlerinin birçok etkileri bulunan bir süreç olmasının yanı sıra bölgesel kalkınma dinamiklerini ve refah seviyesini şekillendirmede de önemli bir potansiyele sahiptir.

Türkiye'de iç göçün tarihsel gelişimi incelendiğinde, 2008-2024 dönemi boyunca iç göç oranının ortalama %3 bandında dalgalı bir seyir izlediği görülmüştür. Ayrıca Türkiye'de göç alan ve göç veren illerin mekânsal dağılımı ise incelendiğinde İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyük illerin hem en çok göç alan hem de en çok göç veren iller arasında yer aldığı belirlenmiştir. Bu durum kentsel alanlarda itici faktörlerin güçlendiğini ve göç yönünün değiştiğini göstermektedir (TÜİK, İç Göç İstatistikleri, 2024).

Türkiye'de; Genç Çiftçi Projesi, Uzman Eller Projesi, Kırsal Kalkınma Yatırım Programı, Köye Dönüş ve Rehabilitasyon Projesi, İstanbul Tersine Göç Projesi, Konya Ovası Projesi, Köylerin Altyapısının Desteklenmesi Projesi (KÖYDES) ve Türkiye Cumhuriyeti Katılım Öncesi Yardım Aracı Kırsal Kalkınma Programı (IPARD) gibi politika ve uygulamalar kırsal ve az gelişmiş bölgelerin kalkınmasını destekleyerek tersine göçü teşvik etmektedir.

Çalışmanın amacı, Türkiye'de tersine göç olgusunu kuramsal ve kavramsal boyutuyla inceleyerek tersine göçün ortaya çıkışında etkili olan faktörleri ve tersine göçün bölgesel kalkınma üzerindeki çok boyutlu etkilerini değerlendirmektir. Bu kapsamda çalışmada öncelikle kavramsal ve kuramsal açıdan göç ve tersine göç kavramları, ardından tersine göçün nedenleri ve tersine göçü teşvik eden uygulamalar son olarak ise tersine göçün bölgesel kalkınma üzerindeki çok boyutlu etkilerini ana hatlarıyla değerlendirmektir.

2. KAVRAMSAL VE KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Göç Kavramı

Göç, insanlık tarihi boyunca varlığını sürdüren ve kadim bir geçmişe sahip olan toplumsal bir olgudur. Ancak göçün çok boyutlu ve dinamik bir süreç olması; yer, zaman, mekân ile neden–sonuç ilişkileri bakımından farklı şekillerde ortaya çıkması, kavramın kesin ve ortak bir biçimde tanımlanmasını güçleştirmektedir (Özyakışır, 2013, s. 5). Bu nedenle literatürde göçe ilişkin farklı tanımlamalar yapılmıştır. Bu bağlamda göç, geçici veya kalıcı olarak gerçekleştirilen bir ikamet değişikliği olarak tanımlanmaktadır (Lee, 1969, s. 49). International Organization for Migration tarafından yapılan tanıma göre ise göç, bireylerin mutat ikamet yerlerinden ayrılarak ya uluslararası bir sınırı geçmeleri ya da bir devletin sınırları içerisinde başka bir yere hareket etmeleri olarak ifade edilmektedir (IOM, 2019, s.37). Benzer şekilde Akan ve Arslan'a göre göç, bireylerin yaşamlarının bir bölümünü ya da tamamını geçirmek amacıyla bir yerleşim biriminden başka bir yerleşim birimine yaptıkları coğrafi nitelikli yer

değiştirme hareketidir (Akan ve Arslan, 2008, s. 3). Bir diğer göç tanımlaması yapan Kurt'a göre ise göç olgusu, sebebi ne olursa olsun bireylerin bir coğrafyadan başka bir coğrafyaya taşınması ve yeni yaşam koşullarına uyum sağlama sürecini ifade etmektedir (Kurt, 2024, s. 7). Gerçekleştiği coğrafi alana göre göç, iç göç ve dış göç olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İç göç, bir ülkenin kendi sınırları içerisinde belirli bir bölgeden başka bir bölgeye gerçekleşen nüfus hareketi olarak tanımlanırken; dış göç ise bireylerin bir ülkeden başka bir ülkeye gerçekleştirdikleri göç hareketini ifade etmektedir (Sağlam, 2006, s.34). Bu doğrultuda göçün temelinde bir nüfus hareketliliği bulunmasına karşın ekonomik, sosyal, kültürel ve siyasal etkileri bakımından bölgesel ve uluslararası sonuçlar doğuran çok yönlü bir toplumsal olgu niteliği taşımaktadır.

2.2. Tersine Göç Kavramı

İlgili yabancı literatürde geri dönüş göçünü ifade etmek amacıyla *back migration, countercurrent, counterflow, re-emigration, reflux migration, remigration, return flow, return migration, return movement, second-time migration* ve *repatriation* gibi çeşitli kavramlar kullanılmaktadır (Bovenkerk, 1974, s. 4). Türkçe literatürde ise bu kavramlar; tersine göç, geriye göç, eve dönüş ve geri dönüş göçü şeklinde karşılık bulmaktadır (Adıgüzel, 2018, s. 181).

Genel göç literatüründe geri dönüş göçü, göç sürecinin yalnızca tek yönlü bir hareketten ibaret olmadığı ve giderek önem kazanan bir çalışma alanı olduğu değerlendirilmektedir. Göç çalışmalarının büyük bir kısmı, genellikle dış göç ya da iç göç süreçlerine odaklanırken, geri dönüş göçü çalışmaları göçü diyalektik bir süreç olarak ele almakta; hem menşe ülkeyi hem de göç edilen ev sahibi ülkeyi birlikte değerlendirmektedir (Girma, 2017, s.1). Bu yönüyle tersine göç, bireylerin göç öncesi, göç süreci ve geri dönüş sonrası deneyimlerini kapsayan çok boyutlu ve dinamik bir süreç olarak ele alınmaktadır.

Geri dönüş göçü (*return migration*), bireylerin önemli bir süre yurt dışında ya da başka bir bölgede kaldıktan sonra kendi ülkelerine veya köken bölgelerine geri dönmeleri durumudur (King, 1986, s. 4). Dustmann ve Weiss'e göre ise tersine göç, göçmenlerin yurt dışında önemli bir süre geçirdikten sonra kendi istekleriyle menşe ülkelerine geri dönmeleri durumu olarak tanımlanmaktadır (Dustmann ve Weiss, 2007, s. 238).

Tersine göçü, yalnızca fiziksel bir yer değiştirme hareketi olarak değil; aynı zamanda geçmişe, aidiyete ve tanıdık olana yeniden ulaşma çabası olarak değerlendiren Tsuda, geri dönüşü mekânsal, zamansal ve toplumsal olmak üzere üç temel boyutuyla ele almaktadır. Mekânsal boyut, bireyin fiziksel olarak ayrıldığı yere geri dönmesini ifade etmektedir. Ancak geri dönülen yer yalnızca doğulan ev ya da köy anlamına gelmemekte; şehir, bölge, ulus-devlet ya da kültürel anavatan gibi farklı ölçeklerde de değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle geri dönüşün mekânsal anlamı, bireyin göç deneyimine ve aidiyet ilişkilerine göre değişkenlik göstermektedir. Zamansal boyut ise geri dönüşün yalnızca fiziksel bir hareket olmadığını, aynı zamanda geçmişe ve geçmişteki yaşama duyulan özlemi içerdiğini ortaya koymaktadır. Göçmenler çoğu zaman geçmişte bıraktıkları yaşamı, ilişkileri ve toplumsal düzeni yeniden bulmayı umut etmektedir. Ancak zaman içerisinde hem bireyler hem de mekânlar değişime uğradığından, geçmişe tam anlamıyla geri dönüş mümkün olmamaktadır. Bu nedenle geri dönüş deneyimi çoğu zaman nostaljik beklentiler ile gerçeklik arasındaki farklılıklar üzerinden şekillenmektedir. Toplumsal boyut açısından ise bireyin ait hissettiği sosyal çevreye, kültürel ilişkilere ve tanıdık toplumsal yapılara geri dönmesini ifade etmektedir. Bununla birlikte, göç sürecinde hem göçmenin kendisi hem de geride bıraktığı toplum değiştiğinden geri dönülen çevre her zaman beklenildiği kadar tanıdık olmayabilmektedir. Bu durum, geri dönüş yapan bireylerin yabancılaşma, aidiyet sorunu ve uyum güçlüğü yaşamalarına neden olabilmektedir (Tsuda, 2019).

2.3. Göç Teorileri Çerçevesinde Tersine Göç

Tersine göçün altında yatan davranışsal mekanizmalar, farklı göç kuramlarının konuya ilişkin birbirinden ayrışan açıklamaları nedeniyle, daha ayrıntılı incelemelere ihtiyaç duyan önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda aşağıda tersine göç kapsamında göç teorileri ele alınmıştır.

Neoklasik Göç Teorisi; göçü bireylerin faydalarını maksimum seviyeye çıkarmak amacıyla daha yüksek üretkenlik ve gelir elde edebilecekleri bölgelere yönelmeleri ya da beşerî sermaye yatırımlarından en yüksek getiriyi sağlayacakları yerlere hareket etmeleri şeklinde açıklamaktadır. Bu yaklaşımda, bireylerin göç etmeden önce göç edecekleri ülke hakkında tam ve rasyonel bilgiye sahip oldukları varsayılmaktadır. Ancak bu varsayım geri dönüş göçünü açıklamada kısmen yetersiz kalmaktadır. Çünkü beklentilerin karşılandığı durumda göçmenlerin hedef topluma başarılı şekilde uyum sağlayacakları ve geri dönmeleri için bir neden olmayacağı kabul edilmektedir. Ancak beklentilerin karşılanmadığı, örneğin iş bulamama veya yaşam standartlarını yükseltememe gibi durumlarda geri dönüş olasılığının arttığı savunulmaktadır. Dolayısıyla neoklasik yaklaşım, geri dönüş göçünü çoğunlukla göçmenlerin toplumda ekonomik ve sosyal olarak tutunamamalarının bir sonucu olarak görmektedir. Bu doğrultuda kazananların kaldığını, kaybedenlerin ise geri döndüğünü öne sürmektedir (Haas & Fokkema, 2014, s. 416).

Neoklasik göç teorisi, göçü varış ülkesine uyum sağlayamamanın bir sonucu olarak öne sürerken; *Yeni Ekonomi Teorisi*; tersine göçü göçmenlerin belirli bir süre zarfında yeterli düzeyde finansal sermaye ve beşerî sermaye birikimi sağlayarak bunları menşe ülkelerinde yatırıma dönüştürmelerinin rasyonel bir aşaması olarak öne sürmektedir. Bu bağlamda, planlanan geri dönüş süreci, göçmenin ev sahibi toplumla bütünleşme sürecinde yaşadığı olası başarısızlıklar nedeniyle ertelenebilmekte, hatta süresiz hale gelebilmektedir. Dolayısıyla geri dönüş göçü, entegrasyon başarısızlığının bir göstergesi veya sonucu olmaktan ziyade, göç sürecinin hedef odaklı ve stratejik niteliği içerisinde başarıyı temsil eden bir gösterge olarak ele alınmaktadır (Kunuroğlu, Vijver ve Yagmur, 2016, s.4).

Yapısalcı Teori, geri dönüşü yalnızca göçmenin bireysel deneyimleri üzerinden değil aynı zamanda menşe ülkedeki sosyal ve kurumsal faktörleri dikkate alarak açıklamaktadır. Yeni ekonomisi teorisinde olduğu gibi, tersine göçe yönelik yapısal yaklaşım da geri dönüş kararında ve göçmenin yeniden entegrasyon sürecinde menşe ülkeye getirilen finansal ve ekonomik kaynakların önemini vurgulamaktadır. Bu yaklaşımda geri dönenlerin başarı ya da başarısızlığı, kendi ülkelerindeki ekonomik ve toplumsal gerçeklik ile geri dönen bireyin beklentileri arasındaki ilişki üzerinden değerlendirilmektedir. Bu kapsamda Cerase, geri dönen göçmenleri beklenti, ihtiyaç ve amaçlarına göre dört farklı tipe ayırmaktadır. Bunlardan ilki, gittikleri ülkelerde toplumsal uyum sağlayamayan göçmenleri ifade eden "başarısızlık dönüşü"dür. İkincisi, göç öncesindeki toplumsal değerlerini koruyan ve ekonomik hedeflerini gerçekleştirdikten sonra geri dönmeyi planlayan bireyleri kapsayan "muhafazakâr dönüş"tür. Üçüncüsü, emekli olduktan sonra ülkelerine dönerek yaşlılıklarını geçirmek amacıyla ev ve toprak edinmek isteyen göçmenleri ifade eden "emeklilik dönüşü"dür. Son olarak ise göç deneyimi sırasında edinilen beceri, bilgi ve kaynakları menşe ülkede kullanarak hedeflerine ulaşmayı amaçlayan bireyleri kapsayan "yenilikçi dönüş"tür (Cassarino, 2004, s. 257-258).

Transnasyonalizm Yaklaşımı; göç olgusunu yalnızca tek bir ulusal bağlam içinde gerçekleşen doğrusal bir yer değiştirme süreci olarak değil, göçmenlerin eşzamanlı biçimde hem menşe hem de varış toplumlarını kapsayan çok katmanlı sosyal alanlar içinde yaşamlarını sürdürdükleri bir yapı olarak ele almaktadır. Bu perspektife göre göçmenler, ailevi, ekonomik, sosyal, örgütsel, dini ve siyasi boyutları içeren çoklu ilişkiler aracılığıyla ulusal sınırları aşan ağlar kurmakta ve bu ağları sürekli olarak yeniden üretmektedir. Böylece göç ya da geri dönüş olgusu, kesin bir kopuş ya da nihai bir varış noktası olarak değil, süreklilik arz eden sınır-aşırı ilişkiler bütününün bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Geri dönüş göçü kararlarını etkileyen faktörleri inceleyen çalışmalara bakıldığında, transnasyonalizm yaklaşımında göçmenlerin davranışlarının doğrudan onların etnik topluluğa olan "aidiyetlerinin" bir sonucu olarak değerlendirildiği görülmektedir (Schıller, Basch and Blanc-Szanton 1992).

Sosyal Ağlar Teorisi, geri dönüş yapan göçmenleri, daha önce yerleştikleri ülkelerdeki eski yaşam alanlarıyla güçlü bağlarını sürdüren aktörler olarak ele almaktadır. Önceden aile tarafından sağlanan sosyal ve finansal kaynaklar, geri dönen göçmenlerin uyum ve girişim süreçleri üzerinde belirleyici olduğunu belirtmektedir. Dolayısıyla sosyal sermaye ile geri dönen göçmenlerin sınır-aşırı ağlara katılım potansiyeli, birbirini tamamlayan ve karşılıklı olarak şekillendiren unsurlar olarak değerlendirilmekte ve aynı zamanda göçmenlerin içinde yer aldıkları ağların niteliği ve işleyişine odaklanmaktadır. Bu bağlamda sınır-aşırı sosyal ve ekonomik ağların, örgütlenme biçimleri, amaçları ve yapısal özellikleri bakımından transnasyonel ilişkilerden ayrıştığı görülmektedir (Cassarino, 2015).

Tablo 1: Tersine Göç Teorileri

Göç teorileri	Neoklasik ekonomi	Yeni Ekonomi Yaklaşımı	Yapısalcı Yaklaşım	Transnasyonalizm	Sosyal Ağlar
Tersine dönüşün nedeni	Geri dönüş, göç deneyiminin başarısızlığı olarak görülür.	Geri dönüş, göç projesinin doğal ve planlı bir parçasıdır; yeterli tasarruf ve hedeflere ulaştığında geri döner.	Köken ülkedeki sosyal ve ekonomik yapılar geri dönüşü belirler.	Göçmen hem köken hem varış ülkesine bağlıdır; geri dönüş tek yönlü değildir.	Geri dönüş, sınır aşan sosyal ağlar sayesinde sürdürülür.
Geri dönen kişi	Yurtdışında başarısız olmuş kişi olarak değerlendirilir.	Ekonomik hedeflerine ulaşmış, yatırım yapmaya hazır bireydir.	Köken toplumdaki sosyal ve kültürel yapılarla yeniden karşılaşır.	Birden fazla topluma aynı anda bağlıdır.	Göç ağları ve ilişkiler içinde hareket eden aktördür.
Finansal sermaye	Yurtdışında elde edilen gelir geri getirilir.	Tasarruflar yatırım ve kalkınma için kullanılır.	Finansal kaynakların etkisi toplumsal yapıya bağlıdır.	Göçmen, kaynakları sınır aşan faaliyetler kullanır	Sosyal ağlar ekonomik kaynaklara erişimi kolaylaştırır.
Beşeri sermaye	Yurt dışında edinilen beceriler her zaman değerlendirilemeyebilir.	Edinilen beceriler dönüş sonrası ekonomik başarı sağlayabilir.	Beceri kullanımı yerel ve toplumsal koşullara bağlıdır.	Bilgi farklı ülkeler arasında dolaşır.	Sosyal ağlar bilgi ve deneyim aktarımını destekler.

Kaynak: (Cassarino, 2015, s.269).

2.4. Bölgesel Kalkınma Kavramı ve Boyutları

Bölgesel kalkınma kavramı, "bölgelerin, çevre bölgeler ve dünya ile karşılıklı etkileşimi ile oluşan bölgeyi dikkate alan katılımcılık ve sürdürülebilirliği temel ilke edinen ve insan kaynağının geliştirilmesi, ekonomik ve toplumsal potansiyellerin daha etkin kullanılması yoluyla bölge refahının yükseltilmesini amaçlayan çalışmaların bütünü" olarak tanımlanabilmektedir (Akbaş, 2015). Başka bir ifadeyle bölgesel kalkınma, ülkenin çeşitli bölgelerinde ekonomik ve sosyal yapının iyileştirilerek kaynakların etkin dağılımına, ekonomik ve sosyal bütünleşmenin sağlanmasına ve bölgeler arasında refah seviyesinin artmasına imkan sağlayan çok boyutlu bir süreç olarak tanımlanabilir (Tekin, 2011).

Bölgesel kalkınma yaklaşımında her bölgenin farklı bir ekonomik yapısı, beşeri sermayesi, doğal kaynakları, coğrafi konumu, kurumsal kapasitesi ve kalkınma potansiyeli olduğundan her bölgeye özgü bölgesel politikaların uygulaması önem taşımaktadır. Bölgesel politikalarda, tek tip politikaların uygulanması başarısızlık ile sonuçlanma ihtimali yüksek olduğundan bölgelerin ihtiyaçları doğrultusunda politikaların belirlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bölgesel kalkınma sadece ekonomik büyüme ve rekabet gücüne değil, aynı zamanda bireylerin refahına, kapsayıcılığına ve çevresel sürdürülebilirliğine de bağlıdır (OECD, 2019, s.24).

Bölgesel eşitsizlikleri gidermeye yönelik politika çabalarına rehberlik etmek, geri kalmış/durgun bölgelerde kalkınmayı teşvik etmek ve refahı sürdürmek amacıyla, aşağıda yer alan beş önceliğe odaklanan bir politika yol haritası sunulmaktadır (OECD, 2023, s.126-127).

1- Tüm bölgelerde kaliteli kamu hizmetlerine ve altyapıya eşit erişimin sağlanması,

2- Verimliliğin ve rekabet gücünün artırılması,

3- Bölgesel işgücü piyasalarında doğru becerilerin ve kaliteli iş fırsatlarının sağlanması,

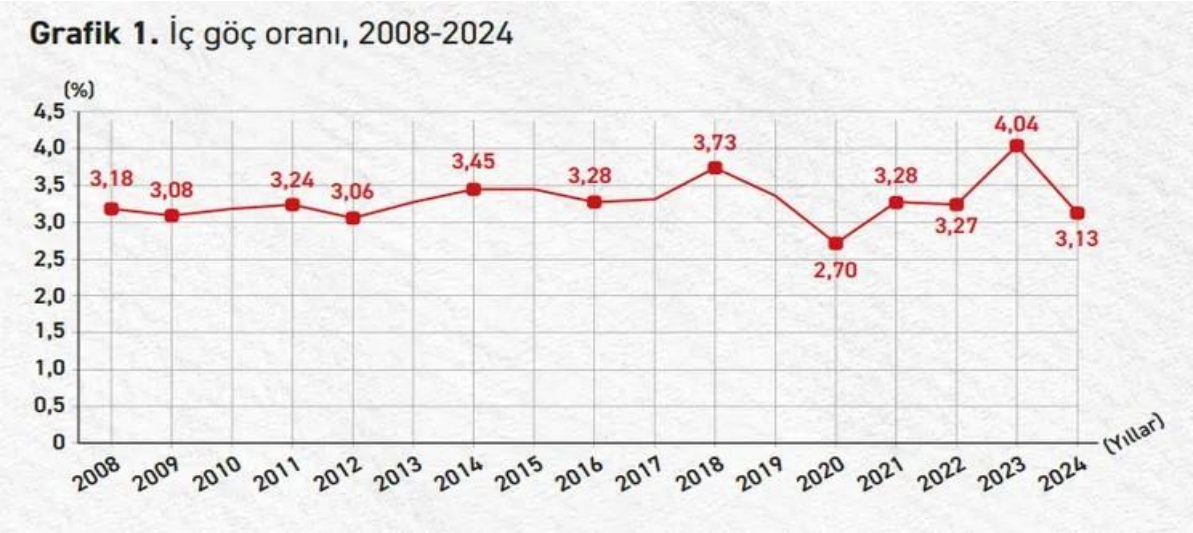
4- Çok düzeyli yönetim sistemlerinin kalitesinin iyileştirilmesi,

5- Ulusal ve alt ulusal düzeylerde kapasitenin güçlendirilmesi,

Bölgesel kalkınma; ekonomik, sosyal, çevresel, mekânsal ve kurumsal boyutları bulunun bir olgudur. Bu çok boyutlu yapı, göç hareketlerinin bölgesel kalkınma üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından da önem taşımaktadır. Nitekim iç göç ve tersine göç, yalnızca nüfusun mekânsal dağılımını değiştiren demografik süreçler değil; aynı zamanda işgücü arzı, beşerî sermaye, girişimcilik, yatırım, yerel ekonomik faaliyetler, kamu hizmetlerine olan talep ve sosyal bütünleşme üzerinde etkiler yaratan bölgesel dönüşüm unsurlarıdır. Bu nedenle göçün bölgesel kalkınmaya etkisinin değerlendirilmesinde ekonomik göstergelerin yanı sıra sosyal, çevresel, mekânsal ve kurumsal etkilerin de dikkate alınması gerekmektedir.

3. TÜRKİYE'DE İÇ GÖÇÜN TARİHSEL GELİŞİMİ

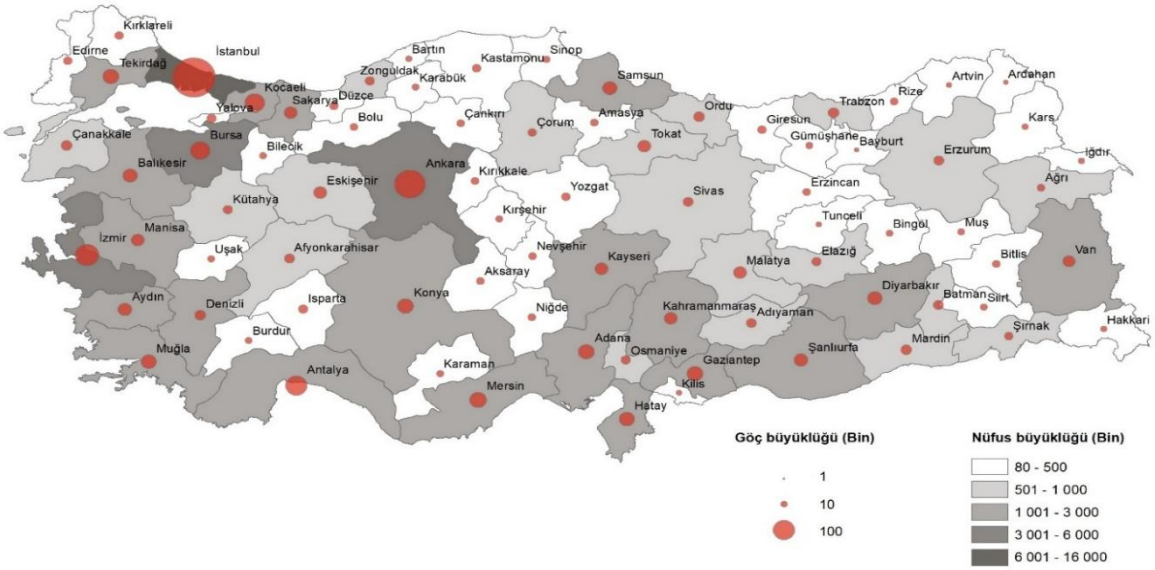
İç göç hareketleri, bir ülkenin demografik yapısını, yerleşim düzenini ve sosyoekonomik gelişimini şekillendiren temel dinamiklerden birini oluşturmaktadır. Bu kapsamda, Türkiye'de iç göçün tarihsel gelişiminin daha iyi anlaşılabilmesi için göç hareketlerinin zaman içerisindeki seyri, kır ve kent nüfus oranlarındaki değişim ve en çok göç alan iller ile en çok göç veren illerin ele alınmıştır.



Kaynak: Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) – İç Göç İstatistikleri, 2024https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/54082

Grafik 1'de Türkiye'nin 2008-2024 dönemi için iç göç oranlarının değişimi yer almaktadır. Grafikte iç göç oranlarının gelişimine bakıldığında dönem boyunca genellikle dalgalı bir seyir izlediği ve oranın ortalama % 3 olduğu görülmektedir. 2008 yılında %3,18 olan iç göç oranı 2018 yılında %3,73'e yükseldiği, 2020 yılında ise %2,70 ile en düşük seviyeye ulaştığı ortaya konulmaktadır. 2020 yılında gözlemlenen bu düşüşün nedeni COVID-19 pandemisinin yol açtığı hareketlilik kısıtlamaları, ekonomik belirsizlikler ve hanehalklarının yer değiştirme kararlarını ertelemesiyle açıklanabilir. Pandemi sonrası ise iç göç hareketlerinin yeniden canlandığı görülmektedir. 2021 ve 2022 yıllarında iç göç oranı yeniden %3'ün üzerine çıkmış, 2023 yılında ise % 4,04 ile dönem içerisindeki en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu yükseliş, pandemi sonrasında ertelenen göç kararlarının hayata geçirilmesi, ekonomik koşullardaki değişimler ve özellikle 2023 yılında yaşanan Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında ortaya çıkan zorunlu nüfus hareketleri ile ilişkilendirilebilir.

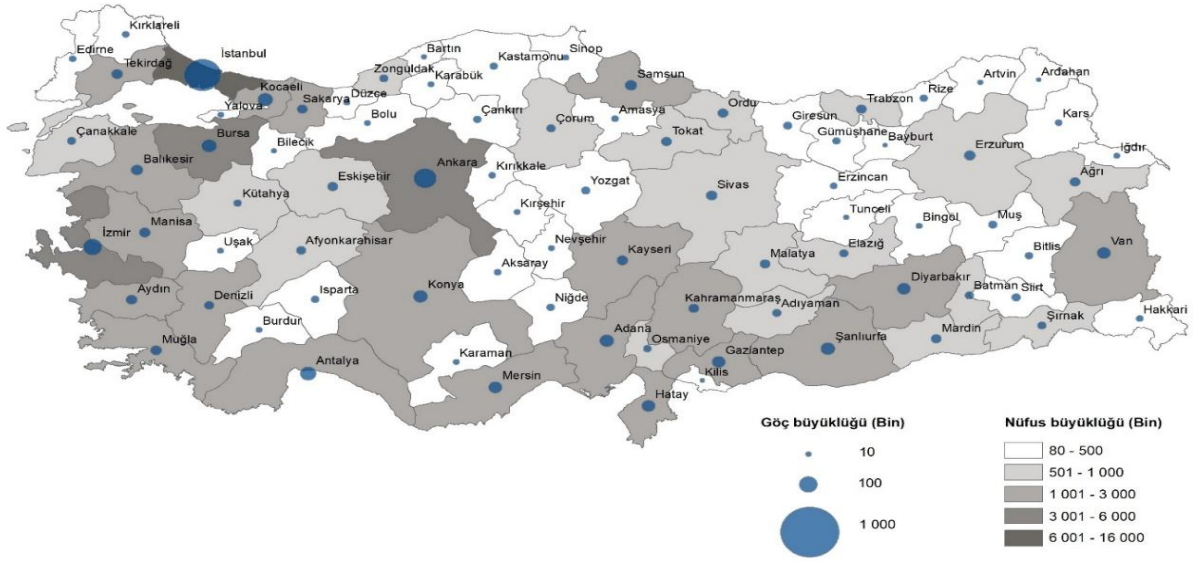
Şekil 1: İllerin Aldığı Göçün Büyüklüğü



Kaynak: TÜİK, İç Göç İstatistikleri, 2024, https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/54082

2025 yılında yayınlanan TÜİK verilerine göre 2024 yılında Türkiye'de göç alan illerin mekânsal dağılımına bakıldığında İstanbul hem nüfus büyüklüğü bakımından hem de aldığı göç miktarı bakımından en yüksek seviyede göç alan il konumunda olduğu görülmektedir. İstanbul'dan sonra göç alan iller arasında sırasıyla **Ankara, İzmir, Bursa, Kocaeli, Antalya ve Tekirdağ** gibi sanayi, hizmet ve turizm sektörlerinin gelişmiş olduğu iller gelmektedir. Bu illerin yüksek oranda göç çekmesi, iş olanaklarının çeşitliliği ve yaşam standartlarının görece yüksek olmasıyla ilişkilendirilebilir.

Şekil 2: İllerin Verdiği Göçün Büyüklüğü



Kaynak: TÜİK, İç Göç İstatistikleri, 2024, https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/54082

2025 yılında yayınlanan TUİK verilerine göre 2024 yılında Türkiye'de göç veren illerin mekânsal dağılımına bakıldığında ise özellikle İstanbul'un hem en fazla göç alan hem de en fazla göç veren il olması, kentin artık yalnızca bir çekim merkezi olmadığını, aynı zamanda önemli bir nüfus çıkış noktası hâline geldiğini göstermektedir. İstanbul'dan sonra **Ankara, İzmir, Bursa, Kocaeli, Antalya ve**

Tekirdağ gibi nüfus ve ekonomik faaliyetlerin yoğun olduğu illerin yüksek düzeyde göç verdiği görülmektedir.

Şekil 1 ve Şekil 2'de Türkiye'de göç veren ve göç alan illerin mekânsal dağılımına bakıldığında İstanbul, Ankara ve İzmir gibi Türkiye'nin geleneksel göç çekim merkezlerinin aynı zamanda en fazla göç veren iller arasında da yer aldığı görülmektedir. Klasik iç göç sürecinde bu kentler kırsal alanlardan ve küçük şehirlerden sürekli nüfus çekerken, son yıllarda söz konusu metropollerin yüksek yaşam maliyetleri, trafik yoğunluğu, çevresel sorunlar ve konut fiyatlarındaki artış nedeniyle nüfusun bir kısmını çevre illere ve daha küçük yerleşim merkezlerine yönlendirdiği anlaşılmaktadır. Bu durum tersine göç eğilimlerinin önemli göstergelerinden biridir.

4. TÜRKİYE'DE TERSİNE GÖÇÜN DİNAMİKLERİ VE NEDENLERİ

Türkiye'de son yıllarda dikkat çeken demografik hareketlerden biri olan tersine göçün ortaya çıkmasında etkili olan faktörler literatürde farklı şekillerde sınıflandırılmakla birlikte, bu çalışmada kentlerden bireyleri uzaklaştıran itici faktörler ile kırsal alanların cazibesini artıran çekici faktörler çerçevesinde değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, tersine göçün nedenlerinin daha sistematik, anlaşılır ve bütüncül bir biçimde incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Kentler, kırsal alanlara göre daha geniş ekonomik olanaklara sahip olması ve iş imkanları sağlaması nedeniyle göç hareketlerinde önemli çekim merkezleri olarak öne çıkmaktadır. Kentlerde finansal faaliyetlerin, ticari işlemlerin, üretim süreçlerinin, sanayi kuruluşlarının, ulaşım ağlarının ve kamu ile özel sektör yönetim birimlerinin büyük ölçüde kentlerde yoğunlaşması, bu yerleşim alanlarının ekonomik açıdan cazibesini artırmaktadır. Ayrıca kentlerde altyapı hizmetlerinin gelişmiş olması, eğitim ve sağlık hizmetlerine erişimin daha kolay olması ile sosyal ve kültürel imkânların çeşitliliği de bireylerin kentleri tercih etmesinde etkili rol oynamaktadır. Dolayısıyla kentler, hem ekonomik fırsatlar hem de yaşam kalitesini artıran hizmet ve olanaklar bakımından göç süreçlerinde önemli bir çekim merkezi niteliği taşımaktadır (Çeliktaş, 2025, s.346).

Kırsal yerleşim yerlerinden göçü teşvik eden itici unsurların başında ise ekonomik, sosyal ve altyapı imkanlarının yetersiz olması gelmektedir. Kırsal alanlarda tarımsal üretim kaynaklarının sınırlı olması, işsizliğin fazla olması ve artan nüfus karşısında mevcut tarım arazilerinin yetersiz kalması, kırsal bölgelerde geçim kaynaklarının sürdürülebilirliğini zorlaştırmıştır. Ayrıca konut ve altyapı eksiklikleri ile eğitim, sağlık ve ulaşım hizmetlerinin kentlere kıyasla daha sınırlı düzeyde sunulması, sosyal ve kültürel imkânların kısıtlı olması, ticari faaliyetlerin düşük düzeyde seyretmesi, yatırım ve girişimcilik için elverişli ortamların bulunmaması faktörleri kırsal alanların çekiciliğini azaltmaktadır (Çeliktaş, 2025, s.347).

Ancak son yıllarda kentlerin ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan sunduğu avantajların göreli olarak azalmasıyla birlikte, uzun yıllar boyunca baskın olan köyden kente göç eğiliminin yerini giderek artan ölçüde kentten köye göç hareketleri almaya başlamıştır. Literatürde "tersine göç" olarak da ifade edilen bu süreç, hem küresel hem de yerel ölçekte ortaya çıkan çeşitli dinamiklerin etkisi altında şekillenmektedir. Bu kapsamda, özellikle 2019 yılında ortaya çıkan COVID-19 pandemisi kentten kırsala yönelen göç hareketlerini hızlandıran önemli gelişmelerden biri olmuştur. Pandemi sürecinde yoğun nüfuslu kentlerin sağlık açısından taşıdığı risklerin daha görünür hâle gelmesi, bireylerin daha güvenli, sağlıklı ve düşük nüfus yoğunluğuna sahip yaşam alanlarına yönelmesine neden olmuştur. Bunun yanı sıra hava kirliliği, su kaynaklarının azalması, aşırı sıcaklıklar ve iklim değişikliğinin yol açtığı çevresel sorunlar, kırsal alanlara göçü teşvik etmiştir. Çevresel faktörlerin yanı sıra, doğal afetlerin oluşturduğu riskler de kentten köye göç kararlarında etkili olmaktadır. Özellikle deprem, sel ve benzeri afetlerin büyük kentlerde yol açtığı can ve mal kayıpları, bireylerin daha güvenli olarak değerlendirdikleri kırsal yerleşim alanlarına yönelmelerine zemin hazırlamamıştır. Bu faktörlere ek olarak kentlerde giderek artan kira ve konut maliyetleri ekonomik açıdan önemli bir itici unsur hâline gelerek, özellikle orta ve düşük gelir gruplarının yaşam maliyetlerini azaltma amacıyla kırsal bölgelere yönelmelerini teşvik etmiştir (Demircan Yıldırım, 2025, s. 824).

Kırsal alanların cazibesini artıran bir diğer unsur tarım ve kırsal kalkınmaya yönelik kamu destekleridir. Doğrudan gelir desteği, mazot desteği, gübre desteği, fark ödemesi destekleri, hayvancılık destekleri, kırsal kalkınma destekleri, telafi edici ödemeler ve araştırma-geliştirme destekleri bu uygulamalara örnek olarak gösterilebilir. Bu desteklerin, özellikle kırsal bölgelerde yaşayan ve temel geçim kaynağı tarımsal faaliyetler olan hanelerin gelir düzeylerini artırarak yaşam koşullarını iyileştirdiği ve böylece kırsal alanların çekiciliğini güçlendirdiği ifade edilmektedir (Güreşçi, 2010, s. 82). Kentten köye göçü etkileyen faktörler yalnızca ekonomik ve çevresel unsurlarla sınırlı değildir. Sosyo-kültürel ve demografik gelişmeler de bu süreçte önemli bir rol oynamaktadır. Kentlerde nüfus yoğunluğunun artması, trafik sorunları, çevre kirliliği, konut yetersizliği ve kültürel uyum problemleri gibi unsurlar, bireylerin yaşam kalitesine ilişkin beklentilerini olumsuz etkileyebilmekte ve kırsal alanları alternatif yaşam mekânları olarak öne çıkarabilmektedir.

Tablo 2. Köyden Kente ve Kentten Köye Göçlerin Sebep-Sonuç İlişkisi

Göç şekli	Neden	Süreç	Sonuç
Köyden kente göç	Köylerdeki itici faktörler ve sanayileşme süreci	Kentlerdeki sosyo-ekonomik canlanmalar ve itici faktörler	Çarpık kentleşme ve beraberinde getirdiği sorunlar
Kentten köye göç	Köyden kente yoğun ve kontrolsüz göçler	Çarpık kentleşme	Kentlerin köyleşmesi

Kaynak: Güreşçi, 2010, s. 81)

Köyden kente ve kentten köye göç hareketlerinin neden–süreç–sonuç ilişkisi çerçevesinde ele alındığı Tablo 2'de **köyden kente göçün temel nedenleri** köylerdeki itici faktörler ile sanayileşme sürecinin yarattığı ekonomik fırsatlar gelmektedir. Kırsal yerleşim alanlarında istihdam imkânlarının yetersiz olması, eğitim, sağlık ve altyapı gibi hizmetlere erişmede sorunlar yaşanması bireyleri kentlere yönlendirirken, kentsel alanlarda sanayi ve hizmet sektörlerinin gelişmesi göçü teşvik eden çekici unsurlar olmuştur. Bu durum kentsel alanlarda nüfusun hızla artmasına ve ekonomik faaliyetlerin canlanmasına katkı sağlamakla birlikte, plansız ve kontrolsüz nüfus artışı sonucunda **çarpık kentleşme**, altyapı yetersizlikleri, konut sorunları ve çevresel problemler gibi çeşitli olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir.

Öte yandan, **kentten köye doğru gerçekleşen göçün nedenine bakıldığında ise,** yoğun ve denetimsiz bir şekilde köyden kente göç hareketlerinin yarattığı sorunlar etkili olmaktadır. Kentlerde nüfus yoğunluğunun artması, yaşam maliyetlerinin yükselmesi, çevresel sorunların çoğalması ve yaşam kalitesinin düşmesi gibi etkenler bireylerin kırsal alanlara yönelmesine zemin hazırlamaktadır. Tablo 2'ye göre bu süreç, çarpık kentleşmenin bir sonucu olarak gelişmekte ve nihayetinde **kentlerin köyleşmesi** olarak ifade edilen bir dönüşüme yol açmaktadır.

5. TÜRKİYE'DE TERSİNE GÖÇÜ TEŞVİK EDEN UYGULAMALAR:PROJE ÖRNEKLERİ

5.1. Genç Çiftçi Projesi

Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından yürütülen ve 26.02.2016 tarihli Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Genç Çiftçi Projesi kapsamında, tarım ve hayvancılık alanında faaliyet gösteren 18-40 yaş aralığındaki gençlere yönelik 2016 yılında bir hibe destek programı başlatılmıştır. Bu projenin temel amacı, genç çiftçileri hayvansal üretim, bitkisel üretim ile yöresel ürünlerin üretilmesi ve pazarlanması konularında desteklemektir. Üç yıl boyunca uygulanan proje kapsamında, gençlerin kırsal alanlarda istihdam edilmesi ve üretime katılımlarının artırılması hedeflenmiştir. Proje ile genç çiftçilerin kırsaldan kente göçünün önlenmesi, girişimcilik faaliyetlerinin desteklenmesi, iş gücü kapasitesinin değerlendirilmesi, gelir düzeylerinin yükseltilmesi, alternatif gelir kaynaklarının oluşturulması, tarımsal üretimin teşvik edilmesi ve tarımsal sürdürülebilirliğe katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda verilen destekler sayesinde köylerine dönerek tarım ve hayvancılık faaliyetlerine başlayan gençlerin sayısında artış sağlanmış ve kırsal kalkınmanın güçlendirilmesine katkıda bulunulmuştur.

5.2. Uzman Eller Projesi

2 Haziran 2021 tarihli ve 31499 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren uzman eller projesi; kırsal alanda tarım, hayvancılık, ormancılık, gıda ve su ürünleri eğitimi veren meslek yüksekokullarından veya üniversitelerin bu bölümlerinden mezun gençlere sağlanan bir hibe programıdır. Bu proje tarım, hayvancılık, ormancılık, gıda ve su ürünleri sektörlerinde girişimciliğin desteklenmesi, bu faaliyetlerin uzman kişiler tarafından yapılmasının teşvik edilmesi, eğitimli iş gücüyle tarımsal üretimin miktar, kalite ve verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda proje 2022-2024 yılları arasında kırsal alanda yaşayan ve yaşamayı taahhüt eden, ilgili bölümlerden mezun olanların mahalinde uygulanmıştır. Bu proje ile üniversite mezunu gençlerin kırsal alanlarda girişimci olarak faaliyet göstermeleri teşvik edilerek eğitimli iş gücünün kırsal alanlara yönelmesini sağlamıştır.

5.3. Kırsal Kalkınma Yatırım Programı

Kırsal kalkınma yatırım programı; mikro, küçük ve orta ölçekli işletmelerin desteklenmesi ile kırsal alanda alternatif gelir kaynaklarının oluşturulması, kırsal ekonomik altyapının güçlendirilmesi, tarımsal faaliyetler için geliştirilen yeni teknolojilerin üreticiler tarafından kullanımının yaygınlaştırılması, veri temelli üretim ve akıllı tarım uygulamalarının desteklenmesi, yürütülmekte olan kırsal kalkınma çalışmalarının etkinliklerinin artırılması ve yeni teknoloji içeren kırsal kalkınma yatırımlarının desteklenmesi amacıyla uygulanmıştır (Tarım ve Orman Bakanlığı, https://kirsalkalkinma.tarimorman.gov.tr/destekler/kirsal-kalkinma-yatirim-programi). Bu program ile sağlanan yatırım destekleri, kırsal alanlarda gelir ve istihdam olanaklarını artırmış, böylece kırsal bölgelerin çekiciliğinin artmasına ve tersine göçün teşvik edilmesine katkı sağlamıştır.

5.4.Türkiye Cumhuriyeti Katılım Öncesi Yardım Aracı Kırsal Kalkınma Programı (IPARD)

IPARD III Programı (2021-2027), Türkiye'nin kırsal alanlarında tarım, hayvancılık, gıda işleme, kırsal altyapı, yenilenebilir enerji ve kırsal girişimciliği desteklemek amacıyla Avrupa Birliği ve Türkiye tarafından finanse edilen bir kırsal kalkınma programıdır. Programın temel hedefleri; tarımsal işletmelerin rekabet gücünü artırmak, kırsal ekonomiyi çeşitlendirmek, istihdam yaratmak, yaşam kalitesini yükseltmek ve kırsal alanların sürdürülebilir kalkınmasını sağlamaktır. IPARD III Programı, doğrudan ters göçü hedefleyen bir politika olmamakla birlikte, kırsal alanlarda gelir ve istihdam olanaklarını artırarak, tarımsal ve tarım dışı ekonomik faaliyetleri destekleyerek ve yaşam kalitesini iyileştirerek ters göçü teşvik eden önemli bir kırsal kalkınma aracıdır. Programın özellikle genç girişimcileri ve kırsal yatırımcıları desteklemesi, kentlerden kırsal alanlara dönüş eğilimlerinin güçlenmesine katkı sağlayabilecek niteliktedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, https://ipard.tarimorman.gov.tr/Prog).

5.5. Köylerin Altyapısının Desteklenmesi Projesi (KÖYDES)

26. 05. 2005 tarihli ve 5355 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Mahalli idare birlikleri kanunu ile güçlendirilen KÖYDES, faaliyetlerinin yürütülmesi için önemli bir yasal zemin kazanmıştır. KÖYDES Proje ödenekleri, kanunda geçen Köylere Hizmet Götürme Birlikleri vasıtasıyla kullanılmaktadır. KÖYDES ile amaçlanan, çeşitli nedenlerle temel altyapı hizmetlerinden yoksun kalmış köylerin bu hizmetlere kavuşturulması ve böylece kırsal altyapının iyileştirilmesidir. Proje kapsamında içme suyu, kanalizasyon, yol ve sulama altyapısı gibi alanlara odaklanılmakta, bu konularda teknik standartların altında kalan köylere destek sağlanmaktadır. KÖYDES ödeneklerinin dağıtımında ise geri kalmış ve temel hizmetlerden yoksun olup bu sorunları çözmek için projeler üreten köylere öncelik verilmektedir (Şengül ve İstikbal, 2016, s.61). Bu proje, kırsal yaşam koşullarının iyileştirilmesine katkı sağlayarak geri dönüş kararlarını destekleyen unsurlardan biri olmuştur.

5.6. İstanbul Tersine Göç Projesi

İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul'da yaşayan ancak çeşitli sebeplerle artık İstanbul'da geçimini sağlayamayan, memleketine göç etmek isteyen fakat maddi imkânı bulunmayan ve herhangi bir sosyal güvencesi olmayan vatandaşlara, belediyenin Zabıta Daire Başkanlığı Yoksul Sevk Bürosu ile destek vermiştir. Yoksul Sevk Zabıta Amirliği yetkilileri; ekonomik gücü olmadığı için memleketine dönemeyen vatandaşların biletli yolcu ve eşyalı nakil taleplerini yerinde değerlendirerek, kriterlere uygun aileleri eşyaları ile birlikte memleketlerine göndermiştir (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, *Zabıta*

Daire Başkanlığı 2017 Yılı Birim Faaliyet Raporu s. 27). Bu kapsamda İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne (İBB) bağlı Yoksul Sevk Zabıta Amirliği'nin verilerine göre, 2007-2015 yılları arasında ekonomik gerekçelerle İstanbul'u terk edenlerin sayısı 56176 kişi olarak belirlenmiştir.

5.7. Konya Ovası Projesi

Türkiye'nin önemli bölgesel kalkınma ve sulama projelerinden biri olan Konya Ovası Projesi, Konya, Karaman, Aksaray, Niğde, Nevşehir, Kırşehir, Kırıkkale ve Yozgat illerini kapsamaktadır. Projenin temel amacı, su yetersizliği yaşayan Konya Kapalı Havzası'nın su kaynaklarını artırmak, tarımsal üretimi geliştirmek ve bölgenin ekonomik kalkınmasını desteklemektir. Büyüklüğü bakımından genellikle Güneydoğu Anadolu Projesi'nden (GAP) sonra Türkiye'nin en büyük sulama ve kalkınma projesi olarak değerlendirilen Konya Ovası Projesi (Konya Ovası Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı, 2026), sulama yatırımları, tarımsal verimliliğin artırılması ve kırsal kalkınma uygulamalarıyla bölgedeki istihdam ve gelir olanaklarının geliştirmiştir. Bu durum kırsal alanların çekiciliğini artırmış ve projenin tersine göçü destekleyen önemli bir yapısal politika aracı olarak değerlendirilmesine zemin hazırlamıştır.

5.8. Köye Dönüş ve Rehabilitasyon Projesi

Köye Dönüş ve Rehabilitasyon Projesi; Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde, terör ve güvenlik kaygılarıyla yaşadıkları yerlerden göç etmek zorunda kalan vatandaşlarımızdan gönüllü olarak geri dönmek isteyenlerin geri dönüşlerinin kolaylaştırılması, geri dönülen yerlerde gerekli sosyal ve ekonomik alt yapının tesisi ile sürdürülebilir yaşam koşullarının oluşturulması, geri dönmek istemeyenlerin ise mevcut yaşadıkları yerlerde şehir hayatına uyumlarının geliştirilmesi, ekonomik ve sosyal durumlarının iyileştirilmesini amaçlayan bir projedir. Proje, merkezi düzeyde İçişleri Bakanlığı'nın, yerel düzeyde ise Valiliklerin koordinasyonunda Başbakanlığın ve Bakanlığımızın ilgili Genelgeleri ve Bakanlar Kurulu'nun 17.08.2005 tarihli Prensip Kararında belirtilen ilke ve esaslar doğrultusunda yürütülmektedir. KDRP, Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerimizde bulunan 14 ilimizi (Adıyaman, Ağrı, Batman, Bingöl, Bitlis, Diyarbakır, Elazığ, Hakkari, Mardin, Muş, Siirt, Şırnak, Tunceli ve Van) kapsamaktadır. Proje uygulamaları kapsamında 28.384 haneden, 187.861 kişinin eskiden yaşadığı köylerine geri dönüşleri sağlanmıştır (İç İşleri bakanlığı, 2026, https://www.icisleri.gov.tr/koye-donus-ve-rehabilitasyon-projesi-kdrp).

Tablo 3: Türkiye'de Tersine Göçü Destekleyen Politikaların Bölgesel Kalkınma Açısından Değerlendirilmesi

Politika	Hedef grup	Mekanizma	Tersine göçe etkisi	Kalkınma etkisi	Sınırlılık
Genç Çiftçi	Gençler	Hibe desteği	Kırsal yerleşimi teşvik	İstihdam ve üretim	Süreklilik
Uzman Eller	Eğitimli gençler	Girişimcilik desteği	Beşerî sermaye dönüşü	Verimlilik ve üretim	Sektörel kapsam
Kırsal Kalkınma Yatırım Programı	Kırsal üreticiler ve yatırımcılar	Yatırım ve hibe desteği	Dolaylı	Üretim, istihdam ve kırsal ekonomik faaliyet	Finansman ve başvuru koşulları
IPARD	Girişimciler	Yatırım desteği	Dolaylı	Üretim ve istihdam	Finansmana erişim
KÖYDES	Kırsal nüfus	Altyapı yatırımları	Dolaylı	Yaşam kalitesi ve kırsal çekicilik	Altyapı ölçeği
Köye Dönüş ve Rehabilitasyon Projesi	Eski köy nüfusu	Geri dönüş desteği	Doğrudan	Nüfusun korunması ve altyapının güçlenmesi	Bölgesel kapsam

İstanbul Tersine Göç Projesi	İstanbul'dan ayrılmayı düşünen/ayrılan nüfus	Tersine göçü destekleme	Doğrudan	Nüfusun mekânsal dengelenmesi	İstanbul odaklı olması
Konya Ovası Projesi	Kırsal nüfus ve üreticiler	Bölgesel kalkınma ve yatırım desteği	Dolaylı	Tarımsal üretim, istihdam ve gelir artışı	Bölgesel kapsam

Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

6. TERSİNE GÖÇÜN BÖLGESEL KALKINMA ÜZERİNDEKİ ÇOK BOYUTLU ETKİLERİ

Tersine göç sadece nüfusun mekânsal olarak yeniden dağılımını ifade eden bir süreç olmayıp aynı zamanda bölgesel kalkınmayı ekonomik, sosyal, demografik ve çevresel yönüyle etkileyen çok boyutlu bir olgudur. Göç veren kırsal ve az gelişmiş bölgelere doğru gerçekleşen tersine göç hareketleri; beşeri sermaye, yerel ekonomik kapasite, istihdam fırsatları, eğitim ve sağlık imkânlarına bağlı olarak Tablo 4'te görüleceği üzere birçok olumlu ve olumsuz etkisi bulunmaktadır.

Tablo 4: Tersine Göçün Pozitif ve Negatif Etkileri

Pozitif Etkileri	**Negatif Etkileri**
Beşerî sermaye transferi	Konut ve arsa fiyatlarının etkilenmesi ile ortaya çıkan değişim
Yerel bilgi ve deneyim aktarımı	Altyapının planlanma gerekliliği
Finansal sermaye transferi	Yerel eşitsizliklerin artması (Tersine göçle gelenlerin ekonomik imkânlarının farklı olması, gelir ve refah farklılıklarını artırabilir).
Nüfusun yeniden dengelenmesi	Yerel halk ile geri dönenler arasında sosyal uyum sorunları
İşgücü arzının güçlenmesi	Çevresel baskı (Artan nüfus ve yapılaşma, doğal kaynakların kullanımını ve çevre üzerindeki baskıyı artırabilir.)
Girişimciliğin artması	İstihdam imkânlarının etkilenmesi
Kırsal alanların canlanması	Plansız yapılaşma

Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Tersine göçün bölgesel kalkınma açısından en önemli ekonomik etkisi kırsal ekonomiyi ve dönüş yaptıkları ekonomiyi canlandırmasıdır. Çünkü geri dönüş yapan bireyler, sahip oldukları finansal birikim, mesleki deneyim ve beşerî sermayeyi kırsal alanlara taşıyarak yeni yatırım girişimlerinin ortaya çıkmasına ve yerel üretim kapasitesinin artmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum özellikle, tarım, hayvancılık, girişimcilik ve turizm faaliyetleri aracılığıyla yerel ekonominin güçlenmesini desteklemektedir. Yukarıda daha önce bahsedilen IPARD Programı kapsamında desteklenen tarımsal işletmeler, süt üretim tesisleri, kırsal turizm yatırımları ve yenilenebilir enerji projeleri birçok kırsal bölgede yeni istihdam alanları yaratmıştır. Benzer şekilde Konya Ovası Projesi (KOP) ile sulama yatırımlarının yaygınlaştırılması sonucunda tarımsal verimlilik artmış, bölge ekonomisi güçlenmiş ve kırsal alanların ekonomik çekiciliği yükselmiştir. Türkiye'de Kahramanmaraş'ın Kadıoğluçiftliği Köyü üzerine gerçekleşen çalışma bu durumu desteklemektedir. Çalışmada seracılık ve modern hayvancılık faaliyetlerinin kırsal alanda istihdam yaratarak göçü durdurduğu ve kentlerden kıra doğru tersine göçü teşvik ettiği tespit edilmiştir. Araştırmada söz konusu üretim faaliyetlerinin köy nüfusunu arttırdığı ve ekonomik yapıyı güçlendirdiği bulgusuna ulaşılmıştır (Kara ve Gökburun, 2018).

Tersine göçe demografik yönüyle bakıldığında uzun yıllar göç veren kırsal alanlarda nüfusun korunmasına ve kısmen dengelenmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle çalışma çağındaki genç nüfusun geri dönmesi, işgücü potansiyelini artırırken kırsal yerleşim yerlerinde yaşlanma eğiliminin yavaşlamasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca emeklilerin ve belirli bir sermaye birikimine sahip bireylerin köylerine dönmeleri, kırsal alanlardaki nüfus kaybının hızını yavaşlatmaktadır. Rize'nin Ardeşen ilçesine bağlı Yeniyol Köyü örneğinde emekli olduktan sonra köye dönüş yapanların oranının oldukça yüksek olduğu ve son yıllarda yeni konut yapımlarında artış yaşandığı görülmektedir. Bu durum tersine göçün, kırsal nüfusun korunmasına ve yerleşim yerlerinin yeniden canlanmasına katkı sağladığını göstermektedir (Kepenek ve Uğuzman, 2018).

Tersine göç kırsal alanlarda sosyal yapıyı güçlendirerek bölgesel kalkınmanın daha sürdürülebilir bir nitelik kazanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu yönüyle bakıldığında kırsal alanlara geri dönen kişilerin edindikleri deneyimleri beraberlerinde getirmeleri, yeniliklere uyum kapasitesini artırırken toplumsal ilişkilerin güçlenmesini de sağlamaktadır. Tersine göç sayesinde zayıflayan aile ve akrabalık bağları yeniden güçlenebilmekte, yerel kültürel değerlerin korunması desteklenmekte ve kuşaklar arası bilgi aktarımı güçlenmektedir. Bunun yanında nüfusun artması veya korunması, köylerde sosyal yaşamın canlanmasına, sivil toplum faaliyetlerinin gelişmesine ve toplumsal katılımın artmasına imkan tanımaktadır.

Tersine göç ile kırsal yerleşim alanlarında atıl durumda kalan tarım arazileri yeniden kullanılmaya başlanmakta, tarımsal faaliyetler canlanmakta ve kırsal peyzajın sürdürülebilirliğine katkı sağlanabilmektedir. Ayrıca nüfusun büyük kentlerde yoğunlaşmasının azalması; trafik, hava kirliliği, atık üretimi ve enerji tüketimi gibi çevresel baskıların hafiflemesine yardımcı olabilmekte ve özellikle organik tarım, agro-turizm ve sürdürülebilir kırsal kalkınma uygulamalarına yönelen geri dönüşler çevrenin korunmasını desteklemektedir.

Tersine göç, göç veren bölgelerde nüfusun azalmasını engelleme, beşeri sermayeyi geri kazanma ve yerel ekonomiyi canlandırma bakımından önemli bir potansiyele sahip olmakla beraber yerel ve bölgesel kalkınma için tek başına yeterli görülmeyebilir. Tersine göçün bölgesel kalkınma üzerinde etkileri; geri dönüş yapan nüfusun niteliği, yerel işgücü piyasasının kapasitesi, girişimcilik imkânları ve bölgenin sosyo-ekonomik yapısıyla ilgilidir. Bu kapsamda tersine göçün bölgesel kalkınma üzerinde ortaya çıkarabileceği sınırlılıkları ve risklerin mevcut ekonomik şartlar gözönüne alınarak daha geniş perspektiften dikkate alınması gerekmektedir.

Tersine göç, bireylerin daha önce göç ettikleri yerlere geri dönüş sürecini ifade ettiğinden eğitim, sağlık, altyapı, enerji, içme yönetimi, kanalizasyon, konut ve birçok kamusal hizmetlere yönelik talebi artırabilmektedir. Geri dönüşlerin gerçekleştiği bölgelerde bu hizmetlerin aynı hızda gerçekleşmemesi durumunda yerel kaynaklar üzerinde baskı oluşturma, konut fiyatlarında yükselme, altyapı yetersizliği ve kamu hizmetlerinde kapasite sorunları gibi sorunları doğurabilmektedir.

Tersine göçün kalıcı olması için, gerekli olan ve geri dönüş yapan bireylerin bekledikleri istihdam, gelir ve yaşam fırsatları sağlanamadığı takdirde geri dönüş yapan bireyler tekrar göç edebilirler. Bu geçici ve tersine göçler bölgesel kalkınma politikalarından beklenilen olumlu sonuçları etkileyebilmektedir. Bu kapsamda tersine göç politikalarının sürdürülebilir kalkınma aracına dönüşebilmesi için sadece nüfus hareketliliğinin olması yeterli olmamakta aynı zamanda istihdam fırsatları, yatırım, girişimcilik, eğitim ve sağlık imkânları, sosyal hizmetler ve yerel ekonomik kapasite ile birlikte ele alınması gerekmektedir.

7. SONUÇ

Türkiye'de geleneksel olarak kırsal alanlardan kentsel alanlara doğru ortaya çıkan göç hareketlerinin son yıllarda değişime uğradığı ve göç yönünün kentsel alanlardan kırsal alanlara veya daha küçük yerleşim alanlarına doğru gerçekleştiği tersine göç olgusu ile göç kavramıyeni bir boyut kazanmıştır. Büyük kentlerde yaşam maliyetlerinin yükselmesi, pandemi sonrası uzaktan ve esnek çalışma modelinin yaygınlaşması, ulaşım sorunları, altyapı, hava kirliliği, trafik ve gürültü gibi çevresel sorunlar nedeniyle büyük kentlerden daha küçük yerleşim alanlarına doğru göç hareketleri başlamıştır. Ayrıca

küçük ve kırsal yerleşim alanlarında tarımsal desteklerin artması, altyapı yatırımlarının yoğunlaşması ve tarımın ve girişimciliğin desteklenmesine yönelik hibelerin artması bu alanların çekiciliğini artırmıştır.

Bu gelişmeler sonucunda tersine göçün çeşitli sonuçlar doğurduğu ve bölgesel kalkınma süreci olumlu ve olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Pozitif etkilerinden biri; geri dönüş yapan bireylerin sahip oldukları bilgi, deneyim ve beşeri sermayenin kırsal ve küçük yerleşim alanlardaki girişimcilik faaliyetlerini canlandırması ve ekonomik faaliyetleri çeşitlendirmesidir. Tarımsal perspektiften bakıldığında, atıl durumda kalan tarım arazilerinin yeniden üretime kazandırılması tarımsal üretimi artırmakta ve yerel kaynakların daha etkin kullanılabilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra memleket, akrabalık ve sosyal ağlar özellikle emekliler ve aile kurmuş bireyler bakımından önemli bir çekim unsurunu oluşturmaktadır. Tersine göçün negatif etkileri arasında ise plansız bir şekilde gerçekleşen tersine göç hareketlerinin yerel kaynaklar üzerinde baskı yaratarak eğitim, sağlık, konut ve altyapı sorunlarına neden olması sayılabilir. Ayrıca geri dönüş yapan bireylerin sahip olduğu bilgi ve deneyimin işgücü talebiyle uyuşmaması durumunda nüfusun tekrar kentlere geri göç etme riski de ortaya çıkabilecek riskler arasında sayılabilir.

Türkiye'de; Genç Çiftçi Projesi, Uzman Eller Projesi, Kırsal Kalkınma Yatırım Programı, Köye Dönüş ve Rehabilitasyon Projesi, İstanbul Tersine Göç Projesi, Konya Ovası Projesi, Köylerin Altyapısının Desteklenmesi Projesi (KÖYDES) ve Türkiye Cumhuriyeti Katılım Öncesi Yardım Aracı Kırsal Kalkınma Programı (IPARD) gibi politika ve uygulamalar tersine göçü ve kırsal kalkınmayı desteklemede önemli rol oynamış olsa da, tersine göçün sürdürülebilir bir bölgesel kalkınma aracına dönüştürülebilmesi için yalnızca nüfusun mekânsal hareketliliği yeterli değildir. Tersine göç hareketlerinin olumlu etkilerinin ortaya çıkabilmesi için geri dönüş yapan bireylere uygun istihdam ve gelir fırsatlarının yaratılması, kamu hizmetlerinde erişilebilirliğin artması, altyapı yetersizliklerinin giderilmesi ve bölgeye özgü kalkınma planlarının uygulanması ile önemlidir.

KAYNAKÇA

Adıgüzel Y. (2018). *Göç Sosyolojisi*. Ankara: Nobel Yayınları.

Akan Y, Arslan İ. (2008). *Göç Ekonomisi*. Ankara: Ekin Yayın Dağıtım.

Akbaş İ. (2015). Bölgesel kalkınmada yönetişim kavramı. Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 6(2), 333-354.

Bovenkerk F. (1974). *The sociology of return migration: a bibliographic essay*. ISBN: 978-94-015-1037-0 (eBook-PDF)

Cassarino JP. (2004). Theorising return migration: the conceptual approach to return migrants revisited. *International Journal on Multicultural Societies* 6(2), 253–279.

Çeliktaş H. (2025). Tersine göçü yeniden ele almak: tersine göçün toplumsal etkileri ve türleri. *Kültür Araştırmaları Dergisi* 24, 338–357.

Demircan Yıldırım P. (2025). Tersine göçün peşinde: Türkiye'de kentten köye göç hareketliliği. *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (AKAD)* 17(33), 817–834.

Dustmann C, Weiss Y. (2007). Return migration: theory and empirical evidence from the UK. *British Journal of Industrial Relations* 45(2), 236–256.

Girma H. (2017). The salience of gender in return migration. *Sociology Compass* 11(5), 1–9.

Güreşçi E. (2010). Türkiye'de kentten-köye göç olgusu. *Doğuş Üniversitesi Dergisi* 11(1), 77–86.

Haas H, Fokkema T, Fihri MF. (2015). Return migration as failure or success? the determinants of return migration ıntentions among moroccan migrants in Europe. *Journal of International Migration and Integration* 16, 415–429.

İçişleri Bakanlığı. (2026). *Köye Dönüş ve Rehabilitasyon Projesi (KDRP)*. Erişim adresi: https://www.icisleri.gov.tr/koye-donus-ve-rehabilitasyon-projesi-kdrp

İstanbul Büyükşehir Belediyesi. (2026). Erişim adresi: https://ibb.istanbul/

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Zabıta Dairesi Başkanlığı. (2026). *Faaliyet Raporları*. Erişim adresi: https://zabita.ibb.gov.tr/faaliyet-raporlari/

King R. (1986). *Return migration and regional economic problems*. ISBN: 0-7099-1578-9 (eBook-PDF)

Konya Ovası Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı. (2026). *Konya Ovası Projesi (KOP) Bölge Kalkınma Programı*.

Kunuroglu F, Van de Vijver F, Yagmur K. (2016). Return migration. *Online Readings in Psychology and Culture* 8(2), 1-28.

Kurt G. (2024). *İç Göç, Kentsel Uyum ve Bütünleşme*. Gaziantep: Özgür Yayınları.

Lee ES. (1966). A Theory of migration. *Demography* 3(1), 47–57.

OECD. (2019). *OECD Regional Outlook 2019: Leveraging Megatrends for Cities and Rural Areas, OECD Publishing, Paris.*

OECD. (2023). *OECD (2023), OECD Regional Outlook 2023: The Longstanding Geography of Inequalities, OECD Publishing,*

Özyakışır D. (2013). *Göç, Kuram ve Bölgesel Bir Uygulama*. Ankara: Nobel Akademi Yayınları.

Şengül R, Çetinkaya İstikbal NI. (2016). Türkiye'de köylerin altyapısını destekleme projesinin (köydes) kırsal kalkınmaya etkileri. *Journal of Turkish Studies* 12(12), 57–74.

Sağlam S. (2006). Türkiye'de İç göç olgusu ve kentleşme. *Hacettepe Üniversitesi Türkiyat Araştırmaları Dergisi* 5, 33–44.

Schiller NG, Basch L, Blanc-Szanton C. (1992). Transnationalism: a new analytic framework for understanding migration. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 645, 1–24.

Tarım ve Orman Bakanlığı. (2026). *IPARD Programı*. Erişim adresi: https://ipard.tarimorman.gov.tr/Prog

Tarım ve Orman Bakanlığı. (2026). *Kırsal Kalkınma Yatırımlarının Desteklenmesi Programı*. Erişim adresi: https://kirsalkalkinma.tarimorman.gov.tr/destekler/kirsal-kalkinma-yatirim-programi

Tekin A. (2011). Küreselleşen dünyada bölgesel kalkınma dinamikleri, kamu politikaları ve bölgesel kalkınma ajansları. Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 29, 37-47.

T.C. Resmî Gazete. (2005). *Mahalli İdare Birlikleri Kanunu* (Kanun No: 5355). 26 Mayıs 2005 tarih ve 25826 sayılı Resmî Gazete.

T.C. Resmî Gazete. (2016). *Genç Çiftçi Projelerinin Desteklenmesine İlişkin Düzenleme* (Karar Sayısı: 2016/8541).

T.C. Resmî Gazete. (2021). *Kırsal Kalkınmada Uzman Eller Projesi Uygulama Tebliği*. 2 Haziran 2021 tarih ve 31499 sayılı Resmî Gazete.

TÜİK, İç Göç İstatistikleri, 2024, https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/54082

Tsuda T. (2019). Conclusion: Interrogating return—Ambivalent homecomings and ethnic hierarchies. In T. Tsuda & C. Song (Eds.), *Diasporic returns to the ethnic homeland: The Korean diaspora in comparative perspective*, 239–253. Palgrave Macmillan.

International Organization for Migration (IOM). (2019). *Glossary on Migration* (International Migration Law No. 34). Geneva: IOM.

DOPED INS;0.5%HO NANOSTRUCTURES; SYNTHESIS, PROPERTIES AND APPLICATIONS

Dr.Seyfaddin JAFAROV

Nakhchivan State University, Faculty of Physics and Mathematics, Nakhchivan city, Azerbaijan

orcid.org/0009-0000-1609-0387

ABSTRACT

In this work, doped semiconductor nanostructures are of particular interest due to their potential for studying the size and size-dependent physical properties of materials, as well as for the preparation of nanoscale electronic and optoelectronic devices. Indium sulfide (InS) is a group III-VI semiconductor compound, and its synthesis and properties are of increasing interest due to its wide application in various fields. This article presents a comprehensive review of current research on the rational synthesis, novel properties, and unique applications of InS;0.5%Ho nanostructures in nanotechnology. The article begins with the rational structure and synthesis of InS;0.5%Ho nanostructures, and then reveals a number of unique properties and applications associated with them (e.g., photoluminescence, cathodoluminescence, electrochemiluminescence, photocatalysis, lasers, waveguides, modulators, solar cells, field-effect transistors, photodetectors, field emitters, and nanogenerators). Finally, the review concludes with the author's thoughts on the prospects for future research in the field of one-dimensional InS;0.5%Ho nanostructures.

KEYWORDS; detection, nanostructures, indium, semiconductor devices, size-dependent

INTRODUCTION

Nanostructures such as nanowires, nanoribbons, and nanotubes are of increasing interest due to their importance in fundamental scientific research and potential technological applications. .[1-6] .Such nanostructures are widely accepted as ideal systems for studying a wide range of novel phenomena at the nanoscale and for investigating the size and size dependence of functional properties. They are also expected to play important roles as interconnects and basic building blocks in nanoscale electronic, optoelectronic, electrochemical, and electromechanical devices. .[7-8] As an important III–VI semiconductor, InS (with a direct band gap of 2.5 eV) was one of the first semiconductors discovered and is probably one of the most important electronic and optoelectronic materials, widely used in nonlinear optical devices, flat panel displays, LEDs, lasers, logic gates, transistors, etc. .[9,10] It is also a worthy active optical element. The wavelength-sensing material and the material for electrically controlled lasing can find wide applications in telecommunications, data storage, and near-field optical lithography.[11-13] It is clear that research on ZnO, one of the most popular one-dimensional nanostructures, has expanded rapidly in recent years due to its structural diversity and novel properties. As Zhongling Wang pointed out in a recent review, one-dimensional ZnO is one of the few dominant nanomaterials in nanotechnology, along with carbon nanotubes and silicon nanowires. .[14] .It is known that InS has the most similar fundamental physical properties to ZnO, including crystal structure, lattice constant, etc. Therefore, the promising morphologies and novel properties of nanoscale InS can compete with those of ZnO. In fact, research on InS nanostructures has recently come to the forefront due to its potential benefits for understanding fundamental physical concepts and applications in nanoscale optoelectronic devices (Figure 1).

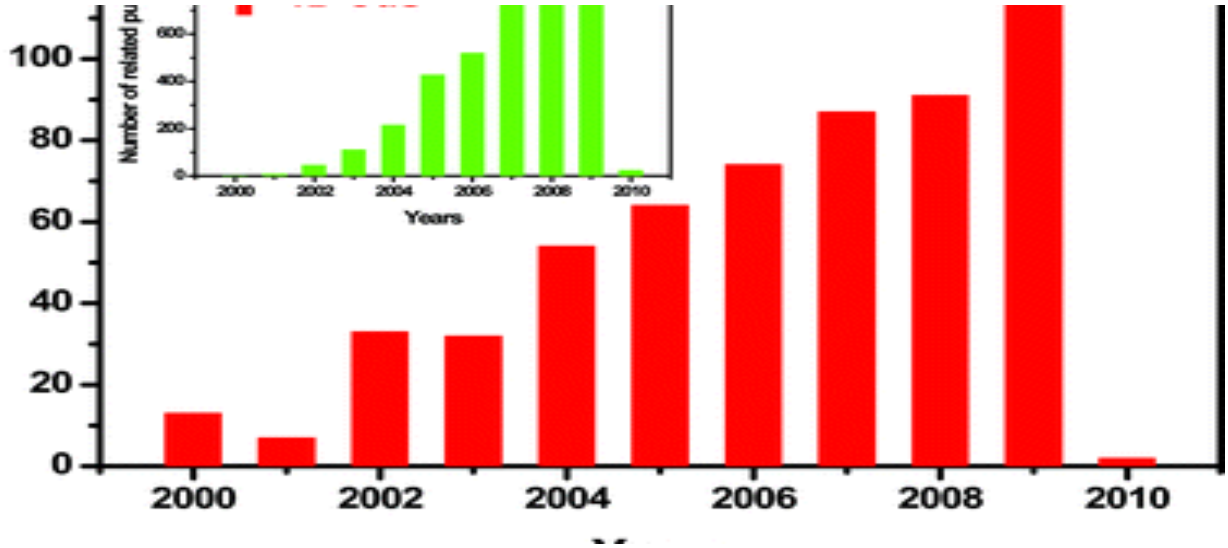


Figure 1. Comparative statistics of publications on InS;0.5%Ho and ZnO nanostructures.: InS;0.5%Ho (or indium sulfide) and ZnO (zinc oxide) nanowire, nanorod, nanotube, nanoribbon, nanostripe, nanosurface, nanotip, nanoring, nanofiber, nanohelix, nanoflower, nanobrush or nanocomposite.

This article presents a comprehensive review of the current research on the rational synthesis, novel properties and unique applications of one-dimensional InS;0.5%Ho nanostructures. The review is divided into three main parts. The first part presents the structure and synthesis methods of InS;0.5%Ho nanostructures such as nanowires, nanotubes, nanoribbons, core/shell nanostructures and other complex nanostructures. Then, several unique properties and applications of InS;0.5%Ho nanostructures are presented, including photoluminescence, cathodoluminescence, electrochemiluminescence, lasers, waveguides, modulators, solar cells, field-effect transistors, photodetectors, photocatalysts, field emitters, and nanogenerators. Finally, the review concludes with some perspectives and the author's thoughts on future developments in this field.

2. Crystal Structures of InS;0.5%Ho

InS;0.5%Ho has two structural types: the zinc blende structure and the wurtzite structure. The zinc blende structure and the wurtzite structure are cubic and hexagonal, respectively, and in some aspects the two structures are quite similar. .[15]. As shown in Figure 2, the stacking sequence of the closely packed planes ((111) planes) of zinc alloy is represented by the repeating pattern ABCABCABC, and that of wurtzite is represented by the repeating pattern ABABAB. Wurtzite InS;0.5%Ho can be represented as a series of alternating planes of tetrahedrally coordinated S^{2-} and Cd^{2+} ions aligned along the c axis.

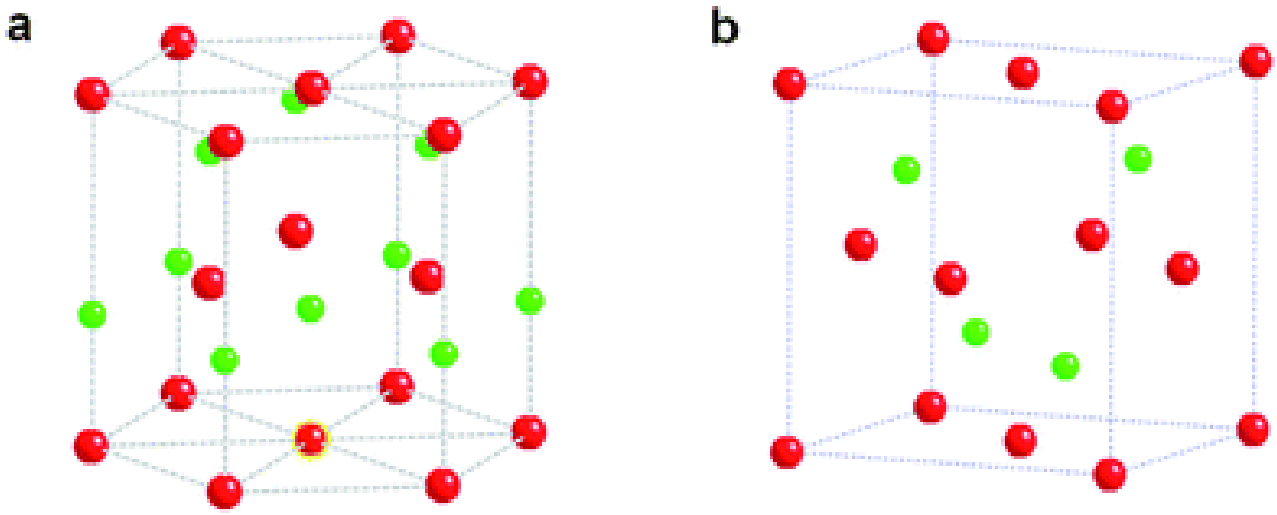


Figure 2. Two types of InS;0.5%HO structures: (a) hexagonal (wurtzite) and (b) cubic (zinc alloy). The red and green spheres represent In and S atoms, respectively.

Another important feature of InS is its polar surfaces. The most common polar surface is the basal plane. The oppositely charged ions create positively charged polar surfaces In-(0001) and S-(000[with 1 macron bond]), which leads to the formation of a normal dipole moment and spontaneous polarization along the c axis, as well as a mismatch in surface energy. Wurtzite InS;0.5%Ho exhibits anisotropic growth for two reasons. First, different crystallographic planes have different surface energies, and second, their surface polarity and chemical activity are different.[16]

3. Synthesis and Fabrication of A^3 B^6 Nanostructures

3.1 Nanowires

Vapour-phase synthesis is probably the most widely studied approach to the formation of InS;0.5%Ho nanowires (NTs). Several process parameters, such as temperature, pressure, carrier gas, substrate, and evaporation time, can be controlled and must be properly selected before or during vapor-phase synthesis. As shown in Table 1, several methods have been used to grow InS NTs. For example, Lieber and co-workers first demonstrated the use of single-source molecular precursors for the growth of InS NTs at low temperatures.[17] The authors were able to obtain single-crystal InS NTs with controlled diameters in high yields using well-defined molecular reagents. Their synthetic approach is based on a nanocluster-catalyzed vapor-liquid-solid (VLS) growth process, in which molecular precursors In(S_2CNEt_2)_2 serve as the source of In and S reactants (Figure 3a). In this synthetic method, the single-source precursor undergoes thermal decomposition in the growth region, and Au nanoclusters are used as catalysts to form liquid InS;0.5%Ho--Au solutions. When the nanodroplets are saturated with the reagent, the nanofibers start to grow. A typical SEM image of InS nanofibers grown using 20 nm diameter catalyst clusters shows that this synthetic method produces nanofibers with a high yield and a uniform diameter of approximately 20 nm (Figure 3b). The HRTEM image and corresponding Fourier transform (Figure 3c) show that these InS;0.5%Ho nanofibers are single crystals growing in the (100) direction.[17]

Table 1 Summary of InS;0.5%Ho nanostructures synthesized by various methods

Morphology	Growth method		*T*/°C	Reference .
Nanowires		Solution-based approach	330	26
		MOCVD	—	17
		MOCVD	450, 550	27
		Thermal evaporation	850	9

Morphology	Growth method		*T*/°C	Reference .
		Thermal evaporation	800–1000	28
		Chemical growth in water	60	29
		Solvothermal method	200	30
		Template method	160	31
		Cluster growth route	117	32
		Solution-based synthesis	330	33
		Hot-injection method	330	34
		Chemical bath deposition	80	35
		Electrochemical deposition	70	36
		Electrochemical deposition template method	100–160	37
		CVD process	650	38
		CVD process	870	39
		Laser-assisted catalytic growth (LCG) method	790–870	40
		Physical evaporation	760	41
		Physical evaporation	800	42
		Thermal evaporation process	900	18
		Solvothermal process	150–250	43
		Thermal evaporation process	900	44
		Polymer-controlled growth method	170	45
Nanorods		MOCVD process	420	11
		Thermal decomposition process	900	46
		Thermal decomposition process	300	47
		Benchtop decomposition process	130	48
		Hydrothermal approach	200	49
		Ethylenediamine assisted hydrothermal method	90–180	50
		Multiple injection process	300	51
		Thermal evaporation process	800	9
Nanotubes		Micelle-template-interface reaction route	60	52
		Ultrasonic irradiation	RT	53
		Chemical bath deposition	80	54
		Molecular anchor tempalting synthesis method	100	55
		CVD-templated method	400	22
		Microwave-templated synthesis	RT	56
		Photochemical route	RT	57
		Thermal evaporation process	900	58
		Layer-by-layer deposition cycle	RT	59
		Diffusion-controlled process	150	60
Nanobelts		Thermal evaporation process	620–720	61
		Thermal evaporation process	850	62
		CVD process	860	63
		Thermal evaporation process	850	64
		Thermal evaporation process	650	65
		Thermal evaporation process	900	66
		Thermal evaporation process	1000–1200	67
		Catalyst-assisted VLS growth	840	24
		Vapor-phase transport	850	68

Morphology	Growth method		*T*/°C	Reference .
		Thermal evaporation process	800	23
		VLS process	850	69
		Pulsed laser deposition	600–800	70
Nanoribbons		Thermal evaporation process	800	71
		Thermal evaporation process	950	72
		Thermal evaporation process	800	73
		CVD method	860	74
		Thermal evaporation process	800	75

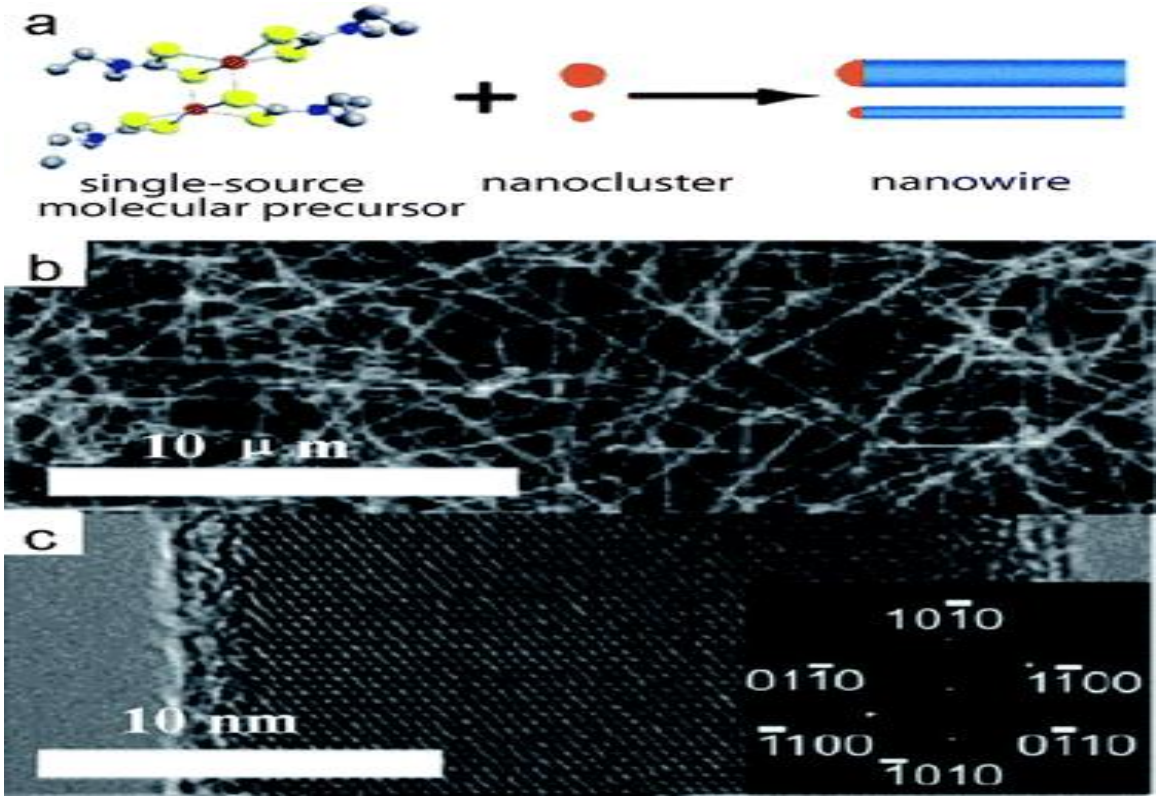


Figure 3. (a) Nanowire growth from molecular precursor via vapor-liquid-solid mechanism catalyzed by gold nanoclusters; (b) SEM image of InS nanowire synthesized using 20 nm gold nanoclusters; (c) TEM image of 23 nm nanowire grown from 20 nm gold nanoclusters and two-dimensional Fourier transform of the TEM image.

[18] prepared InS NPs by vaporizing home-made InS powders without using any catalyst and observed the nucleation and growth process of InS NPs for the first time during a typical vapor-phase synthesis. Their results showed that the growth of InS NPs occurred in three stages. First, InS was formed as amorphous spherical particles (Figure 4a), followed by the formation of InS nanorods (NRs) from protrusions on the particle surface (Figure 4b). Then, the NRs were converted into NPs and absorbed by the matrix particles (Figures 4c and d). This strategy can be optimized to grow InSNPs with different diameters and lengths for different applications. Recently, we have also successfully synthesized CdSNPs by thermal evaporation of CdS powders in the presence of Au nanoparticles as a catalyst at 850 °C. The diameter of InSNPs can be effectively controlled by changing the substrate temperature, which depends on the distance between the sources and the substrate.[9].

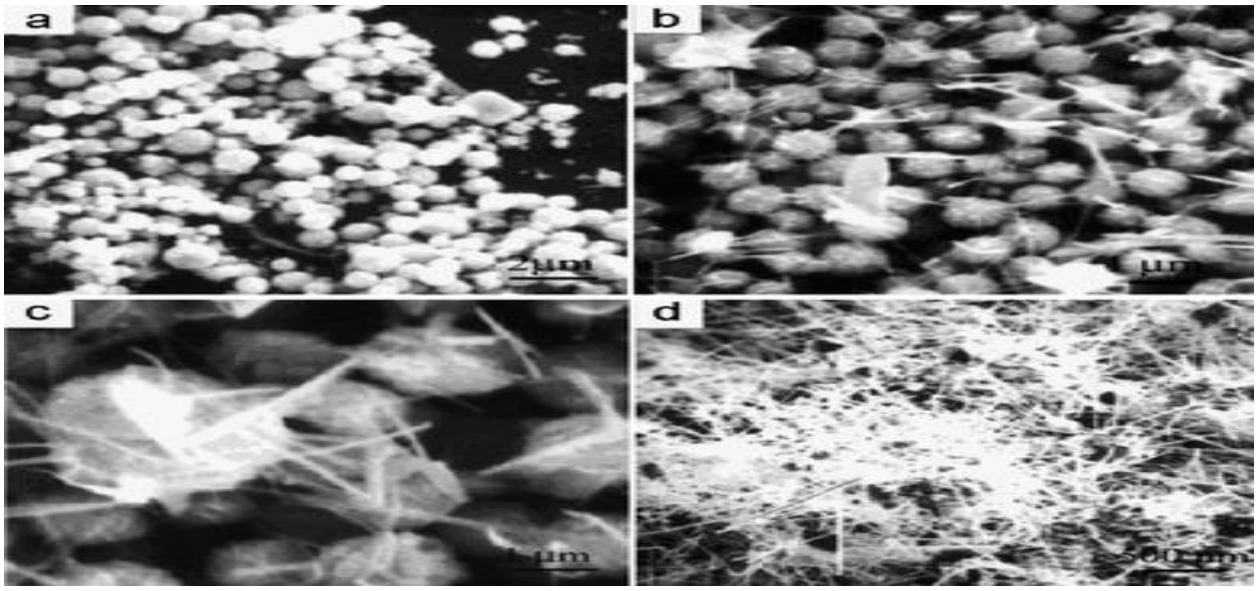


Figure 4. Scanning electron microscopy images of InS nanostructures obtained at different annealing times: (a) 15 min, growth of InS spheroids; (b) 30 min, formation of short InS nanorods; (c, d) 45 min and 90 min, growth of InS nanofibers.

3.2 Nanotubes

Among the various strategies for the preparation of nanotubes (NTs), template-based synthesis is one of the most elegant methods for the production of one-dimensional nanomaterials. [19,]Templates can be porous membranes made of alumina or polycarbonate.

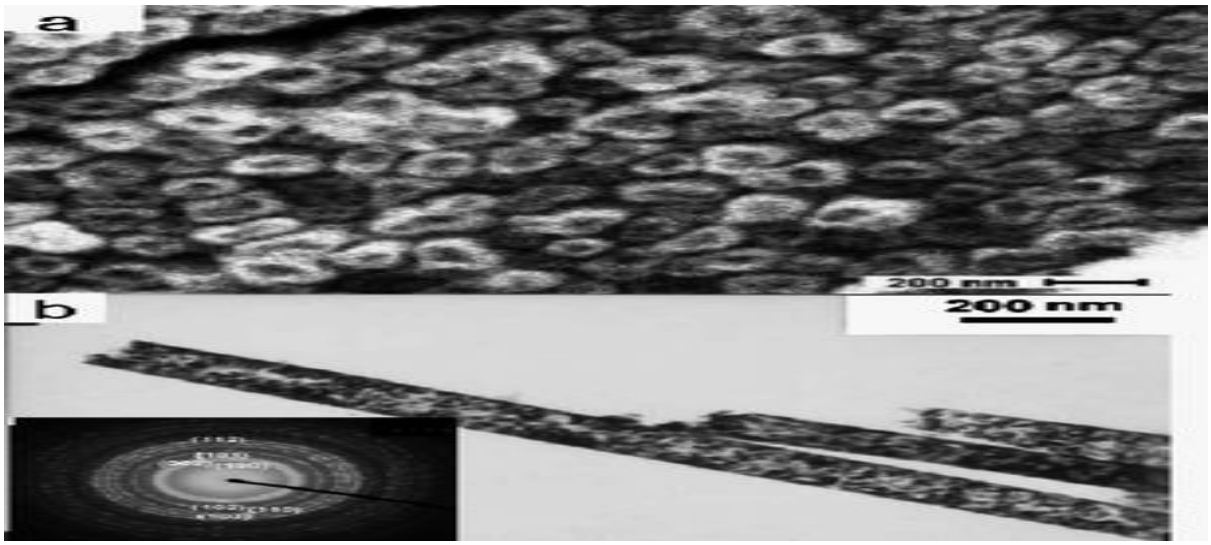


Figure 5 (a) Scanning electron microscopy (SEM) and (b) transmission electron microscopy (TEM) images of INS nanotubes prepared by CVD deposition.

The pores are used for deposition of the corresponding material or its precursors, followed by annealing and template removal.21 Well-aligned InSNTs have been synthesized in nanochannels of porous anode oxide (MAO) membranes by pyrolysis of In(S_2CNEt_2)_2 without the use of any catalyst.[22]. Figure 5a is a top view of the InSNT arrays after the surface layer has been removed. As can be seen, the NPs have open ends and an outer diameter of 80–150 nm, which is consistent with the pore diameter in the MAO template. The TEM image (Figure 5b) shows that the NPs are flat and uniform along their entire length, with a wall thickness of approximately 20–30 nm. The corresponding SAED pattern

shows that the NPs are composed of polycrystalline hexagonal InS. Such nanotubes grown without a catalyst may find promising applications in optical, electrical, and gas sensing nanodevices.[22].

3.3 InS;0.5%Ho Nanocolumns

Unlike nanofibers and nanotubes, nanowires (NPs) have a rectangular cross-section with well-defined geometry and high crystallinity. InS;0.5%Ho NPs were first reported by Jiao and co-workers in 2003.[23] Their method was based on the physical evaporation of CdS powder under controlled conditions using a tungsten foil coated with a 20 nm thin Au layer as a substrate. InS;0.5%Ho NPs were formed in the temperature range of 600–750 °C. The length of the NPs varies from 20 to 200 μm, and the width from 100 nm to 1.5 μm (Figure 6a). At the ends of these InS;0.5%Ho NPs, the width gradually decreases in the direction of growth, ending in a particle located at the end of the ribbon. Both high-resolution transmission electron microscopy and scanning electron microscopy (Figure 6b) show that InS;0.5%Ho are wurtzite single crystals growing in the Nb [10[1 macron-coupled]0] direction.[23] Subsequently, the mass production of single-crystal InS;0.5%HoNb with controlled morphology and size was achieved by simply thermal evaporation of InS;0.5%Ho powders at 840 °C in the presence of gold catalysts.[24] The typical width of InS;0.5%Ho nanocrystals is about a few hundred nanometers, the length is from tens to a few hundred micrometers, the thickness is 30–60 nm (Figure 6c), and the growth direction is <101> (Figure 6d). The author proposed that the growth of InS;0.5%Ho nanoparticles was initiated by the Au2 nanoparticle catalyst through a catalyst-assisted VLS process, and the lateral growth in the ribbon width direction occurred through a vapor phase deposition (VS) process.[24]

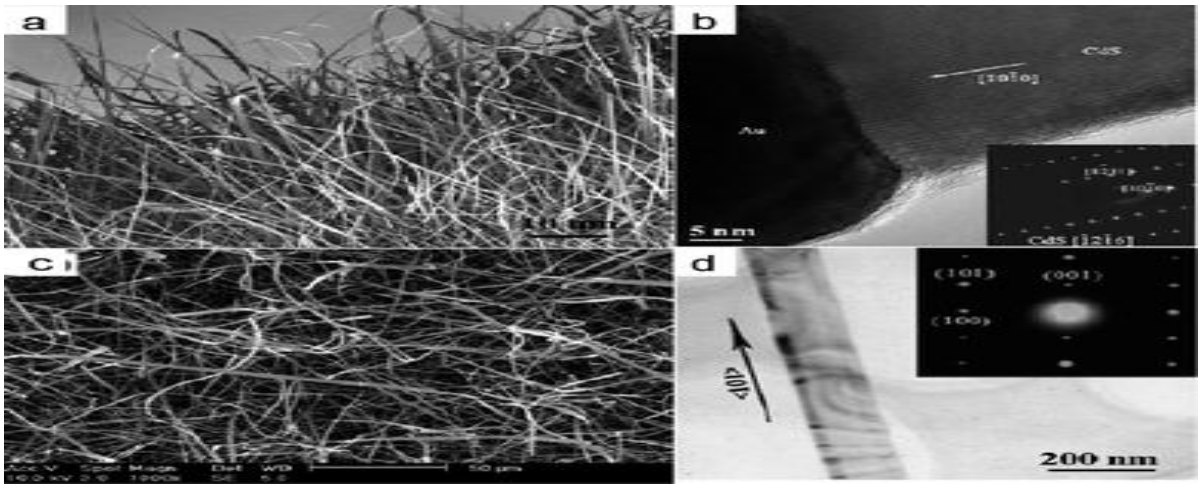


Figure 6 (a) TEM image and (b) transmission electron microscopy image of InS;0.5%Ho nanotubes synthesized by thermal evaporation of InS;0.5%Ho powders at 800 °C. Reproduced with permission from reference 23.

3.4 Tailored Nanowires and Nanorods

The growth of ordered nanostructures is important for applications in lasers, LEDs, and field-effect transistors.25 The ordered growth of nanostructures can be achieved by using substrates and catalysts or seeds. Recently, we successfully prepared ordered arrays of InS;0.5%Ho nanostructures with tunable morphology by a two-step metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) process using Au nanocrystals as catalysts[.11] As shown in Figure 7, these ordered arrays cover the entire substrate surface evenly and densely, and the morphology and alignment of the nanostructured arrays vary greatly depending on the distance between the precursors and the substrate. As the distance increases, the morphology of the CdS nanostructures changes from well-ordered arrays of truncated nanocones (Figure 7a), well-ordered nanorod arrays (Figure 7b), well-ordered divided nanorod arrays (Figure 7c), quasi-ordered nanowire arrays (Figure 7d) to nanowire arrays (Figure 7e). The temperatures in the

different zones are almost the same. The diffraction pattern of the InS;0.5%Ho nanostructures is shown in Figure 7f. All diffraction peaks can be easily assigned to the hexagonal wurtzite structure of InS;0.5%Ho with lattice parameters a = 4.14 Å, c = 6.72 Å. The detailed microstructure of the ordered InS;0.5%Ho nanostructures was further studied using transmission electron microscopy. As can be seen from SAED and high-resolution transmission electron microscopy images, all nanostructures are single crystals grown along the [001] direction. These InS;0.5%Ho nanostructure arrays, with similar structures and similar synthesis conditions, represent an ideal system for understanding structure-property relationships. We have carefully investigated the stimulated and field emission of the five ordered InS;0.5%Ho nanostructure arrays and found that they exhibit significant differences in these properties, as described below.[11]

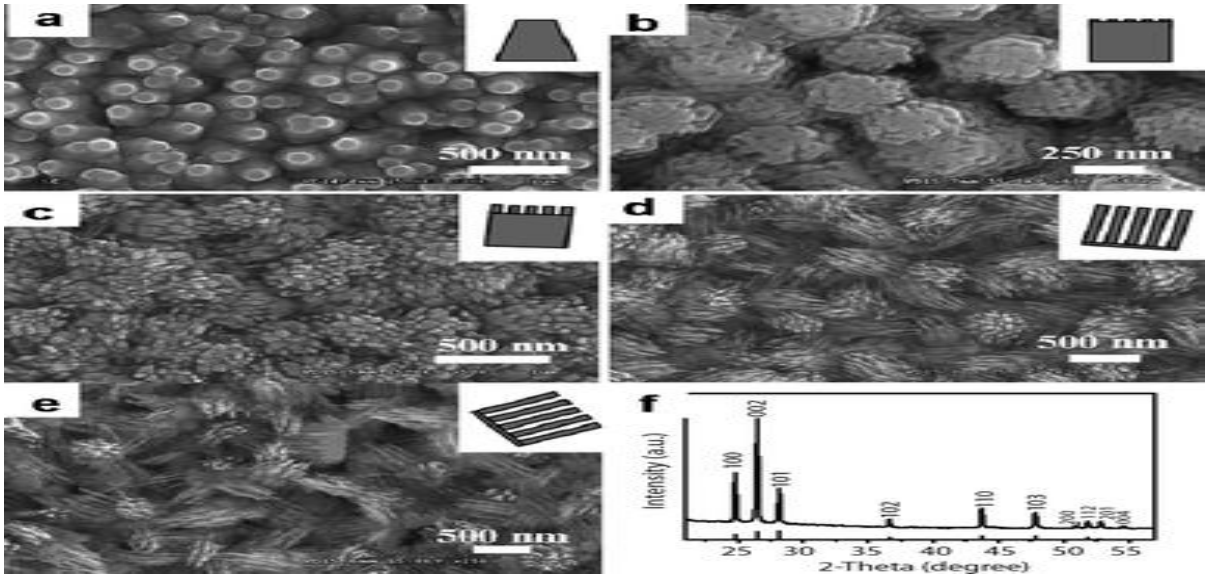


Figure 7. Representative SEM images and corresponding morphology sketches of several InS;0.5%Ho nanostructures: (a) well-ordered truncated nanocone arrays; (b) well-ordered nanorod arrays; (c) well-ordered nanorod arrays with gaps; (d) quasi-equilibrium nanowire arrays; (e) nanowire arrays; and (f) X-ray diffraction pattern of the CdS nanostructures formed in (a)

3.5. Nanostructures

3.5.1 Core/shell nanostructures. Core/shell nanostructures, like coaxial nanostructures, are of fundamental interest and have high technological potential. Typically, multi-step depositions involving sequential deposition of the required precursor materials or surface modification with environmental agents are used to create the desired architecture. For example, Sun and co-workers prepared Ho/InS by coating Ho NWs with InS using a room temperature (RT) chemical reduction process. HoNWs were pre-fabricated using a hydrothermal method. As shown in Figure 8a, the HoNWs have a smooth surface and uniform distribution, and the average diameter is about 80 nm. After coating with InS;0.5%Ho polycrystalline materials, the morphology of HoNPs changed significantly. Figure 8b shows the TEM image of the composite Ho/InS NPs. It reveals a sharp contrast in the axial direction between the outer and inner layers, confirming the core/shell heterostructure. The thickness of the InS shell can be controlled by changing the concentration of the S precursor and the corresponding stoichiometric amount of anhydrous InCl2. A schematic illustration of the multi-step mechanism is shown in Figure 8c, and detailed results can be found in references. 76 In contrast to the multi-step strategy, Lu and co-workers prepared InS/ZnS core/shell NWSs via a single-step MOCVD process by co-feeding InS and ZnS from a single source. 77 The co-fed InS (Cd(S2CN(C3H7)2)2, denoted In33, and ZnS ([Zn(S2CN(Bu2)2]2, denoted Zn44) precursors were prepared to provide sufficient difference in reactivity and allow sequential reaction for in situ formation of core/shell structures. The authors proposed that In first underwent thermal decomposition to form core InSNPs via a VLS mechanism in the presence of Au catalyst, and then these NPs acted as catalysts for thermal decomposition of Zn44.

The subsequently formed ZnS was expected to grow on the surface of the previously formed InSNPs, thus yielding coaxial CdS/ZnS NPs. TEM image of InS/ZnS NPs core/shell (Fig. 8d) shows that the shell layer thickness is about 10 nm and the core diameter is about 30 nm. The coaxial NPs show the presence of microtwins and stacking defects at the core/shell boundary and in the shell region (indicated by arrows in Fig. 8e). The proximity of the (111) planes of cubic ZnS and the (101) planes of hexagonal InS enabled the growth of coaxial ZnS shells on InS-core conductors through small surface reconstruction at the atomic level. In addition, other InS-based core/shell nanostructures, such as InS/Si, InS/InSe, InS/C, InP/InS nanostructures, have also been prepared, as shown in Table 2. Table 2. Typical one-dimensional InS-based nanostructures with complex shapes and microstructures, as well as their synthesis methods

Table 2 Representative 1D CdS-based nanostructures of complex shapes and microstructures and their synthesis methods

Morphology	**Compositions**	**Growth method**	***T*/°C**	**Ref.**
Core/shell nanostructures	InS/ZnS	MOCVD process	280	87
	InS/TiO_2	AC electrodeposition	120	88
	InS/Si	Thermal evaporation method	1020	89
	InS/ZnS	Two-step chemical solution method	180, 70	90
	InS/InSe	Two-step chemical solution method	80, 100	91
	$CuInSe_2$/InS	VLS and chemical bath deposition	700, 60	92
	ZnO/InS	Two-step chemical solution method	RT	93
	TiO_2/InS	Two-step chemical solution method	180, RT	94
	InP/InS	MOCVD and wet chemical procedure	580, 170	95
	INS/C	Thermal evaporation process	1150	96
Alloyed nanostructures	INS_xSe_{1-x}	Pulsed laser ablation process	550–650	97
	InS_xSe_{1-x}	Thermal evaporation process	850	98
	InS_xSe_{1-x}	Thermal treatment process	180	99
	$InS_xSe_{1-x}InS_xTe_{1-x}$	Solvothermal process	180	100
	$Zn_xIn_{1-x}S$	MOCVD process	420	83
	$Zn_xIn_{1-x}S$	MOCVD process	400	84
	$Zn_xIn_{1-x}S$	Solvothermal approach	175	101
	$Zn_xIn_{1-x}S$	Laser ablation and thermal evaporation	950	82
Hetero-structures	InS–Bi	Two-step electrochemical deposition	80	102
	InS–C	Electrochemical deposition and CVD	—	103
Hierarchical nanostructures	ZnS-InS	VLS growth process	880, 1050	104
	InS-ZnS	MOCVD process and VLS growth	950, 740	86
	InS-InS	Two-step evaporation technique	1100, 760	105
	InS-InS	Surfactant-directing method	160	106
	InS-InS	Seed-epitaxial MOCVD process	420	78
	InS-InSe	Two-step thermal evaporation process	800, 750	107

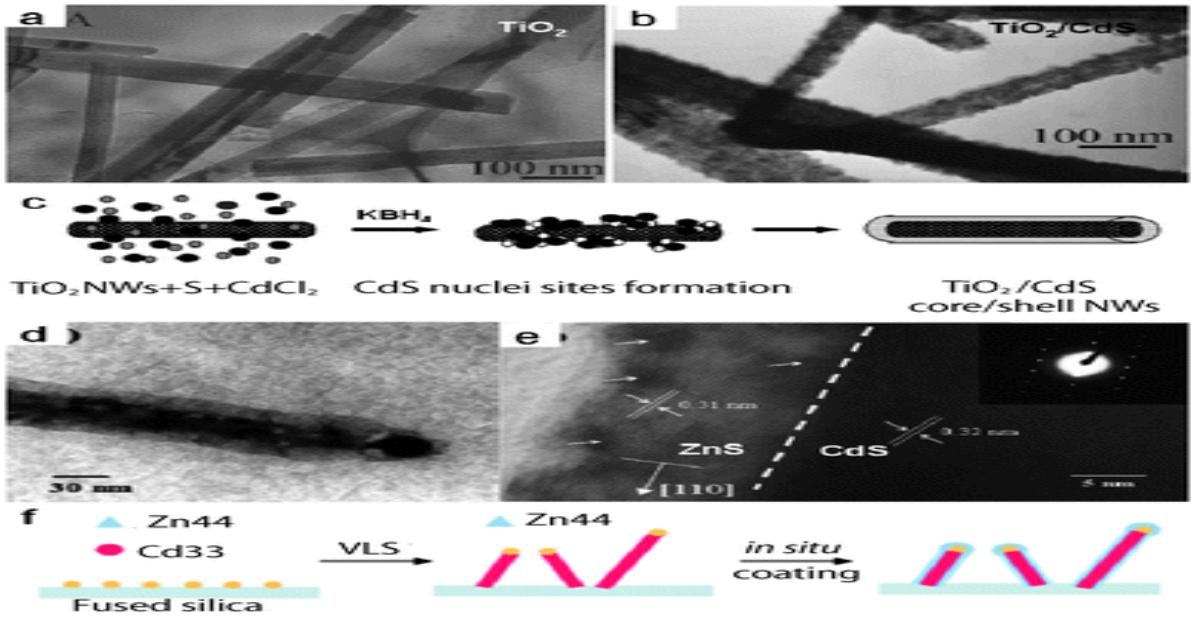


Figure 8 (a, b) TEM images of TiO2 nanowires and TiO2/InS nanowires; (c) Schematic illustration of the multi-step growth mechanism. Reproduced with permission from ref.

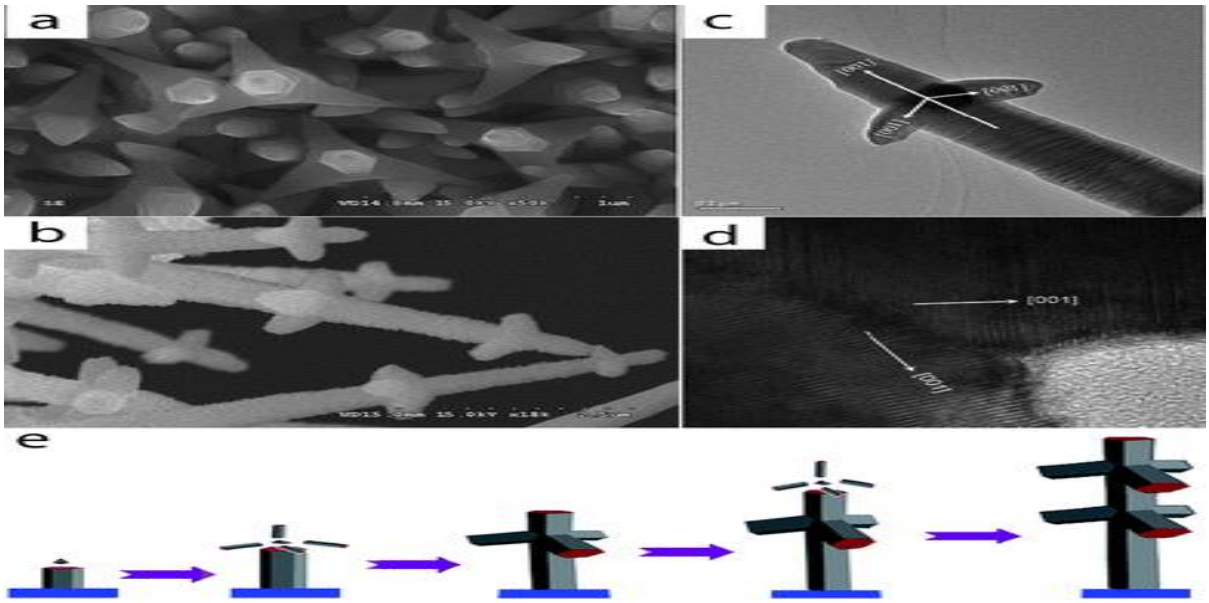


Figure 9 (a) SEM image of InS rocket-like tetrapods (RTPs); (b) SEM image of two-level RTPs; (c) TEM image of InS RTP; and (d) HRTEM image of the boundary between the branch and the central nanorod of InS RTP; (e) Schematic diagram for the growth mechanism of InS RTPs.

We prepared rocket-shaped InS tetrapods (RTPS) using a one-step seed-epitaxial MOCVD approach by thermally decomposing In(S2CNEt2)2 powders using Ag particles and cubic InSe nanocrystals (NC). In this bottom-up method, Ag particles are used to initiate and guide the preferred orientation of the axial nanorods, while the epitaxial growth of wurtzite-structured branches is formed on the cubic InSe seeds. Scanning electron microscopy images show that the synthesized InS nanostructures, which appear gray, uniformly cover the deposited silicon substrate. Each InS RTP nanorod structure consists of three 500 nm long branches and a 200 nm diameter rod. Nanorods maintain a three-dimensional symmetry of parallel branches around a central core. Unlike the traditional tetrapod structures, the central body was longer than the branches and passed through the center of the tetrapod. These structural features can be easily observed by looking at the SEM and TEM images (Figure 9a–d). The high-

resolution TEM image and SAED pattern show that the body and branches of the InS RTP structure are single crystals and grow in the [001] direction. We conducted additional experiments to understand the formation mechanism of the InS RTP. They showed that Ag particles and cubic InSeNCs play an important role in the formation of the structure. (1) When only Ag particles were used, a high density of InS nanoneedles was found to cover the entire substrate. The morphology and internal structure were similar to the morphology and internal structure of the axial InS RTP rods. (2) It was possible to obtain branched InS nanostructures similar to the RTP branches using only cubic InSeNCs. (3) As the amount of Ag particles decreased, the amount of InS RTP decreased accordingly. (4) Using wurtzite NCs, InS nanoneedles with a morphology similar to that of needles grown without seeds were obtained. (5) Using mixed NCs, the absence of arms in InS and RTP nanoneedles, as well as some InS nanorods, was observed. These results confirm that Ag particles and zinc doped InSe play a key role in the preparation of InS-based RTPs using the epitaxial growth method.

3.5.3 ZnxCd1−xS nanoparticles and zigzag nanowires.

Recent advances in ternary semiconductor nanostructures have shown that their band gaps and thus their physical properties can be tuned by changing the composition stoichiometries. Li and co-workers prepared ZnxIn1−xS nanoribbons with variable composition ($0 \leq x \leq 1$) by combining laser ablation of InS and thermal evaporation of ZnS at 950 °C.82 The ZnxIn1−xS nanoribbons were 50–80 nm thick, 0.5–5.0 μm wide, and up to several hundred micrometers long. Recently, we developed a low-temperature route to prepare single-crystal ternary ZnxIn1−xS nanoparticles and zigzag NWs via a one-step MOCVD by heating a mixture of Zn(S2CNEt2)2 and In(S2CNEt2)2 powders to 400–420 °C.83–85 Figure 10a shows a typical growth of a comb-shaped structure with straight edges on one side and short nanotoothed edges on the other side. The diameter of the comb ribbons varies from 500 to 800 nm and their lengths vary from 2–50 μm. The length of these teeth is 300–800 nm and the width is 30–100 nm. Figure 10b shows the SEM image of typical zigzag NWs. These NWs have a diameter of 200–300 nm, a width of 200–300 nm and a length of up to tens of micrometers. The TEM results show that these NWs are single-crystalline and have a [001] axis after the growth direction changes from [[1 macron]13a2/2c2 combination] to [1[1 macron]3a2/2c2 combination] (a, c are the corresponding lattice constants of the a axis and c axis). The composition x of the ZnxIn1−xS nanocombs and NWs is 0.54 and 0.78, respectively. A study on the growth mechanism showed that shear stress as well as small fluctuations in reaction conditions can change the growth direction of nanowires, and the asymmetric growth behavior of nanocombs is induced by surface polarization.

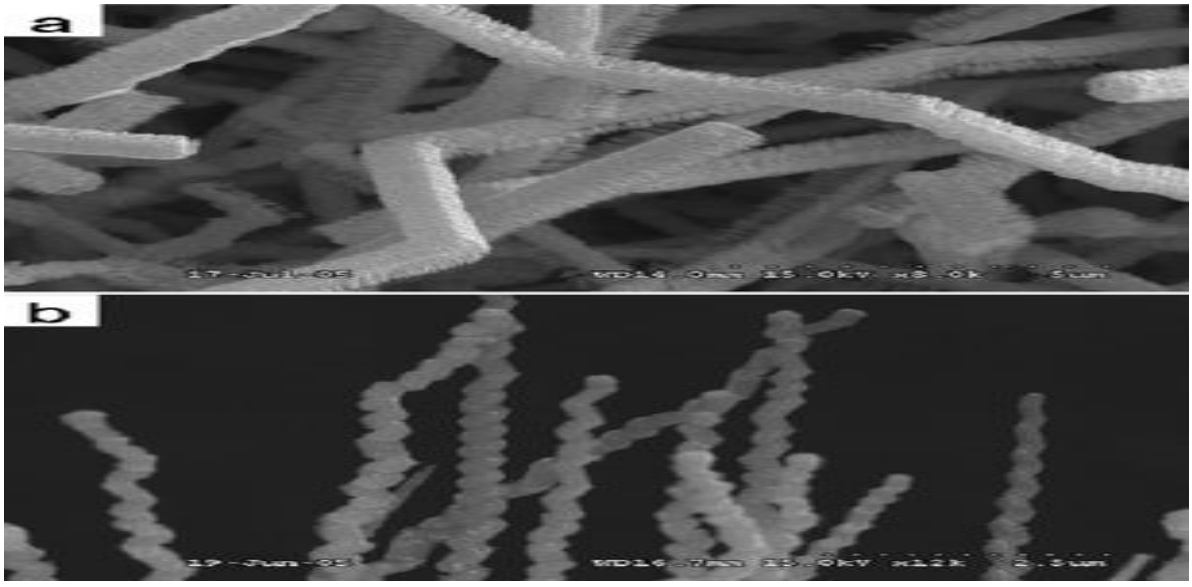


Figure 10 (a) SEM image of ZnxIn1−xS nanoparticles.

3.5.4 ZnS-InS branched nanowire heterostructures.

Agarwal and co-workers reported the fabrication of branched nanowire heterostructures with backbones and branches composed of ZnS and InS, respectively.86 The growth of branches and backbones with controlled composition was achieved by sequential seeding of gold nanocluster catalysts. The growth method of ZnS (InS) NWs was based on a MOCVD process using single molecular precursors, where Zn(S2CNEt2)2 and In(S2CNEt2)2) were used to grow ZnS and InSNWs. The synthesis strategy of the branched nanowire heterostructures is shown in Figure 11a. First, ZnSNW backbones with controlled composition and diameter were prepared by VLS synthesis using monodispersed Au nanoclusters as Zn(S2CNEt2)2 precursor and catalyst.

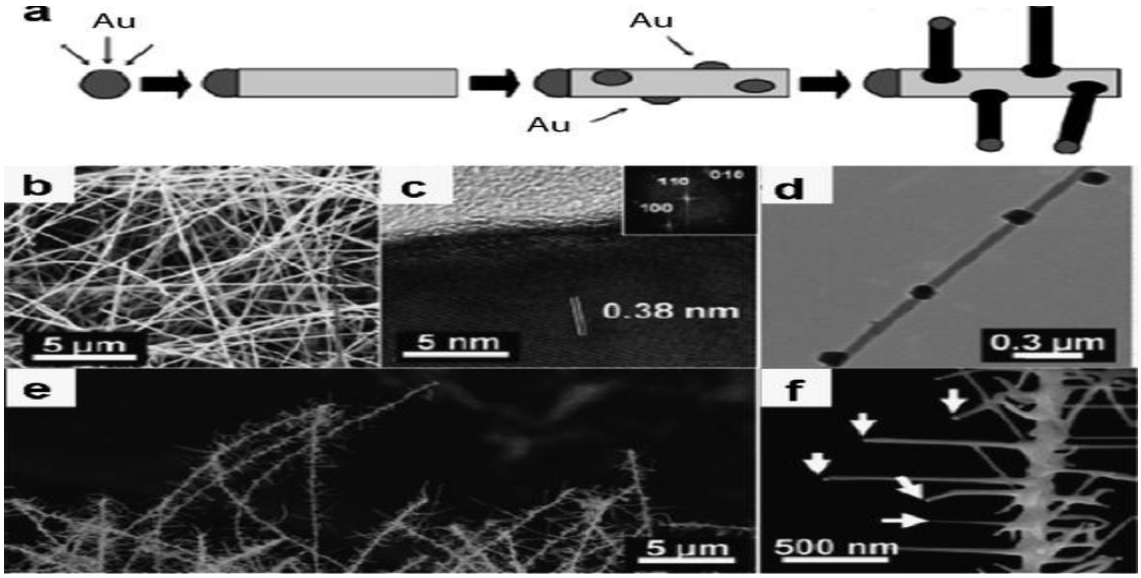


Figure 11 (a) Schematics illustrating the synthesis of nanowire branched heterostructures; (b, c) SEM and HRTEM images of ZnS nanowire cores; (d) TEM images of Au catalysts deposited on ZnS nanowires;

As shown in Figure 11b, the diameters of the NWs ranged from approximately 80 to 120 nm, and the NW lengths were typically greater than 10 μm. The TEM results show that most of the ZnSNWs were grown along the [100] direction (Figure 11c). Second, these ZnSNW backbones were seeded with Au colloidal solution and then air-dried for secondary catalyst deposition. Figure 11d shows a TEM image of the isolated ZnSNWs after Au catalyst deposition, revealing Au nanoparticles bound to the ZnSNWs. Finally, the branches were grown by placing the ZnSNWs with secondary catalysts deposited on them in an oven under a flow of InS precursor materials. The branched NWs were found to be densely packed on the substrate, as shown in Figure 11e. At higher magnification (Figure 11f), Au nanoparticles are clearly visible at the tips of the branches (marked by arrows in Figure 11f). The diameter distribution of the branches is similar to the size distribution of Au catalysts. Electron microscopy studies show that the growth of the heterostructure branches occurs epitaxially while maintaining a single crystal structure. These novel NW heterostructures, which are different from NW axial and radial heterostructures, will be useful as nanoelectronic and photonic building blocks to control the generation and transport of carriers and photons in three dimensions.

4. Properties, potential applications and novel devices of InS;0.5%Ho nanostructures

4.1 Optical Properties

4.1.1 Photoluminescence.

As reported in the literature, two emission bands are generally observed for a large number of different formal InS nanostructures synthesized by different methods, due to excitonic and trapped state luminescence.[30] Shen and co-workers reported the production of single-crystal InS microbelts by a

modified thermal evaporation method, in which an adiabatic layer was used to provide a sharp temperature drop and high gas concentration for microbelt growth.66 These microbelts are typically tens of thousands of micrometers long, up to 10 μm wide, and about 70 nm thick,

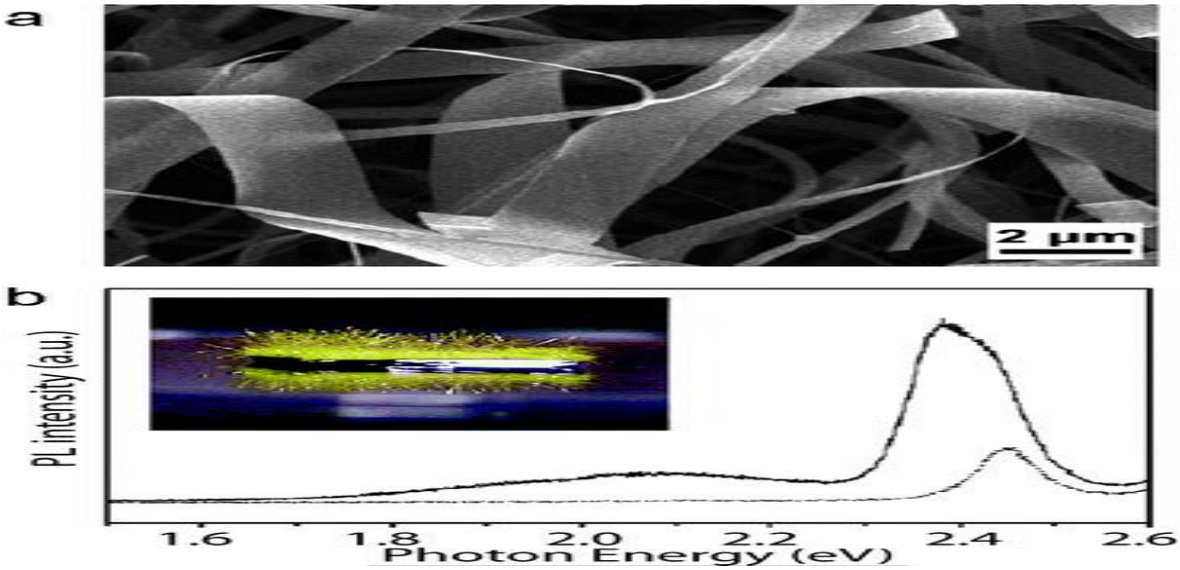


Figure 12 (a) SEM image of InS microribbons synthesized by a modified thermal evaporation method in the presence of Au catalysts; (b) PL spectra of InS microribbons and microrods

As shown in Figure 12a. As illustrated in Figure 12b, two emission bands were detected after RT photoluminescence (PL) examination, namely, a sharp and strong emission band located at 2.38 eV (521 nm) and a weak and broad emission centered at 2.07 eV (599 nm). These authors suggested that the strong emission originated from the recombination of free excitons. The weak emission was attributed to deep levels associated with S vacancies, extrinsic defects, and impurities.66 Zhao and co-workers prepared multi-armed CdS nanorods via a simple surfactant-ligand co-assisted solvothermal process. The length of the InS nanorods was controlled from 100 nm to micrometers by varying the relative concentrations of dodecylthiol and EDA. A strong emission peak centered at 710 nm was observed in the PL spectrum, which the authors attributed to the self-activated emission of CdS.109 Zou and co-workers reported strong near-band edge (NBE) emission and weak red emission at approximately 502–520 nm and 716 nm, respectively, from high-quality 6-fold symmetry branched InS nanostructures. The authors demonstrated that the red emission arises from the transitions of electrons trapped in surface states to the valence band of InS crystals.[32].

4.1.2 Cathodoluminescence.

Cathodoluminescence (CL) is an optoelectric phenomenon in which an electron beam is generated by an electron gun and interacts with a luminescent material such as a phosphor, causing the material to emit light. Due to the high spatial resolution and structural information obtained using secondary electron (SE) imaging, it is a useful technique for characterizing nanostructure optical properties.[11] Recently, we have prepared high-quality, uniform InS micro/nanostructures with various morphologies—microrods, nanowires, and submicrowires—through a facile and efficient thermal evaporation process and systematically investigated their cathodoluminescence and field emission properties.9 Representative morphologies and structures of the produced InS micro/nanostructures were analyzed by SEM. Figure 13a is an SEM image of the product obtained at 800 °C using 20 nm Au nanoparticles as a catalyst. The microrods are elements with diameters of approximately ... 500–1200 nm and lengths up to several micrometers, and exhibit hexagonal-like cross-sections. With decreasing substrate temperature and without the use of a catalyst, the morphology changes from microrods to nanowires. The SEM image in Figure 13b shows that the InS nanowires consist of branched nanostructures with needle-like tips. When the source temperature is increased (850 °C) and 10 nm Au nanocrystals are used as catalysts, submicrowires are formed. SEM images (Figure 13c) show that the

submicrowires have a relatively uniform diameter of 450 nm and a circular cross-section. The diameters can be effectively controlled by varying the temperature (the latter depends on the distance between the sources and the substrates). Figure 13d depicts the SEM image of submicrowires with a diameter of about 200 nm prepared at a lower substrate temperature (compared to sample c) while keeping other experimental conditions unchanged. The diameters of the wires decrease, but their lengths do not change. All InS nanostructures are single crystals with a hexagonal wurtzite structure grown in the [001] direction. For the InS nanowires, various defects are visible along the nanowire and the defect concentration decreases towards the tip. Detailed growth conditions and structural features are presented in reference 9 .

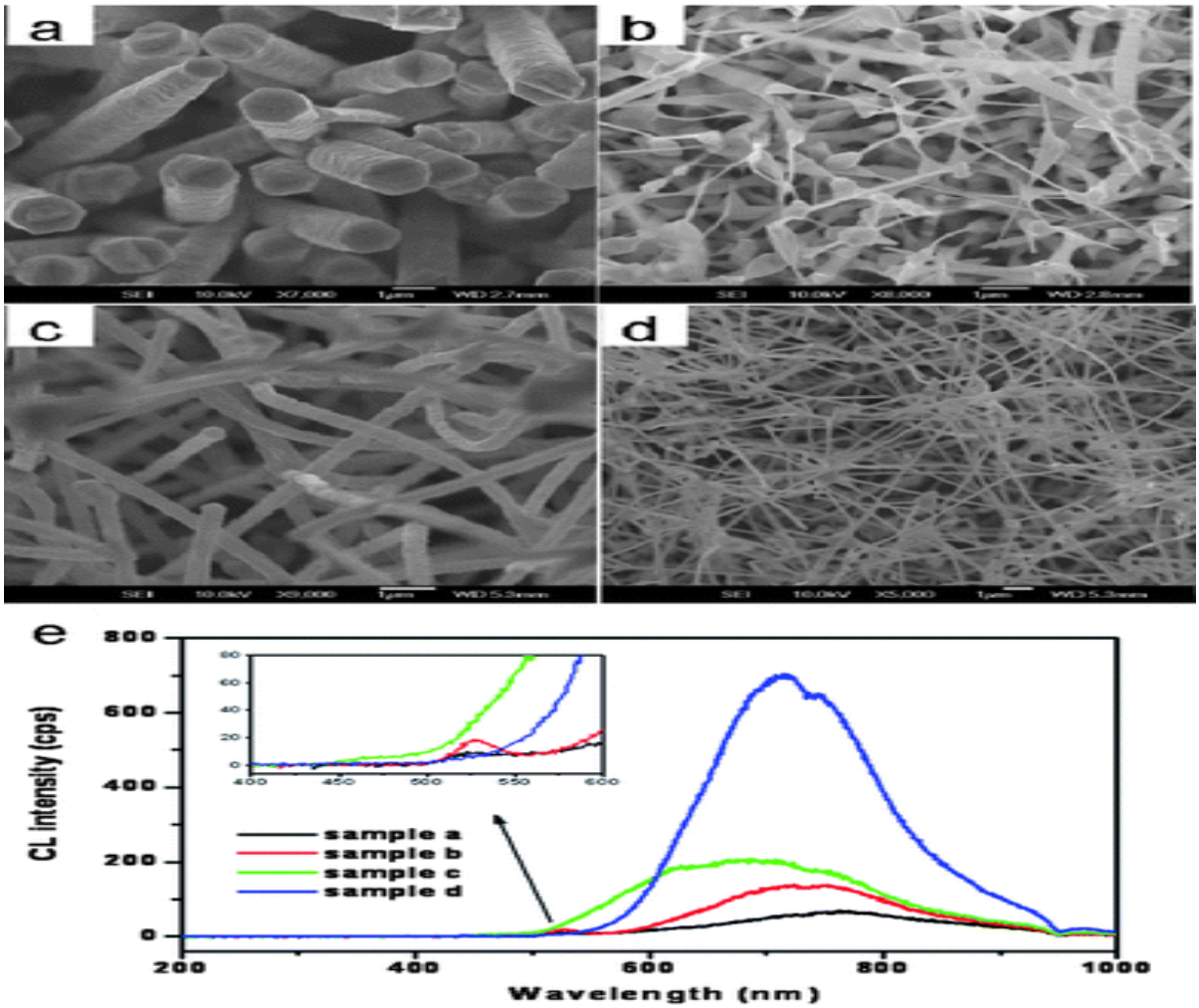


Figure 13 Typical SEM images of several InS micro/nanostructures prepared by a facile and efficient thermal evaporation process: (a) microrods; (b) nanowires; (c) thick submicrowires; (d) thin submicrowires;

Figure 13e shows four typical CL spectra taken from four representative nanostructures: microrods, nanowires, thick and thin submicrowires. Two typical emission peaks (a weak luminescence emission peak at 525 nm (527 nm for nanowires) and a broad emission at 764 nm (735 nm for nanowires)) are observed in the CL spectra of microrods and nanowires, respectively, which are attributed to NBE and defect level (DL) emissions. In the thick and thin submicrowires, only DL emission is present and NBE emission is not detected. The absence of NBE emission from these submicrowires suggests that they are prone to many internal defects, such as voids and interstitials, which create new energy levels and thus inhibit NBE emission. To study the spatial variation of optical properties and to gain insight into the origin of DL emission, we recorded CL spectra at points of different diameters on a series of

individual nanowires (Fig. 14a–c). A significant decrease in the DL/NBE intensity ratio is observed along the tapered nanowire towards the smaller diameter part (Fig. 14e). We hypothesized that the origin of DL is related to the unique defect distribution in the nanowire bodies, as confirmed by HRTEM. As the diameter decreases, the defect concentrations decrease, thus the DL emissions decrease[.9].

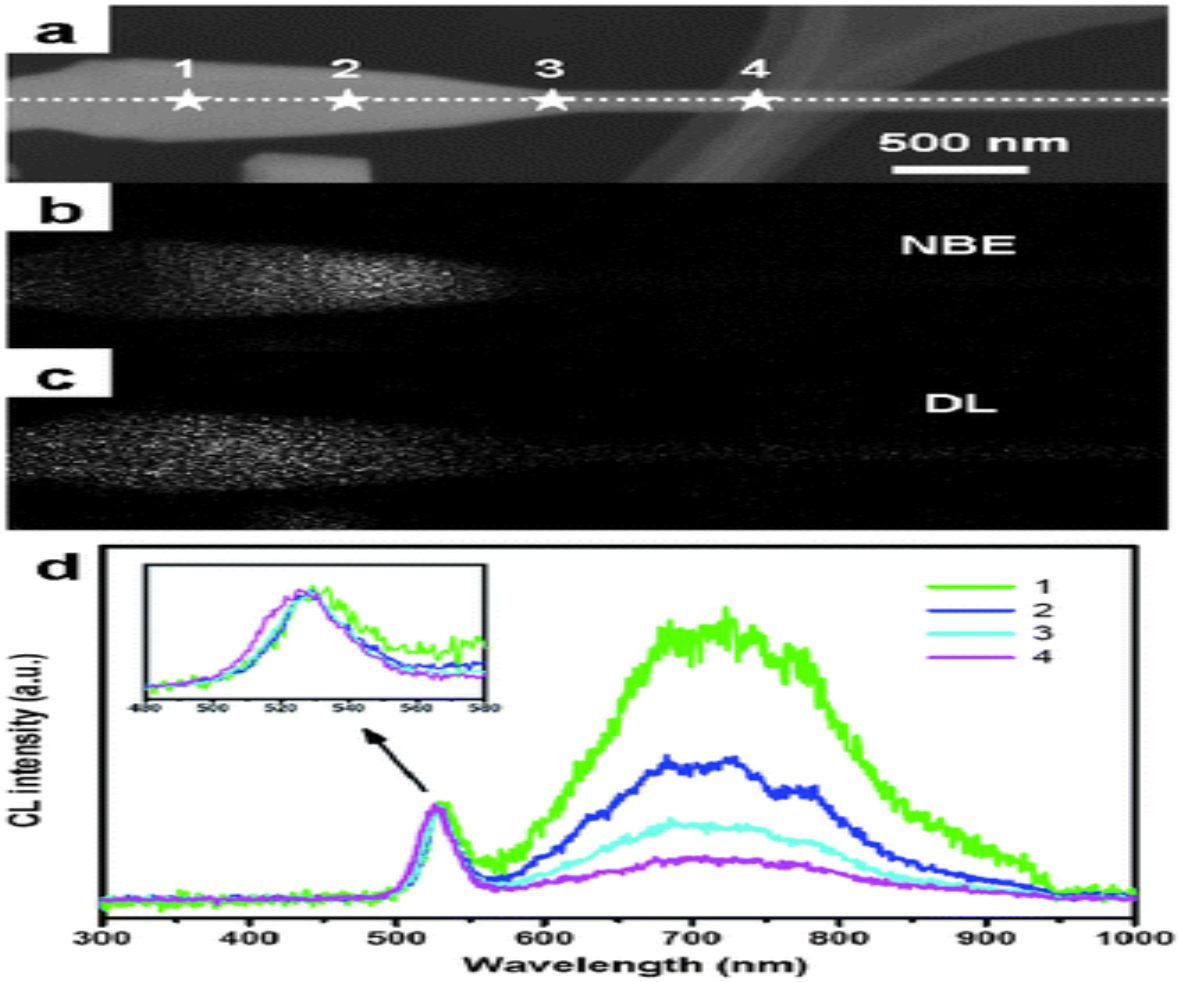


Fig. 14 (a) SEM image of a four-spot nanowire marked with white "stars". (b, c) Corresponding CL images recorded at 530 nm and 725 nm; (d) CL spectra from the four spots using the intensity normalized to the NBE emission peak, respectively.

4.1.3 Optically driven lasers.

Flat-ended nanowires can be used as optical resonant cavities to generate coherent light at the nanoscale. Yang and co-workers first observed room-temperature UV lasing from arrays of ZnO nanorods grown on sapphire substrates using the VLS method.112 As previously shown, we prepared highly ordered InS nanostructure arrays, and their uniform size and good crystallinity indicated that stimulated emission or lasing could be realized in them under high excitation. Figure 15a shows the power-dependent PL spectra of quasi-aligned InSNW arrays excited by femtosecond laser pulses with different power densities at room temperature. At low excitation intensities, a broad and weak band appears at 500.1 nm (2.480 eV), which is attributed to spontaneous exciton transitions in the InS band gap. When the excitation power density is increased to ~5.1 × 10−4 J cm−2, a new sideband appears at 515.6 nm (2.405 eV) on the lower energy side of the broad main band. This sideband, with a redshift of ~75 meV, is assigned to the E-2LO phonon band, since the 2LO phonon energy (about 76 meV) is close to the observed redshift and larger than the thermal energy available at room temperature (~26 meV). The full width of this peak was 5 nm, which was lower than that of spontaneous exciton emission, and the output

intensity increased rapidly, indicating the lasing effect. Figure 15b shows the dependence of the emission intensity on the excitation power for spectral positions at 500 and 516 nm. It is clear that the PL intensity at 500 nm has an approximately linear increase with increasing excitation power, while the emission intensity at 516 nm has a superlinear dependence on the excitation power, with an emission threshold of 4.5 × 10−4 J cm−2. The supralinear increase in emission intensity is characteristic of enhanced stimulated emission and lasing. We also investigated the lasing threshold of other InS nanostructures. It was found that well-aligned nanorod arrays had a lower threshold (0.8 × 10−4 J cm−2) than well-aligned truncated nanocone arrays (1.2 × 10−4 J cm−2), well-aligned slit-nanoroid arrays (1.0 × 10−4 J cm−2), and quasi-aligned nanorod arrays (4.5 × 10−4 J cm−2). We did not observe the stimulated emission phenomenon in the nanowire arrays (sample e). We suggested that the laser threshold mainly depends on the orientation of the array. Samples a–c had similar orientations, which led to similar low thresholds. Sample d had the worst orientation, which resulted in a higher threshold. When the alignment was disturbed, stimulated emission was not observed.

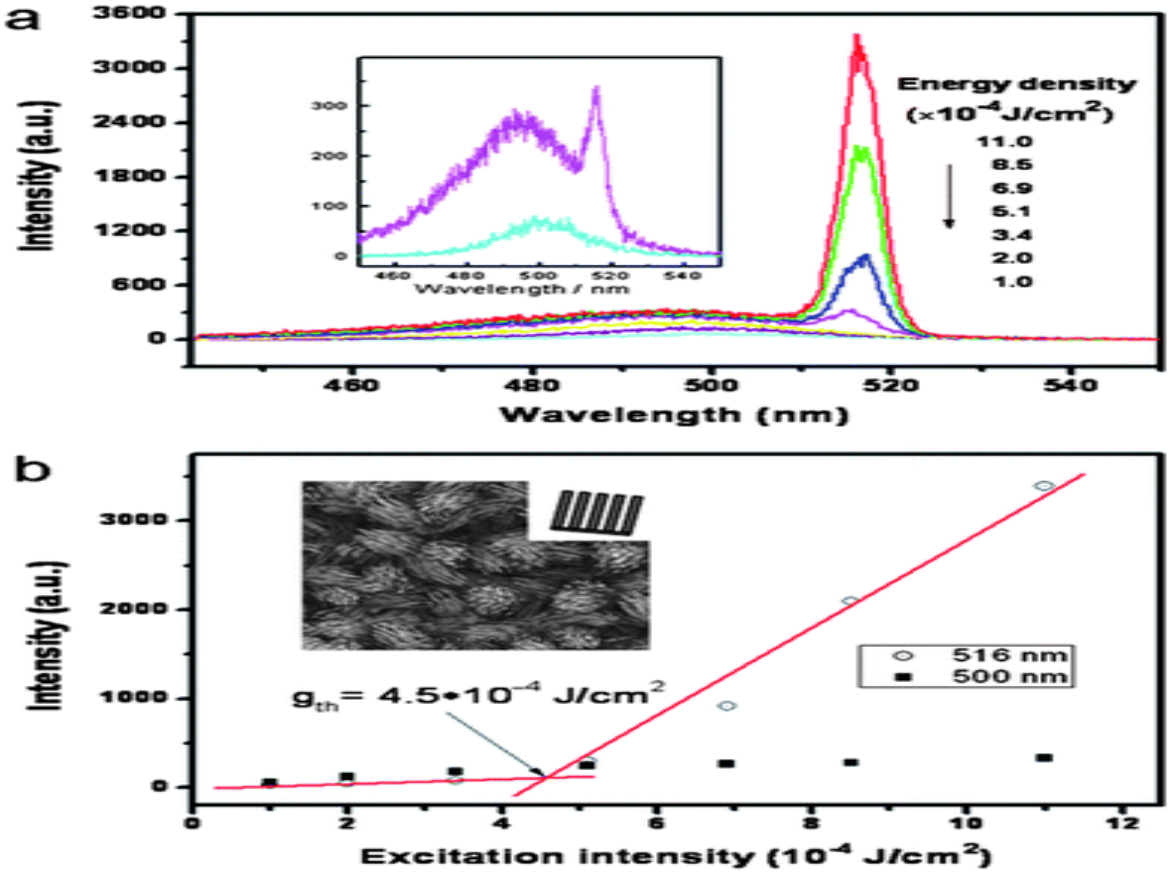


Figure 15 (a) Power-dependent PL spectra of quasi-aligned CdS nanowire arrays excited by a femtosecond laser with different excitation power densities at room temperature; the inset shows a zoom of the two curves at 1.0 × 10−4 and 5.1 × 10−4 J cm−2; (b) dependence of the emission intensity on excitation power for spectral positions at 500 and 516 nm.

4.1.4 Electrically driven lasers.

Electrically driven semiconductor lasers are used in a variety of technologies, from telecommunications and information storage to medical diagnostics and therapeutics. Lieber and co-workers first applied nanoscale injection lasers based on single InS nanowires and described a powerful approach for the fabrication of integrated electrically controlled photonic devices in 2003.12,113 The devices were fabricated by stacking InSNWs on heavily doped p-Si on insulator substrates, followed by electron beam (EB) lithography and EB deposition of 60–80 nm Al2O3, 40 nm Ti, and 200 nm Au. As shown

in Figures 16a and 16b, one end of the NW was left open for emission output from the device. This structure created the hybrid n-InS/p-Si heterojunctions required for the injection device. RT electroluminescence images (Figure 16b) produced from these hybrid structures in a forward-biased manner demonstrate strong emission from the exposed InS nanowire ends. Measurements of the NW and electroluminescence intensity versus current (Fig. 16c) showed an initial increase in intensity at about 90 μA, followed by a more rapid and highly nonlinear increase at about 200 μA. At low injection currents, the final emission spectrum (Fig. 16d) revealed a broad peak with a FWHM ≈ 18 nm, consistent with spontaneous emission, but above 200 μA the spectrum quickly collapsed into a limited number of very sharp peaks with a dominant emission line at 509.6 nm. The sharp peaks arose from only a portion of the spontaneous emission spectrum and were spaced about 1.8 nm apart, consistent with the February–Perot gap regime for the length of the nanowire device. These observations provided strong evidence for elongation from single nanowire injection structures at RT[.12].

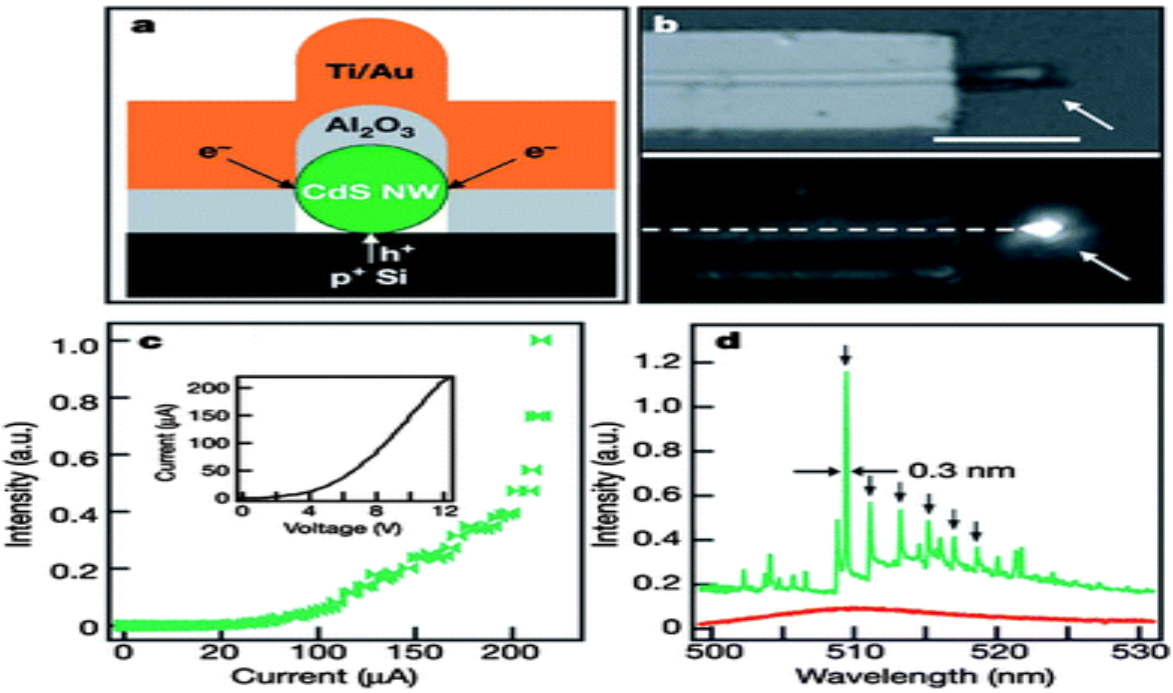


Figure 16 Nanowire electric injection laser: (a) Schematic illustration showing the cross-section of the device structure. (b) The top panel shows the optical image of the device depicted in (a). The bottom panel shows the electroluminescence image recorded from this device at RT with an injection current of approximately 80 μA. (c) Emission intensity versus injection current. (d) Electroluminescence spectra obtained from the nanowire tip with injection currents of 120 μA (red) and 210 μA (green)

4.1.5 Waveguides.

InS;0.5%Ho nanostructures with cavities are expected to act as waveguides to guide and manipulate light on the subwavelength scale. The groups of Yang and Lieber have done pioneering and groundbreaking work on ZnO nanowires, SnO2 nanoribbons, and InS nanowells. These structures can successfully function as optical waveguides to integrate subwavelength photonic components. Zou and colleagues quantitatively and systematically investigated the controlled band-edge luminescence through individual InS nanoribbons by imaging the spatially localized PL intensity and simultaneously recording the PL spectra at different travel distances using near-field scanning optical microscopy (NSOM).41 Their results showed that locally produced band-edge PL could be efficiently transported over a distance of several hundred micrometers along a single InS nanoribbon (Figure 17a). As shown in Figure 17b, the emission bands showed a significant redshift with increasing travel distances.

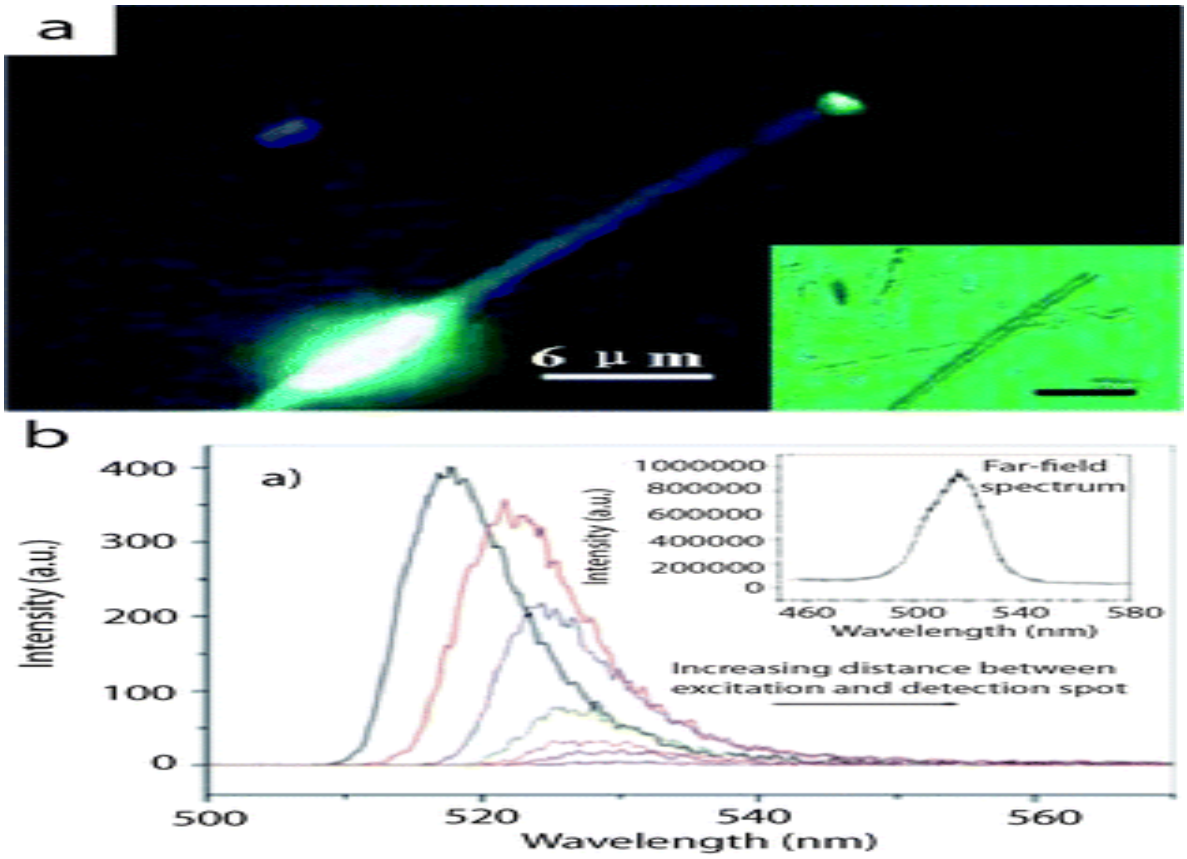


Figure 17 (a) Far-field optical image of an excited InS nanoribbon; (b) Near-field scanning optical microscopy (NSOM) band-edge PL spectra detected at various points along the nanoribbon with a collection tip at the top and an excitation laser beam.

4.1.6 Electro-optic modulator (EOM).

Electro-optic modulators (EOMs) are used to modulate the output of semiconductor lasers. Lieber and co-workers first reported the integration of EOMs into nanowire laser cavities and demonstrated electric field modulation of the laser in InSNW lasers.116 The InSNWs were single crystals with a diameter of about 100 nm and a length of more than 10 µm. The EOM devices with a parallel plate structure (Figure 18a) were placed in a uniform electric field along the length L of the nanowire. Figure 18b shows the output signal modulation of a representative InSNW-EOM with L = 6 µm and SiO2 dielectric layer thickness ttop = tbot = 50 nm, which shows that the exciton laser line (489 nm) is significantly attenuated and there is no resolvable change in the peak wavelength when the applied voltage, V, is varied from 0 to 30 V, while the spontaneous emission feature (514 nm) shows a smaller attenuation. For a given wavelength and V, the modulation, M, is given by (ION/IOFF) − 1, where ION and IOFF are the intensities with and without V. The M vs. V plots for both the exciton laser line and the free electron-bound hole (FEBH) feature (Figure 18c) show a linear dependence on V over the tested ±50 V range. In particular, the 489 nm laser line is modulated by 40% at 45 V, which is a modulation of > 2 × FEBH feature

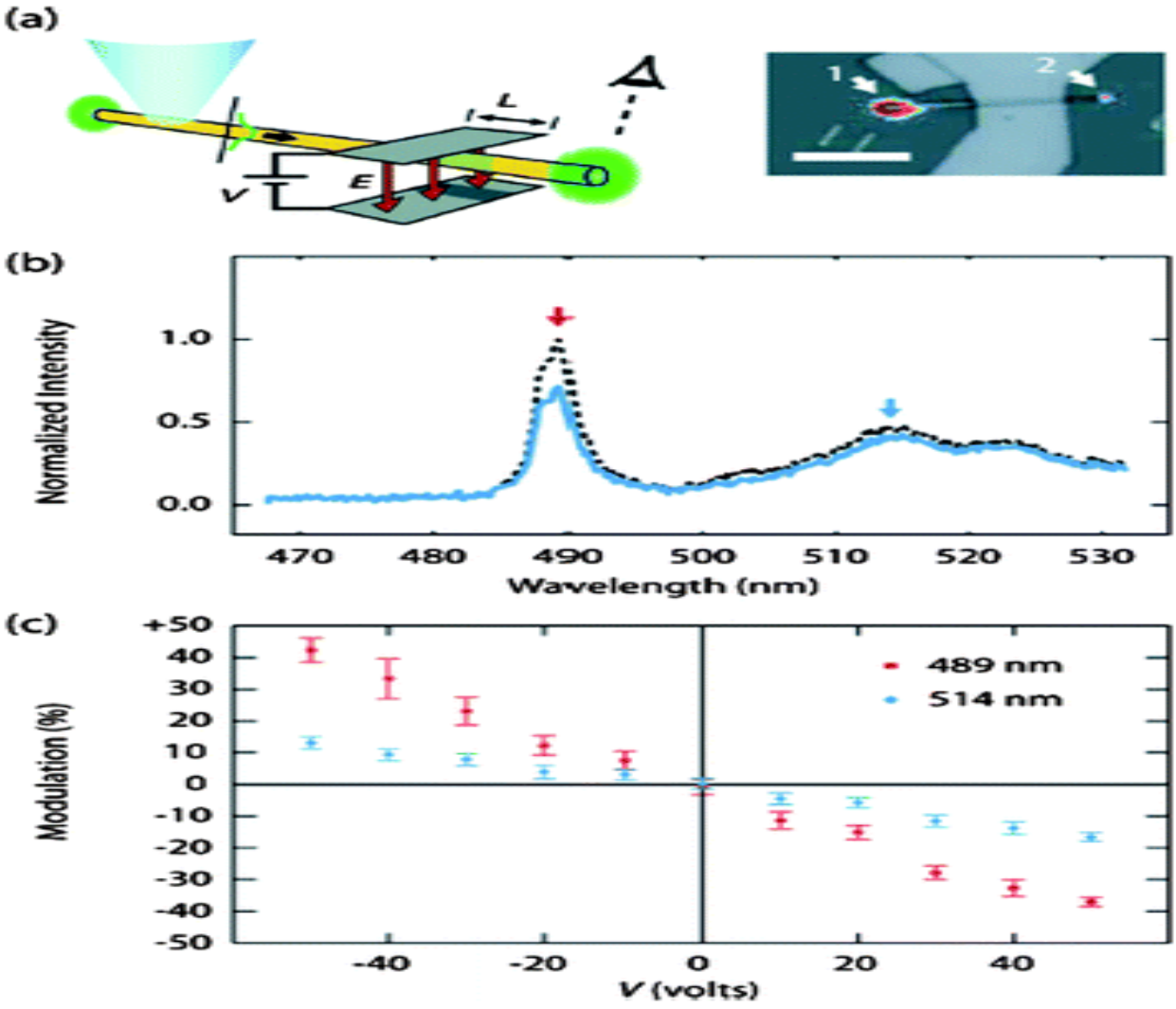


Figure 18 (a) Diagram showing the excitation site, field modulation region, and observed northwest tip; (b) Emission spectrum of the InSNW laser showing the effect of a 30 V signal; (c)

4.1.7 Electrochemiluminescence (ECL) shown in (b).

Electrochemiluminescence (ECL) involves the formation of species on electrode surfaces that then undergo electron transfer reactions to form excited states that emit light. Zhu and co-workers reported stable and highly enhanced ECL from InSNTs prepared by a double-template method.119 These NTs had an outer diameter of 140 nm and an inner diameter of 100 nm. As shown in Figure 19a, they consisted of small nanocrystalline particles with a diameter of 7–8 nm. The ECL behavior of InSNTs on a carbon paste electrode in aqueous solution was studied using conventional cyclic voltammetry (CV). Figure 19b shows the EkL emission of InSNTs under continuous potential scanning for six cycles. The electrode potential was cycled between 0.1 V and −1.2 V at a scan rate of 100 mV s−1. As the electrode potential became more negative, electrons were injected into the InS nanocrystals and electrogenerated anion radicals (InS−˙) were formed. At the same time, S2O82− ions were added as co-reactants to generate the strong oxidant SO4−˙. The resulting sulfate radicals could react with the negatively charged InS nanocrystals to form excited states and then produce high-intensity light emission.

$$S_2O_8^{2-} + e^- \rightarrow SO_4^{2-} + SO_4^{-\cdot}$$

$$İnS^{-\cdot} + SO_4^{2-} \rightarrow İnS^* + SO_4^{2-}$$

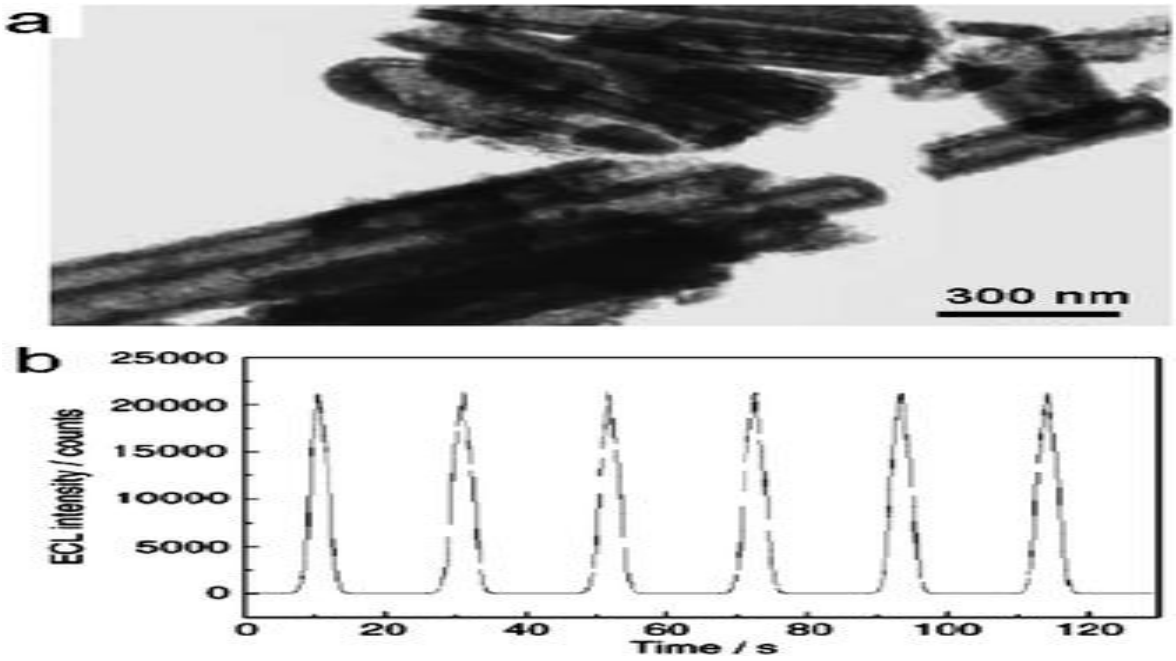


Figure 19. (a) SEM image of InS nanotubes prepared by the double-template method; (b) ECL emission from CdS nanotubes in 0.1 M K2S2O8 + 0.1 M KOH aqueous solution containing 0.1 M KCl under continuous cyclic voltammetry for six cycles.

The light emission in the ECL curve showed quite good stability and increasing intensity, which can be attributed to the aggregation morphology of İnSNTs and the addition of co-reactant. InSNTs consisting of compact nanocrystals exhibited strong ECL, which may find useful applications in biosensing.

4.2 Solar cells

Solar energy is one of the most abundant and at the same time the least utilized renewable energy sources. Of particular interest for the development of efficient solar cells is the use of novel device structures and materials to achieve acceptable efficiencies.120 Recently, Javey and co-workers demonstrated a novel photovoltaic structure (Figure 20a) that incorporates 3D single-crystal n-InS nanopillars (Figure 20b) embedded in polycrystalline p-CdTe thin films. The device provides high light absorption and efficient carrier collection.121 An optical image of a fully fabricated n-InS/p-CdTe nanopillar solar cell (SNOP) with an active surface area of 5 × 8 mm is shown in Figure 20c. The performance was characterized using a heat-transfer-free solar simulator (LS1000, Solar Light). Figure 20d shows the I–V characteristics of a typical cell under different illumination intensities P ranging from 17 to 100 mW cm−2 (AM 1.5 G). The efficiency (η) was ~6% under 1.5 G AM illumination with an open-circuit voltage Voc ~ 0.62 V, a short-circuit current density Jsc ~ 21 mA/cm−2, and a fill factor FF ~ 0.43 (Fig. 20e, f). These results were better than most of the nanostructured material-based photovoltaic systems reported in the literature. Based on the simulation results, the authors suggested that the efficiency could be easily improved in the future by further optimizing the devices and materials, for example, by using top contacts with higher optical transparency and lower parasitic resistance.

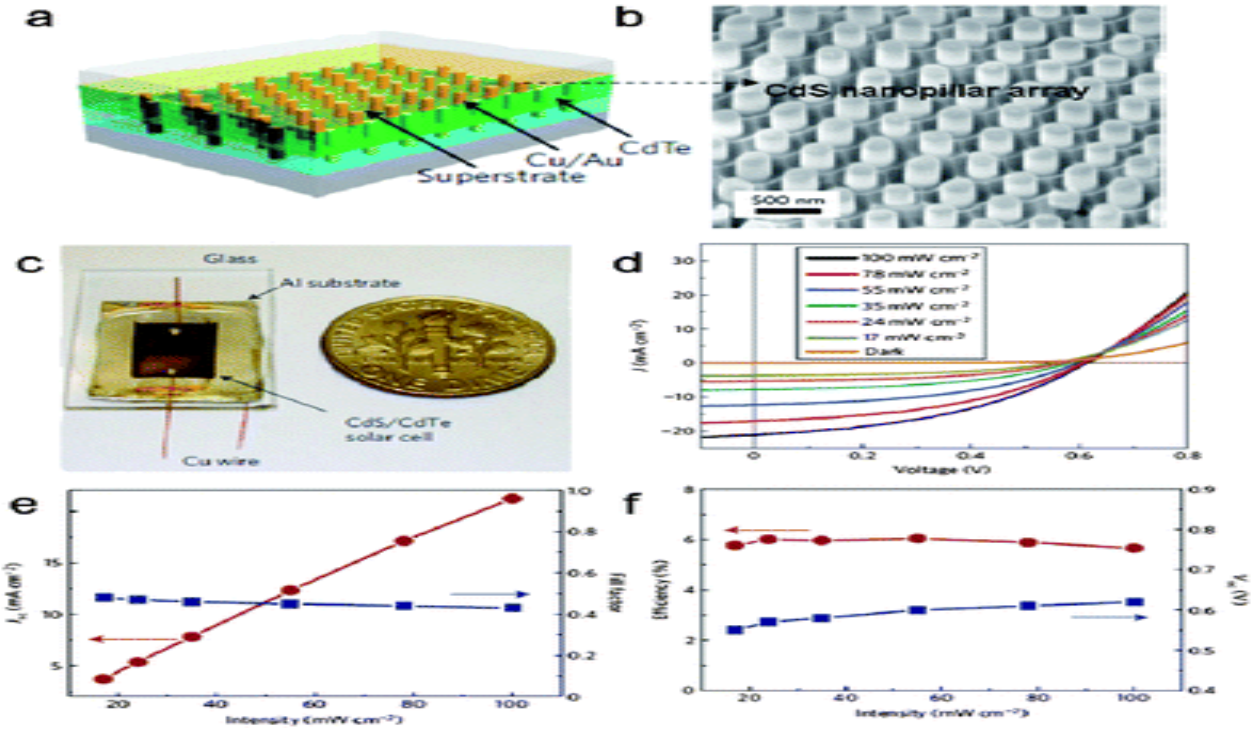


Figure 20 (a) Schematic diagram of CdS/CdTe solar nanocolumn (SNOP) elements; (b) SEM image of CdS nanocolumn arrays; (c) Optical image of a fully fabricated SNOP element bonded to a glass substrate; (d) I–V characteristics at different illumination intensities; (e) The short-circuit current density, Jsc, shows an almost linear dependence on the illumination intensity, while the fill factor, FF, decreases slightly with increasing intensity

4.3 Field-effect transistors (FETs)

4.3.1 Metal-insulator-semiconductor field-effect transistors (MIFETs). InS nanostructures have been incorporated into field-effect transistors (FETs) to serve as the basic building blocks of electronic devices such as logic gates, computing circuits, and sensors. Briefly, the fabrication process can be described as follows. The nanowires are first dispersed in a solvent and then deposited on a SiO2/Si substrate. The sub-substrate beneath the SiO2 layer is then degenerately doped (p++ or n++) and serves as a back gate. Two metal contacts corresponding to the source and drain electrodes are defined by either photolithography or electron beam lithography, followed by evaporation of the corresponding metal contacts. This SET is a metal-insulator-semiconductor field-effect transistor (MIYSET), shown in Figure 21a. Dai and co-workers prepared high-quality n-type InS NBs by in-situ doped CVD and incorporated them into MIYSETs (Figure 21b). The electron concentrations and mobilities of these InS NBs were around 1.0 × 1016–3.0 × 1017 cm−3 and 100–350 cm2 V−1 s, respectively. The on-off ratio at RT was greater than 108, and the subthreshold swing was less than 65 mV/decade.

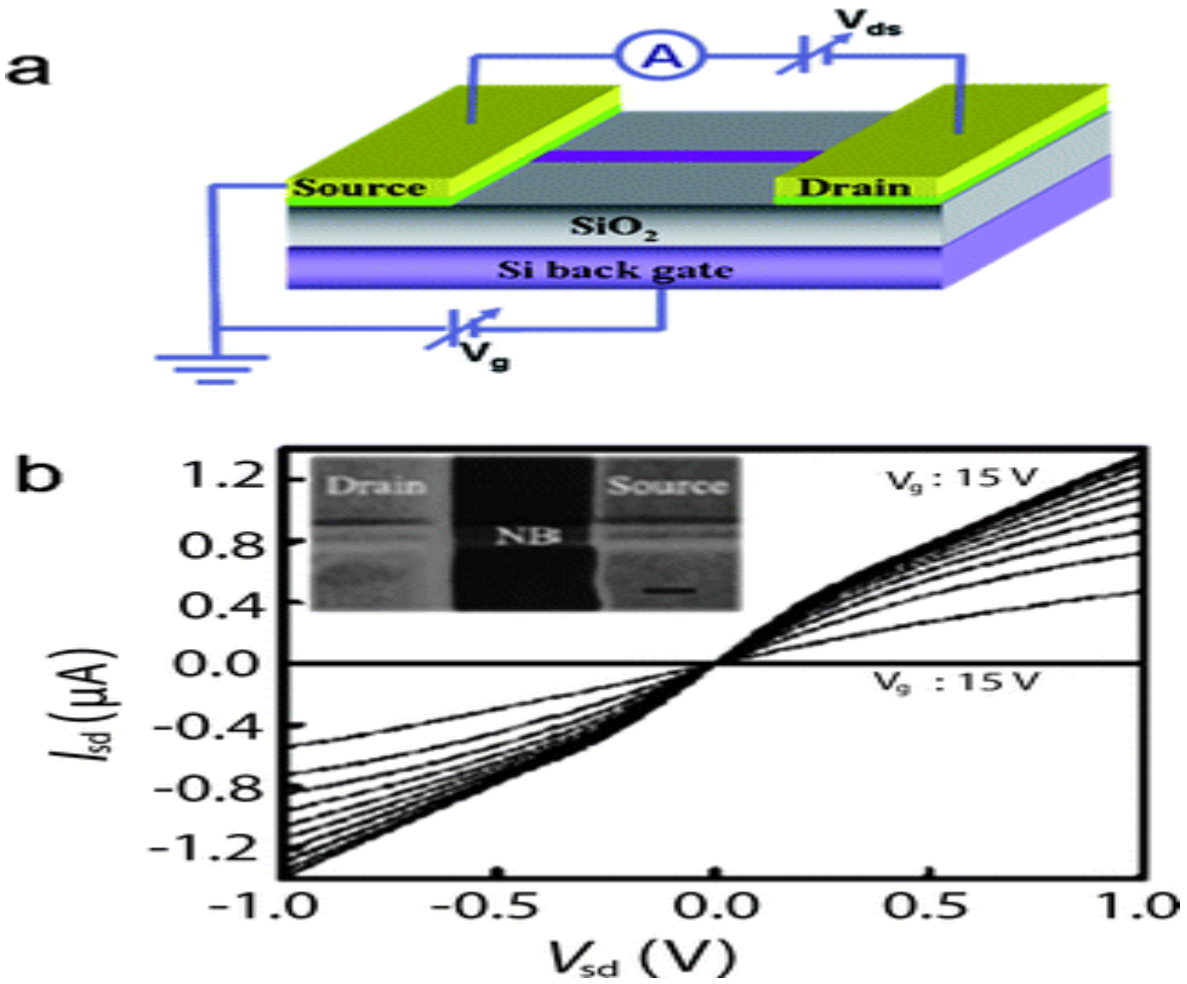


Figure 21 (a) Schematics of a single NW FET; (b) SEM image of a single CdS NB MISFET and Isd–Vsd curves with Vg from −15 V to 15 V. Reprinted with permission from reference

4.**3.2 Metal–semiconductor field-effect transistors (MSFETs**).

The metal–semiconductor field-effect transistor (MSFET) is another important type of FET. Unlike the MYSET, the source-to-drain current in the MYFET is controlled by the Schottky gate. The performance of the MYFET is determined by the quality of the Schottky and ohmic contacts with the semiconductor. Dai and co-workers have fabricated MESFETs based on single InS NBs (Figure 22a).125–127 Single InS NB MESFETs exhibit n-channel (normally depletion mode), low threshold voltage (∼1.56 V), high conductance (∼3.5 μS), low subthreshold swing (∼45 mV/decade), and high current ratio (∼2 × 108) (Figure 22b).

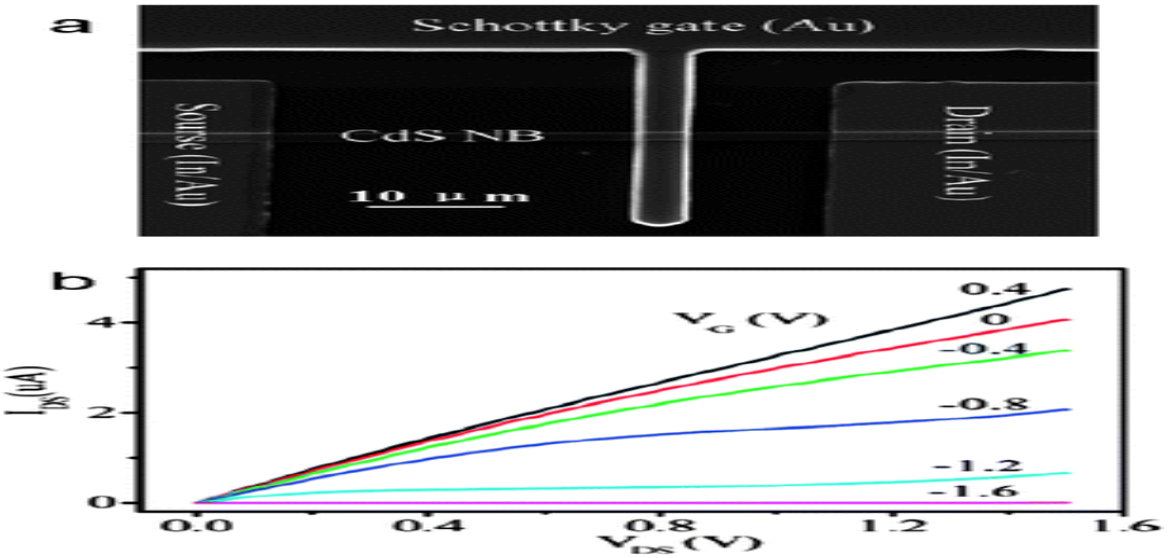


Figure 22 (a) SEM image of a single InS NB MYSET; (b) Ids–Vds curves measured at different gate voltages. Reproduced with permission from ref.

4.3.3 Logic circuits.

Field-effect transistors with electrically controlled “on” and “off” switching functions are the basic building blocks for building higher-level circuits such as logic gates, which are essential components in integrated computing circuits.128 Dai and co-workers have designed and fabricated high-performance NOT logic gates (inverters), NOR gates, and NAND gates on InSNWs.62,69,129 The key components of these devices are high-performance MYSETs fabricated on single InSNWs, where the best Schottky gates are used, as shown in Figure 23.

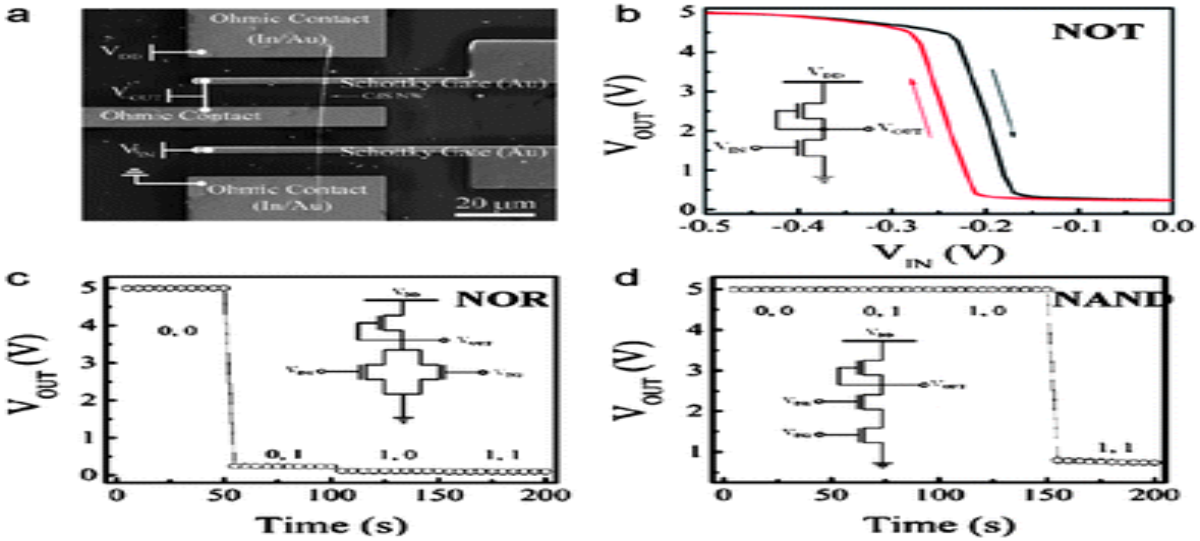


Figure 23 (a) SEM image of an inverter (NOT a logic gate) fabricated on a single CdSNW; (b) Transfer characteristic of the inverter depicted in (a); (c, d)

Among all nanoscale devices, photodetectors are of great importance for applications such as binary switches, imaging techniques, and lightwave communication, as well as future memory and optoelectronic circuits. With their large surface-to-volume ratios and small dimensions and comparable Debye lengths, 1D discynanoastructures are widely used as visible-light photodetectors with high sensitivity and selectivity. For example, individual discynanoribbons based on visible light, photodetectors with high photosensitivity and high photoconductivity, were reported by Li et al. in 2006.74 The CPC nanoribbons used in the experiments were grown by CVD. The width and thickness

of the nanoribbons ranged from 2–40 μm and 10–60 nm, respectively. Parallel Ti/Au electrodes were placed on the nanoribbons dispersed on a SiO2/Si substrate and the exposed part of the ribbon was exposed to incident light as shown in the inset of Figure 24a. Figure 24a shows the current–voltage (I–V) characteristics of an InS nanoribbon (approximately 10.4 μm wide and approximately 30 nm thick) illuminated with light at different wavelengths (λ). The approximately linear shape of the curves indicates good ohmic contacts between the nanoribbons and the electrodes. It is worth noting that the photoconductivity (Gpho) at zero bias is strongly dependent on wavelength: Gpho = 0.793 nS for λ = 500 nm and 128 nS for λ = 490 nm, compared to Gpho = 0.021 nS measured in the dark. Figure 24b shows the time response of the CdS nanoribbon-based device to pulsed incident light (490 nm). This indicates that the CdS nanoribbon has a very fast response to incident light. It also exhibits excellent stability and reproducibility. Upon closer inspection, the rise and fall times are found to be 747 μs and 794 μs, respectively. Furthermore, the absorption of gases (mainly oxygen) from the environment can significantly change the light sensitivity of CdS nanoribbons. These experiments indicate that InS nanoribbons could be an ideal material for highly sensitive and high-speed nanoscale photodetectors and photoelectron switches.

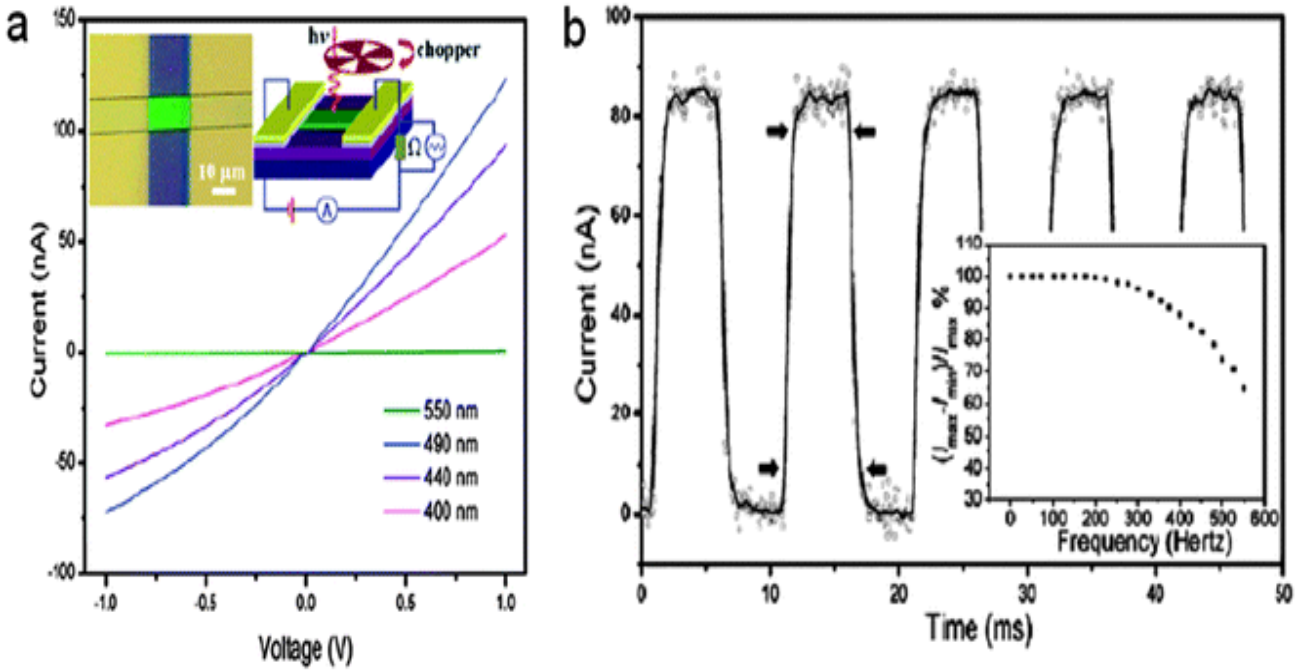


Figure 24 (a) I–V curves of a single InS nanoribbon illuminated with light of different wavelengths; (b) Time response of a İnS nanoribbon to pulsed incident light (490 nm, 1.8 mW cm−2)

5. Conclusions and Perspectives

This article presents a recent review of the current progress in the study of one-dimensional InS nanostructures, from synthesis and properties to applications. Of course, due to the wide scope of the study and space limitations, it is not possible to cover all the interesting works in this field. The study of these doped InS nanostructures will continue to be exciting and highly rewarding; however, most of such nanostructures and their applications are still in the early stages of technical development. There will undoubtedly be many innovations and solutions on the way to their practical integration into nanotechnology. However, many issues need to be resolved before that happens. There are still significant challenges to develop a simple, efficient, and inexpensive technology for the synthesis of InS nanostructures in high quality and large quantities; remaining issues include, but are not limited to, reliable control of diameter, length, orientation, density, crystallization, and hierarchical stacking. Such a wealth of İnS nanostructures can provide a platform for fundamental research as well as further nanotechnology and nanotechnology developments.

Most nanodevices based on InS nanostructures are fabricated using a top-down approach using a combination of lithography, etching, and deposition. Undoubtedly, this technique is complex, time-consuming, and not cost-effective, thus hindering the development of practical approaches. Developing an efficient and low-cost approach for the construction of nanodevices with high performance characteristics remains a major challenge.

Techniques for integrating InS nanostructures into nanobiosensors and chemical sensors are also required.

References

1.C. M. Lieber and Z. L. Wang, (2007), MRS Bull., , 32, 99–104 CAS.

2.X. S. Fang, Y. Bando, U. K. Gautam, T. Y. Zhai, H. B. Zeng, X. J. Xu, M. Y. Liao, and D. Golberg, Crit.(2009) Rev. Solid State Mat. Sci., , 34, 190–223 Searched on PubMed.

3.D. Golberg, Y. Bando, C. C. Tang, and C. Y. Zhi, Adv. Mater.,(2007), 19, 2413–2432 CrossRef CAS.

4.Z. J. Gu, Y. Ma, T. Y. Zhai, B. F. Gao, W. S. Yang, and J. N. Yao, Chem.–Eur. J., (2006), 12, 7717–7723 CrossRef CAS.

5.M. Law, J. Goldberger, and P. D. Yang, Annu. Rev. Mater. Res.,(2004), 34, 83–122 CrossRef CAS.

6 BC. N. R. Rao, R. Voggu, and A. Govindaraj, Nanoscale(, 2009), 1, 96–105 RSC.

7.Y. N. Xia, P. D. Yang, Y. G. Sun, Y. Y. Wu, B. Myers, B. Gates, Y. D. Yin, F. Kim, and H. Q. Yan, Adv. Mater.,(2003), 15, 353–389 CrossRef CAS.

8.T. Y. Zhai, X. S. Fang, H. B. Zeng, X. J. Xu, Y. Bando, and D. Golberg, Pure Appl. Chem., accepted Search PubMed.

9.T. Y. Zhai, X. S. Fang, Y. Bando, B. Dierre, B. D. Liu, H. B. Zeng, X. J. Xu, Y. Huang, X. L. Yuan, T. Sekiguchi and D. Golberg, (2009)Adv. Function. Mater., , 19, 2423–2430 CrossRef CAS.

10.M. Zhang, T. Y. Zhai, X. Wang, Q. Liao, Y. Ma, and J. N. Yao, J. Solid State Chem., (2009), 182, 3188-3194 CrossRef CAS.

11.T. Y. Zhai, X. S. Fang, Y. Bando, Q. Liao, X. J. Xu, H. B. Zeng, Y. Ma, J. N. Yao, and D. Golberg, (2009)ACS Nano, , 3, 949–959 CrossRef CAS.

12X. F. Duan, Y. Huang, R. Agarwal, and C. M. Lieber, (2003), Nature, , 421, 241-245 CrossRef CAS.

13.N. V. Hullavarad, S. S. Hullavarad and P. C. Karulkar, J. Nanosci. Nanotechnol., 2008, 8, 3272–3299 CrossRef CAS.

14.Z. L. Wang, (2008).ACS Nano, , 2, 1987–1992 CrossRef CAS.

15.D. Moore and Z. L. Wang, J. Mater.(2006), Chem., , 16, 3898–3905 RSC.

16.X. S. Fang and L. D. Zhang, J. Mater.(2006), Sci. Technol., 22, 721–736 CAS.

17.C. J. Barrelet, Y. Wu, D. C. Bell, and C. M. Lieber, J. Am.(2003), Chem. Soc., , 125, 11498–11499 CrossRef CAS.

18.C. H. Ye, G. W. Meng, Y. H. Wang, Z. Jiang, and L. D. Zhang, J. (2002),Phys. Chem. B, , 106, 10338–10341 CrossRef CAS.

19.T. Y. Zhai, Z. J. Gu, Y. Ma, W. S. Yang, L. Y. Zhao, and J. N. Yao, Mater. (2006), Chem. Phys., , 100, 281–284 CrossRef CAS.

20.L. Y. Zhao, W. S. Yang, G. J. Zhang, T. Y. Zhai and J. N. Yao, (2003),Chem. Phys. Lett., 2003, 379, 479–483 CrossRef CAS.

22.C. N. R. Rao and A. Govindaraj,(2009) Adv. Mater., , 21, 4208–4233 CrossRef CAS.

23.X. P. Shen, A. H. Yuan, F. Wang, J. M. Hong and Z. Xu, Solid State Communications, 2005, 133, 19–22 CrossRef CAS.

24.L. F. Dong, J. Jiao, M. Coulter and L. Love, (2003), Chemistry. Physics. Lett., , 376, 653–658 CrossRef CAS.

25.T. Gao and T. H. Wang, J. (2004) Phys. Chemistry. B, , 108, 20045–20049 CrossRef CAS.

26.Z. L. Wang, Mater. Sci. Eng., R, 2009, 64, 33–71 CrossRef.

27.J. Puthussery, A. D. Lan, T. H. Kosel, and M. Kuno,(2008), ACS Nano, , 2, 357–367 CrossRef CAS.

28.Y. F. Lin, Y. J. Hsu, S. Y. Lu and S. C. Kung, (2006), Chem. Commun.,, 2391–2393 RSC.

29.S. Kar and S. Chaudhuri, J. (2006),Phys. Chemistry. B, , 110, 4542–4547 CrossRef CAS.

30.Y. Z. Long, Z. J. Chen, W. L. Wang, F. L. Bai, A. Z. Jin, and C. Z. Gu(2005), Appl. Physics. Lett., , 86, 153102 CrossRef.

31.S. C. Yan, L. T. Sun, P. Gu, N. P. Huang, Y. C. Song, and Z. D. Xiao, J.(2009) Solid State Chem., , 182, 2941–2945 CrossRef CAS.

32.N. Yuan, G. Cheng, Y. Q. An, Z. L. Du, and S. X. Wu, Nanoscale Res. Lett., 2009, 4, 414–419 Search PubMed.

DIGITAL TRANSFORMATION OF INTEGRATED SCIENCE EDUCATION: FROM COMPUTATIONAL THINKING TO INTELLIGENT LEARNING SYSTEMS

Moses Adeolu AGOI1

Lagos State University of Education, Lagos Nigeria.

https://orcid.org/0000-0002-8910-2876

Olawale Adejumo OSUNLOYE2

Lagos State University of Education, Lagos Nigeria.

Faith Oghenewveta ALUKO3

Lagos State University of Education, Lagos Nigeria.

&

Oluwanifemi Opeyemi AGOI4

Obafemi Awolowo University, Osun Nigeria.

https://orcid.org/0009-0007-9461-8870

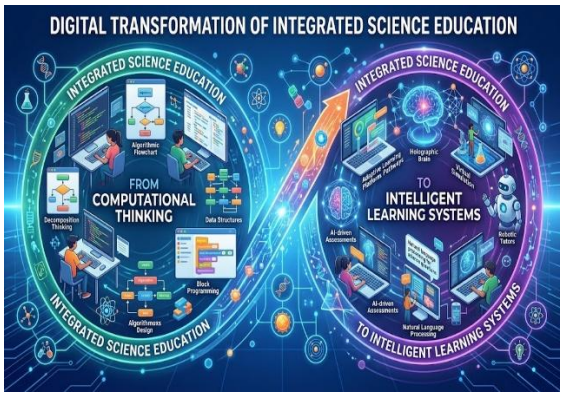
Abstract

The digital transformation of education is reshaping how scientific knowledge is represented, taught, assessed, and applied, creating new opportunities for the development of Integrated Science education. This paper examines the transformation of Integrated Science education from foundational computational thinking (CT) to intelligent learning systems (ILS) capable of supporting adaptive, data-informed, and personalised learning. The paper conceptualises digital transformation as a progressive integration of computational problem-solving, digital simulations, artificial intelligence (AI), learning analytics, adaptive technologies, and intelligent educational platforms within science teaching and learning. A descriptive, computationally supported research design was adopted for the study, with a generated dataset of 500 learners used to demonstrate the potential effects of digitally transformed Integrated Science instruction. The proposed framework considers computational thinking, digital scientific inquiry, artificial intelligence literacy, adaptive learning, learning analytics, and intelligent learning environments as interconnected dimensions of contemporary science education. Existing evidence indicates that computational thinking can strengthen learners' problem-solving, creative, and critical-thinking capabilities, particularly when integrated across subject domains, including science (Ogegbo & Ramnarain, 2022; Lee et al., 2022). Recent research further indicates that intelligent learning systems can provide adaptive instructional support, learner modelling, automated feedback, and data-driven decision-making in primary and secondary education (Cerón Salazar & Burbano González, 2026). The study therefore argues that digital transformation should move beyond the simple adoption of technological tools toward an integrated ecosystem in which learners, teachers, data, computational methods, and intelligent technologies collaboratively support scientific reasoning and sustainable problem-solving. The proposed transformation provides a foundation for preparing learners for increasingly data-rich, automated, and intelligent societies.

Keywords: Artificial Intelligence; Computational Thinking; Integrated Science; Intelligent Learning Systems.

INTRODUCTION

Digital transformation is increasingly redefining the purposes, processes, structures, and outcomes of contemporary education by shifting instructional practice from conventional technology-assisted teaching toward interconnected, data-driven, adaptive, personalised, and intelligent learning environments. This transformation extends beyond the simple adoption of computers, digital learning platforms, or electronic instructional materials; rather, it represents a fundamental reconfiguration of how knowledge is accessed, constructed, represented, assessed, and applied. Within the broader Education 4.0 paradigm, digital technologies are progressively becoming embedded within pedagogical ecosystems characterised by automation, connectivity, artificial intelligence, data analytics, adaptive learning, virtual environments, and intelligent decision-making (Mukul & Büyüközkan, 2023). This development is particularly important for Integrated Science education because the subject is inherently interdisciplinary and requires learners to establish meaningful relationships among biology, chemistry, physics, earth science, environmental science, mathematics, and technology. Effective Integrated Science instruction therefore requires learning approaches that move beyond memorisation toward inquiry, experimentation, modelling, problem-solving, critical thinking, data interpretation, collaboration, and evidence-based decision-making. The increasing availability of digital technologies provides opportunities to redesign these learning processes by enabling learners to investigate scientific phenomena through simulations, virtual laboratories, interactive visualisations, digital data-collection tools, computational models, and intelligent learning platforms. An important intellectual foundation of this digital transformation is computational thinking (CT), which provides learners with a systematic approach to identifying, representing, analysing, and solving complex problems through processes such as decomposition, pattern recognition, abstraction, algorithmic thinking, modelling, automation, and evaluation. Although CT originated strongly within computer science, its relevance has expanded across disciplines because contemporary scientific investigation increasingly involves computational models, large datasets, digital simulations, algorithms, and automated analytical processes. In Integrated Science education, CT can therefore provide a bridge between conceptual scientific knowledge and the computational practices required to investigate contemporary scientific and technological problems. Ogegbo and Ramnarain (2022), in their systematic review of 23 studies, demonstrated the increasing relevance of CT within science classrooms and identified modelling-based pedagogy and technological tools as important mechanisms for integrating computational practices into science teaching. Their findings suggest that CT can strengthen learners' abilities to represent scientific phenomena, identify relationships among variables, develop computational solutions, and engage in higher-order scientific reasoning. Similarly, Lee et al. (2022) reported that computer-science education can contribute substantially to the development of CT among K-12 learners, thereby providing an important foundation for problem-solving and interdisciplinary learning. More recent evidence indicates that CT is increasingly being integrated across school subjects rather than being treated exclusively as a computer-science competency. Yeni et al. (2024) emphasised the interdisciplinary nature of CT integration in K-12 education, while Liu et al. (2024) highlighted the critical role of teacher preparation and pedagogical support in enabling effective classroom integration. Furthermore, Li and Oon (2024) demonstrated increasing scholarly interest in the transfer of CT competencies into STEM contexts, reinforcing the argument that computational practices can contribute to learning beyond traditional computer-science environments. The transformation of Integrated Science education, however, does not terminate with computational thinking, as the emergence of artificial intelligence (AI), machine learning, learning analytics, adaptive technologies, intelligent tutoring systems, generative AI, and other intelligent learning technologies is extending digital education toward environments capable of responding dynamically to individual learners. Whereas earlier digital learning technologies primarily provided access to electronic content and communication tools, intelligent systems can potentially analyse learner interactions, identify patterns of performance, estimate levels of understanding, recommend learning



resources, generate feedback, adjust instructional difficulty, and support teachers in making data-informed pedagogical decisions. This represents an important transition from technology-supported learning to technology-mediated and technology-adaptive learning. Almasri (2024), in a systematic review of empirical research on AI in science education, identified multiple applications of AI in teaching and learning and demonstrated its growing relevance to science education. Similarly, Cerón Salazar and Burbano González (2026), through a systematic review of 72 peer-reviewed studies published between 2014 and 2024, reported predominantly positive educational outcomes associated with intelligent learning systems in primary and secondary education, with intelligent tutoring systems representing a major category of implementation. Learning analytics constitutes another important stage in this transformation because it provides mechanisms for converting learner-generated digital traces into meaningful educational information. Contemporary learning platforms can collect information concerning learners' participation, assessment performance, resource access, interaction patterns, completion rates, response times, and progression through learning activities. When systematically analysed, such information can support early identification of learning difficulties, prediction of performance, personalised feedback, learner profiling, and instructional decision-making. Khor and K (2024) demonstrated the potential contribution of learning analytics to personalised learning by highlighting its role in learner monitoring, prediction, feedback, and instructional adaptation, while Paulsen and Lindsay (2024) showed that learning analytics dashboards are increasingly shifting from merely displaying data toward supporting actual learning processes and pedagogical decision-making. The combination of learning analytics with AI therefore creates opportunities for Integrated Science environments in which learner performance can be continuously monitored and instructional experiences dynamically adjusted. Farhood et al. (2025) and Hariyanto et al. (2025) further demonstrated the growing application of AI-based personalised and adaptive learning approaches, suggesting that intelligent systems can increasingly support differentiated learning experiences based on individual learner characteristics and performance patterns. Digital transformation also provides new opportunities for scientific inquiry through virtual laboratories, simulations, augmented environments, and computational modelling. Integrated Science frequently requires learners to observe phenomena, manipulate variables, formulate hypotheses, conduct experiments, collect evidence, analyse results, and draw conclusions; however, conventional laboratory instruction can be constrained by limited equipment, financial costs, safety considerations, large class sizes, insufficient laboratory time, and restricted access to specialised facilities. Digital and virtual laboratories can partially address these limitations by allowing learners to conduct simulated experiments in controlled and repeatable environments. Campos Mera and Benarroch Benarroch (2024) identified the educational potential of virtual laboratories for science teaching, while Sapriati et al. (2023) reported positive relationships between virtual laboratory use and students' self-regulated learning. Elmoazen et al. (2023) further demonstrated that learning analytics can be incorporated into virtual laboratory environments to capture and analyse learner interactions. Consequently, the integration of virtual laboratories with CT, analytics, and AI could create increasingly sophisticated scientific learning environments in which learners not only conduct digital experiments but also receive adaptive support based on their experimental decisions, misconceptions, performance patterns, and learning progress. Another significant dimension of digital transformation concerns the changing role of the teacher. The emergence of intelligent educational technologies does not necessarily imply the replacement of teachers; instead, it creates possibilities for a complementary relationship between human pedagogical expertise and machine-supported analytical capabilities. Teachers remain responsible for curriculum interpretation, instructional design, classroom management, ethical judgement, contextualisation of scientific knowledge, learner motivation, interpersonal relationships, and professional decision-making, while intelligent systems can assist with repetitive analytical and administrative functions, identify patterns that may not be immediately visible to teachers, generate formative feedback, and recommend differentiated learning resources. This human–AI partnership requires teachers to develop new forms of digital, computational, pedagogical, and ethical competence. Scherer et al. (2024) identified AI literacy as an increasingly important dimension of teacher education, while Lintner (2024) emphasised the need for reliable approaches to understanding and measuring AI literacy. Mouta et al. (2024) further demonstrated that ethical issues surrounding AI in education include privacy, fairness, transparency, accountability, and human agency. The progression from CT to intelligent learning systems can

therefore be conceptualised as a digital transformation continuum. At the foundational level, learners acquire computational thinking skills that enable them to formulate problems, decompose complex scientific phenomena, identify patterns, construct algorithms, and develop computational models; at the next level, learners engage with digital simulations, virtual laboratories, computational tools, and data-analysis environments that enable them to apply these competencies to authentic scientific problems; learning analytics subsequently provide mechanisms for monitoring and interpreting learner behaviour and achievement, while adaptive learning technologies use these data to personalise instructional experiences; and, at the advanced level, AI and intelligent learning systems integrate multiple sources of learner information to support prediction, adaptation, feedback, recommendation, and intelligent instructional decision-making. This progression is consistent with the broader transformation of education toward digitally connected and intelligent ecosystems (Mukul & Büyüközkan, 2023) and reflects growing evidence that AI, adaptive learning, learning analytics, and intelligent tutoring systems are becoming interconnected components of contemporary educational practice (Almasri, 2024; Cerón Salazar & Burbano González, 2026; Farhood et al., 2025; Hariyanto et al., 2025). Despite these opportunities, digital transformation should not be equated with technological adoption alone because the presence of computers, internet connectivity, AI applications, or digital platforms does not automatically produce meaningful learning. Effective transformation depends on the alignment of technology with curriculum objectives, pedagogical principles, learner characteristics, teacher competence, institutional capacity, assessment practices, and ethical standards. Liu et al. (2024) emphasised the importance of supporting teachers in integrating CT into classroom instruction, while Mouta et al. (2024) highlighted ethical challenges that must accompany the adoption of AI in educational contexts. Issues relating to the digital divide, inadequate infrastructure, unreliable connectivity, limited teacher preparation, algorithmic bias, data privacy, cybersecurity, accessibility, transparency, and unequal access to intelligent technologies may constrain the educational benefits of digital transformation. Consequently, the successful transformation of Integrated Science education requires a balanced approach that combines technological innovation with pedagogical quality, ethical responsibility, teacher development, institutional support, and equitable participation. The significance of this transformation is particularly pronounced in developing educational contexts where learners must increasingly prepare for scientific, technological, environmental, and socioeconomic challenges characterised by complexity and rapid change. Integrated Science provides an appropriate disciplinary context for this transformation because it naturally encourages interdisciplinary reasoning and connects scientific concepts with real-world problems. When computational thinking is combined with digital experimentation, data analytics, AI-supported feedback, adaptive learning, and intelligent tutoring, learners can potentially move from simply acquiring scientific facts toward developing the capacity to investigate complex problems, interpret evidence, construct explanations, evaluate alternative solutions, and make informed decisions. Accordingly, the present study examines the digital transformation of Integrated Science education from computational thinking to intelligent learning systems, focusing on the conceptual and empirical relationship between foundational computational competencies and emerging intelligent educational technologies. The study considers how CT, digital scientific inquiry, learning analytics, adaptive learning, artificial intelligence, and intelligent learning systems can operate as interconnected components of a contemporary Integrated Science learning ecosystem and examines their potential contribution to scientific literacy, computational problem-solving, digital competence, personalised learning, learner engagement, formative assessment, and evidence-based decision-making. By conceptualising digital transformation as a continuum rather than as the isolated adoption of individual technologies, the study provides a framework for understanding how Integrated Science education can evolve from conventional technology-assisted instruction toward intelligent, adaptive, data-informed, and learner-centred educational environments capable of preparing learners for the demands of an increasingly complex and dynamically evolving intelligent society.

LITERATURE REVIEW

Conceptual Foundations of Digital Transformation in Integrated Science Education

Digital transformation in education represents a fundamental reconfiguration of teaching, learning, assessment, and educational management through the purposeful integration of digital technologies, data, connectivity, automation, and intelligent computational capabilities. Within Integrated Science education, the concept extends beyond replacing textbooks or conventional laboratory equipment with computers and digital resources; rather, it involves restructuring how learners investigate scientific phenomena, construct explanations, analyse evidence, collaborate, solve problems, and apply scientific knowledge to real-world situations. Mukul and Büyüközkan (2023) conceptualise digital transformation within Education 4.0 as a multidimensional process involving technological, pedagogical, organisational, and learner-centred changes. This perspective is particularly applicable to Integrated Science because the discipline naturally requires interdisciplinary thinking and the integration of multiple forms of scientific evidence. A foundational component of this transformation is computational thinking (CT), which provides learners with systematic approaches to decomposition, pattern recognition, abstraction, algorithmic reasoning, modelling, and problem-solving. Ogegbo and Ramnarain (2022), following a systematic review of 23 studies, established that CT has significant implications for science teaching and learning and identified several strategies and technological tools through which computational practices can be embedded in science classrooms. More recent synthesis by Astor et al. (2026) strengthens this position by analysing 128 systematic reviews and meta-analyses and reporting that algorithms constitute an important unifying concept across otherwise diverse definitions of CT. Their review also identifies education, programming, pedagogical approaches, tools, and assessment as major areas of CT research. Thus, CT should be regarded not merely as programming knowledge but as a transferable cognitive framework for understanding and solving complex scientific problems. Lee et al. (2022) similarly found strong evidence that computer-science education promotes CT among K-12 learners and that integrating computer science with other subjects can increase learners' motivation, participation, and interest. Within Integrated Science, this creates opportunities for learners to use simulations, computational models, spreadsheets, coding environments, sensors, visualisation tools, and data-analysis platforms to investigate scientific questions. However, digital transformation reaches beyond CT when these technologies become connected to artificial intelligence (AI), learning analytics, adaptive learning, intelligent tutoring systems, and learner-modelling technologies. Cerón Salazar and Burbano González (2026), in a systematic review of 72 peer-reviewed studies published between 2014 and 2024, describe intelligent learning systems (ILS) as AI-enhanced educational technologies increasingly implemented within primary and secondary education. Consequently, the conceptual trajectory of Integrated Science education can be understood as a progression from **digital access** → computational thinking → computational science → data-informed learning → AI-supported learning → adaptive and intelligent learning systems. This progression provides the conceptual foundation for transforming Integrated Science from a predominantly content-oriented subject into a digitally mediated environment in which learners actively engage with computational models, scientific data, intelligent feedback, and complex interdisciplinary problems.

Computational Thinking as a Foundation for Integrated Science Learning

Computational thinking (CT) has emerged as an important foundation for digitally transforming science education because it provides learners with systematic cognitive strategies for analysing complex problems, representing scientific phenomena, identifying patterns, constructing algorithms, developing models, and evaluating solutions. Rather than being restricted to computer programming, CT involves transferable practices that can be applied to scientific investigation and interdisciplinary problem-solving. Ogegbo and Ramnarain (2022), in a systematic review of 23 empirical studies, established that CT has significant implications for science education and identified diverse pedagogical approaches, technological tools, and assessment practices used to integrate CT into science classrooms. Their findings demonstrate that CT can be embedded within science through activities involving modelling, simulation, computational problem-solving, and technology-supported inquiry. Lee et al. (2022) similarly reported strong evidence that computer-science education promotes CT among K-12 learners

and can contribute to creative and critical thinking; they further observed that integrating computer science with other school subjects can enhance learners' motivation, participation, commitment, and interest. The interdisciplinary potential of CT is reinforced by Yeni et al. (2024), whose systematic review examined 108 peer-reviewed studies and demonstrated increasing efforts to integrate CT across different K-12 subject areas, including science, through domain-specific learning objectives, instructional strategies, technologies, and assessment approaches. Importantly, the effectiveness of CT integration depends not only on learners but also on teachers' capacity to design and facilitate computationally enriched learning experiences. Liu et al. (2024), after reviewing research on professional development for teachers, found that educators frequently experience difficulties integrating CT into ordinary classroom practice, highlighting the importance of sustained professional development, pedagogical support, and appropriate instructional resources. Similarly, Yun and Crippen (2024) reviewed 18 empirical studies of CT integration into pre-service science teacher education and found predominantly positive outcomes while noting that the field remains relatively exploratory. Li and Oon (2024) further provide meta-analytic evidence concerning the transfer of CT within STEM education, supporting the argument that computational practices can extend beyond computer science into broader STEM learning contexts. For Integrated Science, therefore, CT provides an important bridge between conceptual scientific knowledge and computationally mediated inquiry. Learners can use decomposition to break down environmental problems, abstraction to identify essential variables in scientific systems, algorithmic thinking to sequence investigative procedures, pattern recognition to interpret datasets, and computational modelling to represent dynamic phenomena. This foundation creates a pathway toward more sophisticated digital learning environments in which CT is combined with data analytics, artificial intelligence, adaptive technologies, and intelligent feedback. Consequently, CT should be regarded as a core cognitive infrastructure for preparing Integrated Science learners to participate effectively in increasingly digital and intelligent scientific environments.

Artificial Intelligence and Intelligent Learning Systems in Integrated Science Education

Artificial intelligence (AI) and intelligent learning systems (ILS) represent a significant stage in the digital transformation of Integrated Science education because they extend technology-supported instruction from static digital resources toward systems capable of analysing learner information, generating feedback, adapting instructional content, supporting scientific inquiry, and assisting teachers in making evidence-informed pedagogical decisions. Almasri (2024), through a systematic review of empirical research on AI in science teaching and learning, identified AI applications across instructional practices, assessment, personalised learning, and other dimensions of science education, demonstrating the expanding role of AI in scientific learning environments. The review is particularly important to Integrated Science because it establishes that AI is not limited to general educational applications but can be incorporated directly into science teaching and learning processes. Erümit and Özdemir Sarıalioğlu (2025) similarly reported increasing applications of AI within science and chemistry education, highlighting the potential of AI technologies to transform teaching, learning, assessment, and scientific problem-solving. Their systematic review is openly accessible and provides evidence of the growing intersection between AI and subject-specific science education. At a broader K–12 level, Cerón Salazar and Burbano González (2026) systematically reviewed 72 peer-reviewed studies published between 2014 and 2024 and found that intelligent learning systems are increasingly being implemented in primary and secondary education, with intelligent tutoring systems constituting an important category of such technologies. The authors describe ILS as AI-enhanced educational technologies capable of supporting adaptive learning and learner-centred instruction. This development is particularly relevant to Integrated Science because learners differ substantially in prior knowledge, scientific reasoning abilities, learning pace, misconceptions, and preferred modes of engagement. Intelligent systems can potentially respond to these differences by analysing learner interactions and dynamically recommending learning resources, questions, simulations, explanations, or remedial activities. However, the pedagogical value of AI depends heavily on how intelligently it is integrated into instructional practice. Liu and Zhong (2025), in a systematic review using the Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) perspective, emphasised that effective GenAI integration requires pedagogical scaffolding and appropriate instructional guidance rather than unrestricted access

to AI tools. Similarly, Marzano (2025/2026), in a systematic review of GenAI at the K-12 level, examined how generative AI is being incorporated into teaching and learning processes and highlighted the expanding research attention surrounding its educational applications. Importantly, AI integration also introduces epistemic, ethical, and pedagogical concerns. A 2025 systematic review specifically examining GenAI and science education analysed 22 empirical studies and noted tensions between the capabilities of GenAI and fundamental goals of science education, including scientific understanding, social learning, and epistemic development. These concerns indicate that intelligent learning systems should complement rather than replace teachers and learners' active scientific reasoning. Therefore, the transition from computational thinking to intelligent learning systems should be conceptualised as a human-AI collaborative progression, in which CT provides the cognitive foundation for computational problem-solving, AI provides analytical and adaptive capabilities, learning analytics provides evidence about learner behaviour and performance, and teachers provide pedagogical judgement, ethical oversight, and contextual interpretation. For Integrated Science education, such an ecosystem can support personalised scientific inquiry, intelligent assessment, adaptive experimentation, automated feedback, collaborative problem-solving, and data-informed instructional decision-making while maintaining the central role of human scientific reasoning.

Learning Analytics, Adaptive Learning and Personalised Integrated Science Education

Learning analytics and adaptive learning represent important components of the transition from conventional digital education to intelligent learning systems because they enable educational technologies to move from simply delivering content toward continuously interpreting learner behaviour and adjusting instruction accordingly. Khor and K (2024), in a systematic review of 40 studies, found that learning analytics can support personalised learning by collecting information about learners' development, skills, preferences, and emotions; classifying learners; generating feedback loops; predicting performance; and providing real-time visualisations of classroom dynamics. They also identified accuracy, fairness, opportunity costs, and privacy as important challenges, demonstrating that data-driven personalisation requires both technical reliability and responsible governance. In Integrated Science education, these capabilities can enable teachers and intelligent systems to monitor learners' performance across scientific concepts, identify misconceptions, recommend differentiated learning activities, and provide timely interventions. Paulsen and Lindsay (2024) similarly reviewed learning-analytics dashboards and reported an increasing emphasis on dashboards that support learning processes rather than merely presenting analytical information. Their review, published in *Education and Information Technologies*, illustrates how learner-facing and teacher-facing analytics can transform raw educational data into information that supports reflection, monitoring, and instructional decision-making. The development of artificial-intelligence-based adaptive systems further strengthens this transformation. Hariyanto et al. (2025) systematically reviewed 142 empirical studies published between 2015 and 2025 and found that machine learning, deep learning, reinforcement learning, and multimodal analytics are increasingly being incorporated into adaptive learning systems to provide personalised and data-driven learning experiences. Their review indicates that AI-enabled systems can analyse learner profiles and dynamically modify instructional content and pathways. Similarly, Farhood et al. (2025) synthesised 125 studies published between January 2015 and June 2025 and found that AI-based personalised learning is being applied across K-12, higher education, and online learning, with applications involving recommender systems, adaptive learning, generative AI, and other intelligent technologies. These findings have considerable implications for Integrated Science because learners often demonstrate substantial differences in conceptual understanding, scientific reasoning, digital competence, and learning pace. An intelligent Integrated Science platform could therefore use assessment results, interaction histories, simulation performance, question-response patterns, and learning-resource usage to construct learner profiles and recommend appropriate scientific activities. For example, a learner experiencing difficulty with chemical reactions could automatically receive additional visualisations, simulations, worked examples, or scaffolded questions, while a more advanced learner could receive complex modelling or inquiry-based activities. Such personalisation could make Integrated Science more responsive and learner-centred. Nevertheless, adaptive learning should not be interpreted as complete automation of teaching. Evidence from recent reviews emphasises

the continuing importance of teachers, pedagogical judgement, data quality, privacy, fairness, and institutional capacity. Consequently, learning analytics and adaptive technologies should function as decision-support mechanisms within a human-centred Integrated Science ecosystem, enabling teachers to combine computational evidence with professional knowledge and contextual understanding. The convergence of learning analytics, adaptive algorithms, and AI therefore provides a critical technological bridge between computational thinking and fully intelligent learning environments.

Teacher Competence, Digital Literacy, Ethics and Human-AI Collaboration in Integrated Science Education

The successful digital transformation of Integrated Science education depends not only on the availability of computational tools and intelligent learning systems but also on teachers' capacity to understand, evaluate, implement, and ethically govern these technologies within pedagogically meaningful contexts. As AI increasingly becomes embedded in educational environments, the role of the science teacher is evolving from being primarily a transmitter of scientific knowledge toward becoming a designer, facilitator, evaluator, and ethical mediator of technology-enhanced scientific learning. Scherer et al. (2024), in a scoping review of AI literacy in teacher education, analysed 34 relevant studies and found that AI literacy remains an emerging area, with insufficient attention to teachers' practical and ethical knowledge. Their findings indicate that teachers require more than technical familiarity with AI; they need theoretical understanding, practical competence, and professional judgement to integrate AI meaningfully into teaching. Similarly, Lintner (2024) systematically reviewed AI-literacy measurement instruments and identified 22 studies validating 16 scales across different populations, including teachers, secondary students, and higher-education learners. The review demonstrates the growing importance of reliable measurement of AI literacy and provides a basis for assessing teachers' readiness to participate in intelligent learning environments. Within science education specifically, Almasri (2024) found that AI is increasingly influencing instructional practices, assessment, and other dimensions of science teaching and learning, reinforcing the need for science teachers to develop appropriate AI-related competencies. More recent evidence from Tagare et al. (2025) emphasises that teachers' AI competence must include ethical knowledge, skills, and dispositions. Their systematic review identifies knowledge of AI limitations, human-in-the-loop principles, socio-political implications, transparency, explainability, critical evaluation, culturally responsive practice, and inclusiveness as important dimensions of teachers' AI ethics competence. These competencies are particularly important in Integrated Science because AI-supported scientific learning frequently involves learner-generated data, automated recommendations, generative systems, simulations, and algorithmic interpretations that may contain inaccuracies or biases. Mouta et al. (2024), through a systematic review of AI ethics in education, identified ethical concerns that can be overlooked when attention is concentrated primarily on the potential benefits of AI. Their review highlights the importance of considering issues such as privacy, fairness, transparency, accountability, and human agency. Yusuf et al. (2024) similarly mapped 407 publications on generative AI in education and identified ethical implications and risks alongside application, impact, adoption, performance, and intelligence as major research themes. Furthermore, Zhou et al. (2025) synthesised teacher-AI competency frameworks and identified five major dimensions: AI cognition, AI application, AI ethics, AI evaluation, and professional development. These findings collectively suggest that effective digital transformation requires continuous teacher professional development encompassing computational thinking, digital pedagogy, AI literacy, data literacy, critical evaluation, ethical reasoning, and human-AI collaboration. Teachers should therefore remain central to intelligent Integrated Science systems, using AI-generated evidence to support rather than replace professional judgement. A human-centred model can enable teachers to interrogate algorithmic recommendations, verify AI-generated scientific explanations, protect learner data, identify potential bias, and ensure that technology remains aligned with curriculum objectives and learners' developmental needs. Consequently, teacher competence and ethical governance constitute the human infrastructure necessary for transforming Integrated Science from computationally supported learning into responsible, adaptive, and intelligent learning environments.

MATERIALS AND METHODS

This study adopted a descriptive, computationally supported quasi-experimental research design to examine the contribution of digital transformation to Integrated Science learning, with particular emphasis on the progression from computational thinking (CT) to intelligent learning systems (ILS). The study involved 500 learners, comprising 250 learners assigned to a conventional Integrated Science instructional group and 250 learners assigned to a digitally transformed Integrated Science instructional group. The conventional group received teacher-directed Integrated Science instruction based primarily on established classroom practices, whereas the digitally transformed group participated in learning activities integrating computational-thinking tasks, digital simulations, data-driven learning analytics, adaptive learning resources, and AI-supported intelligent learning features. Four major outcome dimensions were assessed using structured five-point competency measures: computational-thinking competency, scientific problem-solving, digital scientific inquiry, and intelligent-learning engagement. The measurement framework was designed to capture learners' capacity to decompose and solve complex problems, apply scientific reasoning, conduct inquiry using digital tools, interpret and utilise digital information, and interact effectively with intelligent learning technologies. Descriptive statistics, including mean scores and standard deviations, were used to summarise learner outcomes across the four dimensions. An independent-samples *t*-test was subsequently employed to determine whether statistically significant differences existed between the conventional and digitally transformed instructional groups, while Cohen's *d* was used to determine the magnitude of the observed group differences. Statistical analysis was conducted using Python-based data-analysis procedures, incorporating appropriate numerical and inferential statistical techniques. The analytical framework was structured to provide empirical evidence concerning the extent to which digitally transformed Integrated Science instruction may enhance computational, scientific, digital-inquiry, and intelligent-learning competencies relative to conventional instruction.

RESULTS AND DISCUSSION

The findings demonstrated that learners exposed to the digitally transformed Integrated Science framework achieved substantially higher competency outcomes than those who received conventional instruction. The study involved 500 learners, comprising 250 learners in the conventional instructional group and 250 learners in the digitally transformed group. The conventional group recorded an overall competency mean of 3.21 (SD = 0.51), compared with 4.18 (SD = 0.43) for the digitally transformed group, indicating a substantial improvement associated with the integration of computational thinking, digital simulations, learning analytics, adaptive resources, and intelligent learning technologies. At the dimensional level, computational-thinking competency was higher in the digitally transformed group (M = 4.24, SD = 0.45) than in the conventional group (M = 3.18, SD = 0.57). Scientific problem-solving similarly increased from 3.27 (SD = 0.55) to 4.22 (SD = 0.46), while digital scientific inquiry increased from 3.15 (SD = 0.59) to 4.12 (SD = 0.48). Intelligent-learning engagement also recorded a higher mean in the digitally transformed group (M = 4.14, SD = 0.44) than in the conventional group (M = 3.24, SD = 0.53). An independent-samples *t*-test revealed a statistically significant difference in overall competency between the two instructional groups, $t(498) = 22.95$, $p < .001$, while Cohen's *d* of 2.08 indicated a very large effect, demonstrating that the observed difference was both statistically significant and educationally substantial. The lower variability observed in the digitally transformed group further suggests greater consistency in learners' competency outcomes. The higher computational-thinking competency supports Ogegbo and Ramnarain (2022), who established that computational thinking can be meaningfully integrated into science classrooms through modelling, computational practices, and technology-supported activities. It also aligns with Lee et al. (2022), who reported positive contributions of computer-science education to computational-thinking development among K-12 learners. In Integrated Science, computational thinking can help learners decompose complex problems, identify patterns, abstract relevant information, formulate algorithms, and systematically evaluate solutions. Li and Oon (2024) further demonstrated positive transfer of computational-thinking competencies into STEM learning contexts, reinforcing the value of CT beyond computer science. The higher scientific problem-solving outcome may therefore reflect the

complementary relationship between computational reasoning and scientific inquiry, enabling learners to analyse variables, construct procedures, interpret evidence, and evaluate solutions more systematically. The stronger digital scientific-inquiry outcome also indicates the value of technology-mediated experimentation. Digital simulations, virtual laboratories, interactive visualisations, and computational models can provide opportunities for learners to investigate scientific phenomena that may be difficult, costly, hazardous, or time-consuming to explore using conventional approaches. This finding is consistent with Campos Mera and Benarroch Benarroch (2024), who reported positive educational contributions of virtual laboratories, and Elmoazen et al. (2023), who highlighted the value of learning analytics for examining learner interactions within virtual laboratory environments. Furthermore, the higher intelligent-learning engagement score suggests that adaptive and AI-supported technologies can promote more responsive and learner-centred educational experiences. Khor and K (2024) identified learning analytics as a mechanism for learner profiling, feedback, prediction, and personalised learning, while Hariyanto et al. (2025) reported increasing applications of machine-learning techniques in adaptive educational systems. The overall pattern is also consistent with Cerón Salazar and Burbano González (2026), who reported predominantly positive educational outcomes associated with intelligent learning systems in primary and secondary education. Collectively, the findings indicate that digital transformation is most effective when computational thinking, digital inquiry, analytics, adaptive learning, and intelligent technologies are integrated as a coherent pedagogical framework rather than introduced as isolated technological interventions. Nevertheless, effective implementation requires teacher competence, appropriate infrastructure, curriculum alignment, equitable access, responsible data management, privacy protection, and ethical governance. The significant group difference and large effect size therefore provide strong evidence within the study context that digitally transformed Integrated Science instruction can enhance computational-thinking competency, scientific problem-solving, digital scientific inquiry, and intelligent-learning engagement while preparing learners for increasingly computational, data-driven, and technologically mediated scientific environments.

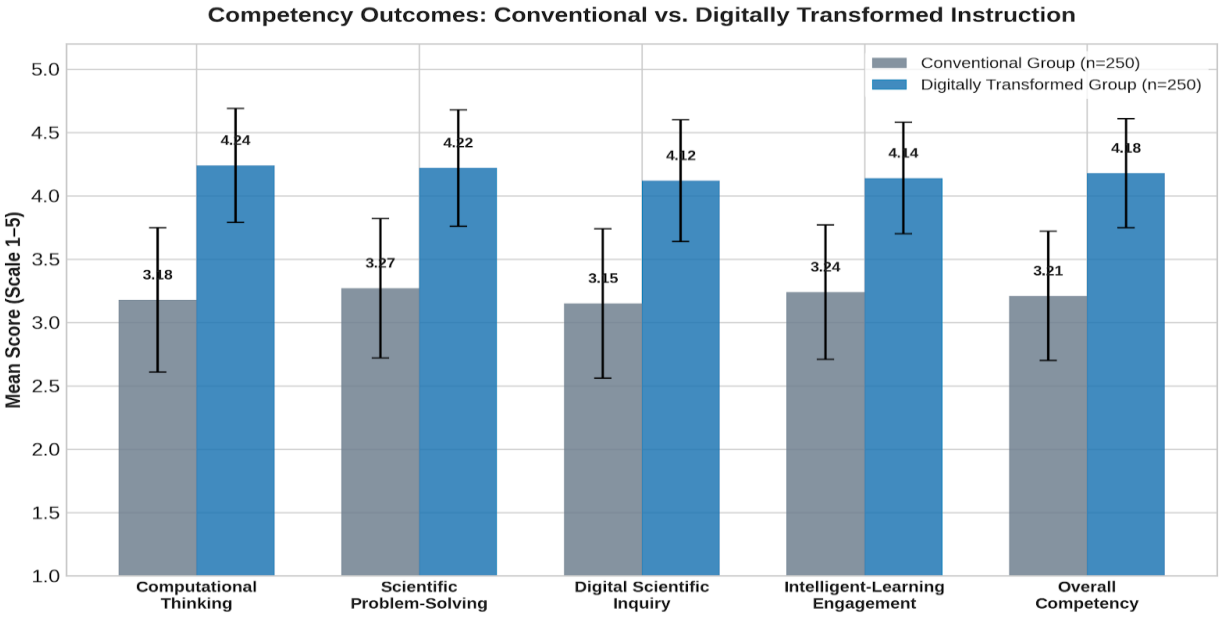


Figure 1: Impact of Digital Transformation on Integrated Science Competencies. Comparative mean scores and standard deviations for conventional (n=250) versus digitally transformed (n=250) instruction across key educational dimensions. Significant overall competency gain observed ($p<.001, d=2.08$).

CONCLUSION

The digital transformation of Integrated Science education represents a significant shift from predominantly teacher-directed and content-centred instruction toward interconnected learning environments that integrate computational thinking, digital scientific inquiry, learning analytics, adaptive technologies, artificial intelligence, and intelligent learning systems. The findings of this study demonstrate that this transformation can strengthen multiple dimensions of learners' competencies when digital technologies are systematically aligned with scientific concepts, inquiry processes, and pedagogical objectives. Computational thinking provides an important foundation for this transformation by enabling learners to decompose complex scientific problems, recognise patterns, abstract essential information, formulate algorithms, construct models, and develop systematic solutions. This position is consistent with Ogegbo and Ramnarain (2022), who identified the growing relevance of computational thinking in science education, and Lee et al. (2022), who established its contribution to computational competence among K-12 learners. The integration of digital simulations and virtual laboratories further extends learners' opportunities to investigate scientific phenomena through experimentation, modelling, visualisation, and data analysis, particularly where conventional laboratory facilities may be limited. Evidence from Campos Mera and Benarroch Benarroch (2024), Sapriati et al. (2023), and Elmoazen et al. (2023) supports the educational value of technology-mediated scientific environments for inquiry, self-regulated learning, conceptual development, and analysis of learner interactions. Learning analytics represents another important stage of digital transformation because it enables learner-generated information to be converted into actionable evidence for monitoring progress, identifying learning difficulties, providing feedback, and supporting personalised instruction (Khor & K, 2024). The findings further indicate that artificial intelligence and intelligent learning systems can enhance this process by supporting adaptive learning pathways, formative feedback, resource recommendation, learner profiling, and data-informed instructional decisions. The higher competency outcomes observed among learners exposed to the digitally transformed framework, including stronger computational-thinking competency, scientific problem-solving, digital scientific inquiry, and intelligent-learning engagement, demonstrate the potential of an integrated approach to improve the breadth and depth of Integrated Science learning. However, digital transformation should not be regarded as a replacement for teachers; rather, it should establish a productive human–technology partnership in which teachers retain responsibility for pedagogical judgement, scientific interpretation, ethical oversight, learner support, and contextual decision-making, while intelligent technologies provide computational assistance, adaptive resources, analytics, simulation, and timely feedback. Sustainable implementation therefore requires continuous teacher professional development, reliable digital infrastructure, curriculum alignment, equitable access, data privacy, algorithmic transparency, responsible artificial-intelligence governance, and systematic evaluation. Ultimately, transforming Integrated Science from computational thinking toward intelligent learning systems provides a pathway for developing scientifically knowledgeable, computationally capable, digitally literate, analytically competent, and ethically responsible learners who are prepared to participate effectively in increasingly technology-driven and intelligent societies.

FUTURE RESEARCH

Future research should move beyond conceptual and simulated evidence toward longitudinal, empirical, and multi-context investigations of digital transformation in Integrated Science education. Experimental and quasi-experimental studies should examine whether the integration of computational thinking, digital simulations, learning analytics, adaptive learning, and intelligent learning systems produces sustained improvements in scientific achievement, problem-solving, creativity, digital literacy, and learner engagement. Further studies should compare different AI-enabled instructional models and determine which combinations of technologies provide the greatest educational value at different learner levels. Research should also investigate teachers' AI literacy, computational competence, pedagogical readiness, and professional-development requirements, particularly in resource-constrained educational environments. In addition, researchers should examine algorithmic bias, learner-data privacy, explainability, accessibility, academic integrity, and equity. Future studies should

incorporate authentic learner datasets, validated instruments, mixed-methods designs, and cross-institutional samples to establish robust evidence for scalable and ethically responsible intelligent Integrated Science education.

References

Almasri, F. (2024). Exploring the impact of artificial intelligence in teaching and learning of science: A systematic review of empirical research. *Research in Science Education, 54*, 977-997. https://doi.org/10.1007/s11165-024-10176-3

Astor, K., Rönnlund, J., Fawcett, C., & Gredebäck, G. (2026). Computational thinking: A meta-review of systematic reviews and meta-analyses. *Educational Research Review, 52*, 100794. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2026.100794

Campos Mera, G., & Benarroch Benarroch, A. (2024). Laboratorios virtuales para la enseñanza de las ciencias: Una revisión sistemática [Virtual laboratories for science education: A systematic review]. *Enseñanza de las Ciencias, 42*(2), 109-129. https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.6040

Cerón Salazar, E. M., & Burbano González, D. C. (2026). Intelligent learning systems in primary and secondary education: A systematic review (2014-2024). *Frontiers in Education, 11*, Article 1720377. https://doi.org/10.3389/feduc.2026.1720377

Deriba, F. G., Saqr, M., & Tukiainen, M. (2024). Assessment of accessibility in virtual laboratories: A systematic review. *Frontiers in Education, 9*, Article 1351711. https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1351711

Elmoazen, R., Saqr, M., Khalil, M., & Wasson, B. (2023). Learning analytics in virtual laboratories: A systematic literature review of empirical research. *Smart Learning Environments, 10*, Article 23. https://doi.org/10.1186/s40561-023-00244-y

Erümit, A. K., & Özdemir Sarıalioğlu, R. (2025). Artificial intelligence in science and chemistry education: A systematic review. *Discover Education, 4*, Article 178. https://doi.org/10.1007/s44217-025-00622-3

Farhood, H., Nyden, M., Beheshti, A., & Muller, S. (2025). Artificial intelligence-based personalised learning in education: A systematic literature review. *Discover Artificial Intelligence, 5*, Article 331. https://doi.org/10.1007/s44163-025-00598-x

Hariyanto, H., Kristianingsih, F. X. D., & Maharani, R. (2025). Artificial intelligence in adaptive education: A systematic review of techniques for personalized learning. *Discover Education, 4*, Article 458. https://doi.org/10.1007/s44217-025-00908-6

Khor, E. T., & K, M. (2024). A systematic review of the role of learning analytics in supporting personalized learning. *Education Sciences, 14*(1), Article 51. https://doi.org/10.3390/educsci14010051

Lee, S. J., Francom, G. M., & Nuatomue, J. (2022). Computer science education and K-12 students' computational thinking: A systematic review. *International Journal of Educational Research, 114*, Article 102008. https://doi.org/10.1016/j.ijer.2022.102008

Li, Z., & Oon, P. T. (2024). The transfer effect of computational thinking (CT)-STEM: A systematic literature review and meta-analysis. *International Journal of STEM Education, 11*, Article 44. https://doi.org/10.1186/s40594-024-00498-z

Lintner, T. (2024). A systematic review of AI literacy scales. *npj Science of Learning, 9*, Article 50. https://doi.org/10.1038/s41539-024-00264-4

Liu, X., & Zhong, B. (2025). Integrating generative artificial intelligence into student learning: A systematic review from a TPACK perspective. *Educational Research Review, 49*, Article 100741. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2025.100741

Liu, Z., Gearty, Z., Richard, E., Kayumova, S., Balasubramanian, R., & Hawley Orrill, C. (2024). Bringing computational thinking into classrooms: A systematic review on supporting teachers in integrating computational thinking into K-12 classrooms. *International Journal of STEM Education, 11*, Article 51. https://doi.org/10.1186/s40594-024-00510-6

Marzano, D. (2025). Generative artificial intelligence (GAI) in teaching and learning processes at the K-12 level: A systematic review. *Technology, Knowledge and Learning, 31*, 789–829. https://doi.org/10.1007/s10758-025-09853-7

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*, 1166-1205. https://doi.org/10.1007/s40593-023-00384-9

Mukul, E., & Büyüközkan, G. (2023). Digital transformation in education: A systematic review of Education 4.0. *Technological Forecasting and Social Change, 194*, Article 122664. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122664

Ogegbo, A. A., & Ramnarain, U. (2022). A systematic review of computational thinking in science classrooms. *Studies in Science Education, 58*(2), 203-230. https://doi.org/10.1080/03057267.2021.1963580

Paulsen, L., & Lindsay, E. (2024). Learning analytics dashboards are increasingly becoming about learning and not just analytics: A systematic review. *Education and Information Technologies, 29*, 14279-14308. https://doi.org/10.1007/s10639-023-12401-4

Rosli, R., & Ishak, N. A. (2024). Integration of virtual labs in science education: A systematic literature review. *Jurnal Pendidikan Sains dan Matematik Malaysia, 14*(1), 81-103. https://doi.org/10.37134/jpsmm.vol14.1.8.2024

Sakr, A., & Abdullah, T. (2024). Virtual, augmented reality and learning analytics impact on learners, and educators: A systematic review. *Education and Information Technologies, 29*, 19913-19962. https://doi.org/10.1007/s10639-024-12602-5

Sapriati, A., Suhandoko, A. D. J., Yundayani, A., & Abdul Karim, R. (2023). The effect of virtual laboratories on improving students' self-regulated learning: An umbrella systematic review. *Education Sciences, 13*(3), Article 222. https://doi.org/10.3390/educsci13030222

Scherer, R., et al. (2024). In search of artificial intelligence (AI) literacy in teacher education: A scoping review. *Computers and Education Open, 6*, Article 100169. https://doi.org/10.1016/j.caeo.2024.100169

Tagare, D., Karki, T., & Yu, W. (2025). K-12 teachers' ethical competencies for AI literacy: Insights from a systematic literature review. *Computers & Education, 239*, Article 105435. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2025.105435

Yeni, S., Grgurina, N., Saeli, M., Hermans, F., Tolboom, J., & Barendsen, E. (2024). Interdisciplinary integration of computational thinking in K-12 education: A systematic review. *Informatics in Education, 23*(1), 223-278. https://doi.org/10.15388/infedu.2024.08

Yun, M., & Crippen, K. J. (2024). Computational thinking integration into pre-service science teacher education: A systematic review. *Journal of Science Teacher Education, 36*(2), 225-254. https://doi.org/10.1080/1046560X.2024.2390758

Yusuf, A., et al. (2024). Generative AI in education and research: A systematic mapping review. *Review of Education, 12*(2), Article e3489. https://doi.org/10.1002/rev3.3489

Zhou, T., Tondeur, J., & Howard, S. (2025). AI competency frameworks for teachers: A systematic review. In *Proceedings of EdMedia + Innovate Learning* (pp. 636-642). Association for the Advancement of Computing in Education.

THE SCIENTIFIC DISCOURSE ON THE ROLE OF CLINICAL PHARMACY SERVICES IN OPTIMIZING COMPLEX PHARMACOTHERAPY: ADVANCING PHARMACOVIGILANCE, DRUG TOXICITY MANAGEMENT, MEDICATION SAFETY, THERAPEUTIC OPTIMIZATION, TREATMENT EFFECTIVENESS, PRESCRIBING QUALITY, RISK REDUCTION, AND PUBLIC HEALTH OUTCOMES

Nodar Sulashvili [1], Nato Alavidze [2], Maka Javakhia [3], Nino Abuladze [4], Ketevan Gabunia [5], Vira Kravchenko [6], Olga Shapoval [7], Igor Seniuk [8], Nana Gorgaslidze [9], Marika Sulashvili [10], Lali Patsia [11], Marina Giorgobiani [12]

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, Professor of Medical and Clinical Pharmacology of International School of Medicine at Alte University; Invited Professor/Lecturer of Scientific Research-Skills Center at Tbilisi State Medical University; Invited Lecturer of Clinical Pharmacology Department at Tbilisi State Medical University; Professor of Medical and Clinical Pharmacology of Faculty of Medicine at Grigol Robakidze University, Professor of Sulkhan-Saba Orbeliani University; Associate Professor of Pharmacy Program, Sh. Meskhia Zugdidi State University; Associate Professor of Medical Pharmacology at Faculty of Medicine at David Aghmashenebeli University of Georgia; Associate Professor of Pharmacology of Faculty of Medicine, East European University; Associate Professor of Pharmacology of Faculty of Dentistry and Pharmacy, Tbilisi Humanitarian Teaching University; Invited Professor of Pharmacology of Faculty of Medicine at Teaching University "Geomedi"; Invited Professor of Faculty of Medicine at European University, Invited Professor of Georgian Technical 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; Tbilisi, Georgia; Scientific Researcher of Yerevan State Medical University After Mk. 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. MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia; Professor, Head of The Medical Doctor Degree Program of Faculty of Healthcare Sciences at East European University, Tbilisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0001-6695-5924
3. PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia. https://orcid.org/0000-0002-9869-9125
4. 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
5. 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;
6. 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
7. 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
8. 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
9. 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
10. 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
11. 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.
12. 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

Corresponding Author: Dr. Professor Nodar Sulashvili

Abstract
Clinical pharmacy has emerged as a fundamental component of contemporary healthcare systems, particularly in the management of patients exposed to complex pharmacotherapy, polypharmacy, high-risk medicines, narrow therapeutic-index drugs, and therapeutically demanding treatment regimens. The increasing complexity of pharmacological interventions, together with multimorbidity, aging populations, pharmacokinetic and pharmacodynamic variability, drug–drug and drug–disease interactions, medication errors, and fragmented prescribing practices, creates substantial challenges for medication safety and therapeutic effectiveness. Against this background, this scientific discourse examines the role of clinical pharmacy services in optimizing complex pharmacotherapy through integrated approaches to pharmacovigilance, drug-toxicity prevention and management, medication safety, therapeutic optimization, treatment effectiveness, prescribing quality, and risk reduction. The central objective is to conceptualize clinical pharmacy as a multidisciplinary, patient-centered, evidence-based service that contributes not only to the appropriate selection and utilization of medicines but also to continuous monitoring of therapeutic outcomes and medication-related risks across the entire treatment pathway. Clinical pharmacists occupy a strategic position between pharmacological science and clinical practice, providing systematic medication reconciliation, comprehensive medication review, identification of potentially inappropriate medicines, assessment of drug-related problems, evaluation of therapeutic duplication, detection of contraindications, monitoring of adverse drug reactions, and optimization of dosage regimens according to individual patient characteristics. Their integration into multidisciplinary healthcare teams can strengthen pharmacotherapeutic decision-making by incorporating pharmacological, clinical, laboratory, pharmacokinetic, pharmacodynamic, and patient-specific information. Particularly in patients receiving multiple medicines, clinical pharmacy interventions may reduce preventable medication-related harm by identifying interactions, dosing errors, therapeutic gaps, contraindications, adherence barriers, and inappropriate prescribing before these problems result in clinically significant adverse outcomes. Pharmacovigilance represents a major domain of clinical pharmacy practice because pharmacists can contribute directly to the detection, assessment, documentation, prevention, and reporting of suspected adverse drug reactions and medication-related incidents. Systematic surveillance enables earlier recognition of toxicity signals and supports evidence-based modification of pharmacotherapy. Clinical pharmacists also contribute to risk minimization by monitoring organ-specific toxicity, therapeutic drug concentrations, cumulative exposure, dose-dependent adverse effects, and clinically relevant laboratory parameters. Such activities are particularly important for antimicrobials, anticoagulants, antineoplastic agents, immunosuppressants, antiepileptic medicines, cardiovascular drugs, psychotropic medications, and other high-risk pharmacological therapies. Therapeutic optimization requires an individualized balance between efficacy, safety, appropriateness, adherence, and patient preferences. Clinical pharmacy services facilitate this process through medication reconciliation, evidence-based therapeutic recommendations, dose adjustment, therapeutic drug monitoring, pharmacogenomic considerations where clinically justified, deprescribing, adherence interventions, and longitudinal follow-up. These approaches can improve prescribing quality by promoting indication-based therapy, appropriate dosing, rational duration of treatment, avoidance of unnecessary polypharmacy, and alignment between pharmacotherapy and contemporary clinical guidelines. Furthermore, clinical pharmacists can contribute to antimicrobial stewardship, transitions of care, chronic disease management, and prevention of medication discrepancies between inpatient and outpatient settings. The scientific evidence supports an integrated model in which clinical pharmacy services function as an essential safety and optimization mechanism within modern pharmacotherapy. Their contribution extends beyond medication dispensing toward proactive identification and management of pharmacotherapy-related risks, improvement of therapeutic effectiveness, reduction of preventable adverse events, and promotion of rational prescribing. The incorporation of clinical pharmacy into multidisciplinary healthcare structures therefore represents an important strategy for strengthening pharmacovigilance, improving medication safety, optimizing complex therapeutic regimens, and achieving more effective, individualized, and sustainable patient-centered pharmacotherapy. Future development should emphasize standardized clinical pharmacy protocols, digital medication surveillance, interoperable health-information systems, pharmacogenomic and pharmacokinetic integration, outcome-based evaluation, and stronger collaboration among pharmacists, physicians, nurses, and other healthcare professionals.
Keywords: Clinical Pharmacy; Pharmacovigilance; Medication Safety; Therapeutic Optimization; Risk Reduction.

Introduction

The progressive transformation of modern healthcare has substantially increased the complexity of pharmacotherapy and, consequently, the clinical challenges associated with ensuring medication safety, therapeutic effectiveness, prescribing quality, and risk minimization. Contemporary patients frequently present with multimorbidity, polypharmacy, altered physiological function, multiple prescribers, and complex therapeutic regimens involving medicines with narrow therapeutic indices or substantial potential for drug–drug, drug–disease, and drug–food interactions. At the same time, the rapid expansion of pharmacological innovation has introduced increasingly sophisticated therapeutic modalities, including targeted therapies, biologic medicines, immunomodulators, advanced antimicrobial agents, antineoplastic drugs, individualized pharmacogenomic interventions, and medicines requiring therapeutic drug monitoring. These developments have generated a clinical environment in which the safe and effective use of medicines cannot be adequately addressed through prescribing and dispensing alone. Rather, pharmacotherapy increasingly requires continuous, systematic, multidisciplinary evaluation throughout the medication-use process.

Within this context, clinical pharmacy has developed from a predominantly product-oriented discipline into an advanced patient-centered clinical science concerned with optimizing medication-related outcomes. Clinical pharmacy services integrate pharmacological knowledge with clinical assessment, medication review, therapeutic monitoring, pharmacovigilance, medication reconciliation, prevention of medication errors, patient education, adherence support, and interdisciplinary decision-making. The clinical pharmacist increasingly functions as a pharmacotherapy specialist who evaluates the appropriateness, effectiveness, safety, and efficiency of medication regimens and identifies opportunities to reduce preventable medication-related harm. This transformation is particularly relevant to complex pharmacotherapy, where therapeutic decisions must account simultaneously for disease characteristics, comorbidities, renal and hepatic function, age, body composition, genetic variability, previous treatment response, adherence, concomitant medications, laboratory findings, and patient-specific risk factors.

Complex pharmacotherapy should therefore be conceptualized not simply as the administration of multiple medicines but as a dynamic therapeutic system characterized by interacting pharmacological, physiological, clinical, behavioral, and organizational variables. Polypharmacy may be clinically appropriate when several medicines are required to control multiple diseases or achieve evidence-based therapeutic targets. However, increasing medication burden also increases the possibility of inappropriate prescribing, therapeutic duplication, contraindications, interactions, dosing errors, adverse drug reactions, medication discrepancies, and reduced adherence. The distinction between appropriate and inappropriate polypharmacy consequently requires systematic clinical assessment rather than reliance on the number of prescribed medicines alone. Clinical pharmacists are particularly well positioned to perform this assessment because their professional expertise combines detailed knowledge of pharmacology and pharmacokinetics with practical understanding of clinical therapeutics and medication-use processes.

Medication-related harm represents a major and multifactorial challenge for healthcare systems. Adverse drug reactions, medication errors, inappropriate medication selection, inadequate monitoring, therapeutic underuse, excessive dosing, treatment duplication, and preventable drug interactions may contribute to morbidity, mortality, prolonged hospitalization, increased healthcare expenditure, and deterioration in quality of life. Medication safety therefore requires an integrated approach extending from prescribing and dispensing to administration, monitoring, follow-up, and discontinuation. Clinical pharmacy services can contribute to each stage by systematically identifying medication-related problems and providing evidence-based interventions. Such interventions may include modification of doses, substitution of medicines, discontinuation of unnecessary therapy, initiation of omitted treatment, monitoring of laboratory parameters, identification of clinically significant interactions, adjustment according to organ function, and reinforcement of adherence.

Pharmacovigilance constitutes another essential dimension of modern clinical pharmacy practice. Traditionally associated with the post-marketing detection and evaluation of adverse drug reactions, pharmacovigilance has progressively evolved toward a broader patient-safety framework encompassing the identification, assessment, understanding, prevention, and management of medication-related risks. Clinical pharmacists can contribute substantially to this process because of their direct involvement in medication histories, therapeutic monitoring, adverse-event recognition, patient counseling, and communication with prescribers and other healthcare professionals. Their clinical proximity to medication use facilitates recognition of suspected adverse reactions that might otherwise remain undocumented. Furthermore, pharmacists can support structured causality

assessment, appropriate documentation, adverse-event reporting, signal detection, risk communication, and implementation of risk-minimization measures.

The relationship between clinical pharmacy and pharmacovigilance is particularly important in patients receiving medicines associated with potentially serious or dose-dependent toxicity. Antineoplastic agents, anticoagulants, immunosuppressants, antiepileptic drugs, aminoglycosides, certain cardiovascular agents, opioids, psychotropic medicines, and other high-risk pharmacotherapies may require close monitoring because relatively small deviations in exposure or administration can result in clinically significant consequences. Pharmacists can evaluate dose appropriateness, therapeutic targets, cumulative exposure, pharmacokinetic variables, organ-function parameters, laboratory indicators, and potential interactions. Through proactive surveillance, clinical pharmacy can shift medication safety from a reactive model—responding to adverse events after they occur—to a preventive model focused on identifying and mitigating risk before significant harm develops.

Drug toxicity represents a further major concern in complex pharmacotherapy. Toxicity may result from excessive systemic exposure, accumulation caused by impaired elimination, metabolic interactions, pharmacodynamic susceptibility, cumulative dosing, genetic variation, inappropriate treatment duration, or combinations of medicines with overlapping toxicological profiles. Renal and hepatic dysfunction are particularly important determinants of drug exposure and toxicity because many medicines or active metabolites depend on these organs for elimination. Clinical pharmacists can contribute to individualized dosing by interpreting renal and hepatic function, assessing pharmacokinetic parameters, evaluating therapeutic drug concentrations where appropriate, and recommending dose modification or alternative therapy. This individualized approach is especially important for medicines with narrow therapeutic indices, for which the difference between effective and toxic concentrations may be relatively small.

Therapeutic drug monitoring provides a particularly important mechanism for optimizing pharmacotherapy in selected clinical circumstances. Measurement of serum or plasma drug concentrations can support individualized dosage adjustment when pharmacokinetic variability is substantial and a clinically meaningful relationship exists between drug exposure, efficacy, and toxicity. However, therapeutic drug monitoring should not be reduced to laboratory measurement alone. Its effective implementation requires appropriate selection of patients and medicines, correct sampling time, interpretation of concentration data in relation to dosing history and physiological characteristics, understanding of pharmacokinetic principles, and translation of results into clinically meaningful therapeutic decisions. Clinical pharmacists can integrate these components and thereby transform concentration data into actionable pharmacotherapeutic recommendations.

Prescribing quality is another central determinant of medication safety and therapeutic effectiveness. High-quality prescribing requires that each medicine has a valid indication, an appropriate dose and route, an evidence-supported duration, acceptable safety characteristics, and a favorable benefit–risk profile for the individual patient. In complex therapeutic situations, prescribing quality can be compromised by incomplete medication histories, fragmented clinical information, therapeutic inertia, inappropriate continuation of medicines, insufficient monitoring, or failure to recognize interactions and contraindications. Clinical pharmacists can provide an independent pharmacotherapeutic assessment that complements physician decision-making. Their recommendations can help identify unnecessary medications, optimize dosing schedules, simplify complex regimens, and improve concordance between treatment plans and current evidence-based recommendations.

Medication reconciliation is particularly important at transitions of care. Hospital admission, transfer between clinical units, discharge, and movement between hospital and community settings are periods of increased vulnerability to medication discrepancies. Changes in medication regimens may be inadequately communicated, resulting in omission, duplication, incorrect dosing, or unintended continuation of discontinued medicines. A structured medication reconciliation process performed with clinical pharmacy involvement can establish an accurate medication history, identify discrepancies, verify treatment intentions, and support continuity of pharmacotherapy. The pharmacist's contribution is especially valuable when patients receive medicines prescribed by multiple clinicians or when medication regimens change rapidly during hospitalization.

Clinical pharmacy services also have an important role in antimicrobial stewardship. Antimicrobial therapy requires careful balancing of microbiological efficacy against toxicity, resistance selection, drug interactions, and patient-specific pharmacokinetic characteristics. Inappropriate antimicrobial selection, dose, route, or duration may compromise treatment effectiveness while contributing to antimicrobial resistance and avoidable adverse effects. Clinical pharmacists participating in antimicrobial stewardship programs can evaluate antimicrobial indications, microbiological data, dosing regimens, renal function, potential interactions, treatment

duration, intravenous-to-oral transitions, and opportunities for de-escalation. Their participation therefore connects individual patient safety with broader public-health objectives.

The optimization of pharmacotherapy must additionally incorporate patient-centered considerations. Medication effectiveness depends not only on pharmacological properties but also on whether patients can understand, obtain, administer, and consistently use their medicines. Complex dosing schedules, adverse effects, financial barriers, inadequate health literacy, and misconceptions about medicines may contribute to nonadherence. Clinical pharmacists can identify such barriers through direct patient engagement and develop individualized interventions, including counseling, regimen simplification, adherence education, medication-use demonstrations, and shared decision-making. Consequently, clinical pharmacy extends beyond technical optimization of medication regimens toward supporting the patient's capacity to participate actively in therapeutic decision-making.

Pharmacogenomics and precision medicine have further expanded the conceptual scope of clinical pharmacotherapy. Interindividual variability in drug response may arise from genetic differences affecting drug metabolism, transport, receptor sensitivity, immune pathways, or other pharmacological mechanisms. In appropriately selected clinical settings, pharmacogenomic information can contribute to the selection or dosing of medicines and potentially reduce the probability of treatment failure or severe adverse reactions. Clinical pharmacists with expertise in pharmacogenomics can help interpret clinically actionable genetic information, integrate it with conventional clinical variables, and translate it into pharmacotherapeutic recommendations. Nevertheless, pharmacogenomic information should be incorporated within a broader clinical framework rather than considered in isolation, because genotype represents only one determinant of therapeutic response.

Deprescribing represents a complementary component of therapeutic optimization. While modern healthcare has traditionally emphasized the identification and treatment of disease, increasing recognition of medication burden has strengthened interest in systematically evaluating whether all current medicines remain necessary. Deprescribing involves supervised reduction or discontinuation of medicines for which potential harms, treatment burden, or lack of ongoing benefit outweigh expected advantages. Clinical pharmacists can contribute by evaluating indication, treatment duration, therapeutic goals, adverse effects, interactions, patient preferences, and the risks associated with withdrawal or discontinuation. Appropriate deprescribing can reduce unnecessary polypharmacy while maintaining essential evidence-based treatment.

The economic dimension of medication safety also warrants consideration. Preventable adverse drug events and ineffective pharmacotherapy may generate substantial direct and indirect costs through emergency consultations, hospitalization, additional diagnostic procedures, treatment of adverse reactions, prolonged hospital stays, and loss of productivity. Clinical pharmacy interventions that prevent medication-related harm or improve treatment effectiveness may therefore have implications not only for clinical outcomes but also for healthcare-resource utilization. Pharmacoeconomic evaluation of clinical pharmacy services can help healthcare organizations determine the value of pharmacist-led interventions and support sustainable integration of clinical pharmacists into multidisciplinary care models.

Digital transformation is further changing the operational possibilities of clinical pharmacy. Electronic prescribing, electronic medication administration records, clinical decision-support systems, computerized interaction screening, electronic pharmacovigilance platforms, and integrated health-information systems can facilitate identification of medication-related risks. However, automated alerts may also generate alert fatigue when poorly prioritized or insufficiently individualized. Clinical pharmacists can provide essential human interpretation by distinguishing clinically meaningful signals from low-value alerts and integrating computerized information with the patient's clinical context. Artificial intelligence and advanced analytics may increasingly support medication-risk prediction, adverse-event signal detection, and identification of patients who require intensive pharmacotherapeutic review, although such technologies should complement rather than replace professional clinical judgment.

The multidisciplinary character of contemporary healthcare makes collaboration between clinical pharmacists, physicians, nurses, laboratory specialists, pharmacologists, epidemiologists, and other healthcare professionals increasingly important. Complex medication-related problems rarely arise from a single isolated factor; they commonly emerge from interactions among prescribing decisions, patient characteristics, healthcare-system processes, communication failures, and medication-use behaviors. Consequently, effective risk reduction requires coordinated professional activity. Clinical pharmacists can strengthen multidisciplinary teams by providing specialized pharmacotherapeutic expertise, communicating medication-related recommendations,

participating in clinical rounds, supporting therapeutic protocols, and contributing to medication-safety committees and quality-improvement programs.

From a systems perspective, clinical pharmacy services should be understood as an integral component of the medication-use system rather than as an additional or peripheral healthcare activity. Their effectiveness depends on appropriate integration into clinical workflows, clearly defined professional responsibilities, access to relevant patient information, and communication channels with prescribers, institutional support, and systematic evaluation of outcomes. Service models may include comprehensive medication management, pharmacist-led medication review, medication reconciliation, pharmacovigilance programs, antimicrobial stewardship, therapeutic drug monitoring, chronic disease management, transitions-of-care services, and specialized pharmacy consultations.

Despite substantial conceptual and clinical progress, important challenges remain. Variability in the organization and scope of clinical pharmacy services can limit consistency across healthcare institutions and countries. Differences in pharmacist training, prescribing authority, and access to electronic health records, staffing levels, reimbursement mechanisms, institutional culture, and interdisciplinary collaboration may influence the effectiveness of clinical pharmacy interventions. Furthermore, evaluation of clinical pharmacy services should extend beyond counting pharmacist interventions and should increasingly incorporate patient-centered outcomes, clinically significant adverse-event reduction, therapeutic target attainment, medication appropriateness, hospitalization outcomes, treatment adherence, quality of life, and healthcare-resource utilization.

Accordingly, the contemporary scientific discourse on clinical pharmacy must move beyond the narrow question of whether pharmacists can identify medication-related problems and address the broader question of how clinical pharmacy services can be systematically integrated into complex healthcare environments to improve the entire medication-use pathway. The central challenge is to establish models in which medication safety, pharmacovigilance, toxicity prevention, therapeutic effectiveness, prescribing quality, and risk reduction are not separate activities but interconnected components of a unified pharmacotherapeutic strategy.

The present scientific discourse therefore examines the role of clinical pharmacy services in optimizing complex pharmacotherapy through an integrated framework encompassing pharmacovigilance, drug-toxicity surveillance, medication safety, therapeutic optimization, treatment effectiveness, prescribing quality, medication reconciliation, therapeutic drug monitoring, pharmacogenomic considerations, deprescribing, antimicrobial stewardship, adherence support, and interdisciplinary care. Particular emphasis is placed on the capacity of clinical pharmacists to identify and mitigate medication-related risks, improve individualized treatment decisions, support rational prescribing, and promote continuous evaluation of benefit–risk relationships. Such an integrated perspective is essential for advancing patient-centered pharmacotherapy and for establishing clinical pharmacy as a strategically important component of contemporary healthcare quality and medication-safety systems.

Polypharmacy, commonly defined as the concurrent use of five or more medications, has become an increasingly prevalent phenomenon in modern healthcare systems, particularly among elderly populations with multimorbidity. However, a purely numerical definition fails to capture the clinical complexity of pharmacotherapy. Contemporary perspectives distinguish between **appropriate** and **problematic polypharmacy**, emphasising the qualitative dimension of prescribing practices. The aim of the study is to briefly describe how pharmacists can implement positive interventions to improve the quality of care for patients with polypharmacy.

The clinical burden of polypharmacy is substantial, encompassing adverse drug reactions, drug–drug interactions, medication non-adherence, functional decline, and increased healthcare expenditures. These risks are further amplified in older adults due to age-related pharmacokinetic and pharmacodynamic changes.

Pharmacists, as medication experts, are uniquely positioned to address polypharmacy-related challenges through interventions such as comprehensive medication reviews (CMR), deprescribing, and interprofessional collaboration. Despite growing evidence, the effectiveness of these interventions remains heterogeneous and context-dependent [9-10].

Polypharmacy has emerged as a central and increasingly complex challenge in contemporary healthcare systems, reflecting both the successes and unintended consequences of modern pharmacotherapy. Traditionally defined as the concurrent use of five or more medications, polypharmacy is particularly prevalent among older adults and individuals with multiple chronic conditions. However, this numerical definition alone inadequately captures the clinical nuance of the phenomenon. Increasingly, the concept has evolved toward a more qualitative

framework distinguishing between *appropriate* and *problematic* polypharmacy, thereby emphasizing the clinical necessity, therapeutic benefit, and risk–benefit balance of prescribed regimens rather than medication count alone.

Polypharmacy represents a growing global healthcare challenge, particularly among elderly populations with multimorbidity. While multiple pharmacological therapies are often clinically justified, inappropriate prescribing increases the risk of adverse drug reactions, hospitalisation, and reduced adherence. Pharmacist-led interventions have emerged as a strategy to optimise pharmacotherapy and improve patient outcomes.

The global demographic transition toward population aging has significantly amplified the burden of polypharmacy. Older individuals frequently present with multimorbidity, necessitating the simultaneous use of multiple pharmacological agents in accordance with evidence-based clinical guidelines. While such therapeutic complexity is often justified, it introduces substantial risks, including adverse drug reactions (ADRs), drug–drug interactions, prescribing cascades, medication non-adherence, functional decline, increased hospital admissions, and elevated healthcare costs. Importantly, age-related physiological changes—such as altered pharmacokinetics and pharmacodynamics—further heighten susceptibility to medication-related harm in geriatric populations.

A critical dimension of polypharmacy is the concept of potentially inappropriate prescribing (PIP), which encompasses both the use of potentially inappropriate medications (PIMs) and the omission of clinically indicated therapies. PIMs are generally defined as medications for which the potential risks outweigh the anticipated benefits, particularly when safer or more effective alternatives are available. Conversely, prescribing omissions may lead to suboptimal disease control and adverse clinical outcomes. To address these issues, several validated screening tools have been developed, including the widely utilized STOPP/START criteria and the Beers criteria. These instruments provide structured, evidence-based frameworks for evaluating medication appropriateness, identifying high-risk prescriptions, and guiding clinical decision-making in complex patient populations.

Despite the availability of these tools, inappropriate prescribing remains a pervasive issue across healthcare settings. Variability in clinical practice, limited integration of decision-support systems, insufficient interprofessional communication, and fragmented care pathways contribute to suboptimal medication management. Moreover, clinical guidelines, which are typically disease-specific, often fail to adequately account for the complexities of multimorbidity, thereby inadvertently promoting polypharmacy without sufficient consideration of cumulative risk. This gap underscores the need for coordinated, patient-centered approaches that integrate clinical judgment with systematic medication review processes.

Within this context, pharmacists have assumed an increasingly prominent role in optimizing pharmacotherapy and improving the quality of care for patients with polypharmacy. As medication experts, pharmacists possess specialized knowledge in pharmacokinetics, pharmacodynamics, drug interactions, and therapeutic optimization, positioning them uniquely within multidisciplinary healthcare teams. Pharmacist-led interventions encompass a broad range of activities, including comprehensive medication reviews (CMRs), deprescribing initiatives, patient counseling, therapeutic monitoring, and participation in clinical decision-making processes.

Comprehensive medication review represents a cornerstone of pharmacist-led care. This structured and systematic process involves the evaluation of all medications a patient is taking—prescription, over-the-counter, and complementary therapies—with the aim of identifying medication-related problems, optimizing therapeutic regimens, and enhancing patient outcomes. Importantly, CMRs extend beyond simple reconciliation and focus on clinical appropriateness, patient-specific factors, and alignment with treatment goals. In many cases, these reviews result in recommendations for deprescribing, defined as the planned and supervised process of dose reduction or discontinuation of medications that may no longer be beneficial or may be causing harm.

Deprescribing has gained increasing recognition as a critical strategy in polypharmacy management, particularly in geriatric populations. Evidence suggests that carefully implemented deprescribing interventions can reduce medication burden, minimize adverse effects, and improve quality of life without compromising clinical outcomes. However, the process is inherently complex and requires careful consideration of patient preferences, clinical stability, and the potential risks associated with medication withdrawal. Successful deprescribing often depends on effective communication between healthcare providers and patients, as well as strong interprofessional collaboration.

The effectiveness of pharmacist-led interventions in polypharmacy management has been the subject of growing research interest. Randomized controlled trials and systematic reviews have explored various intervention models, including hospital-based clinical pharmacy services, community pharmacy programs, and long-term care facility initiatives. These studies have demonstrated that pharmacist involvement is associated with

improvements in prescribing quality, reductions in potentially inappropriate medication use, and enhanced detection of medication-related problems. However, findings regarding the impact of such interventions on the total number of medications prescribed have been inconsistent, suggesting that the primary value of pharmacist involvement lies in optimizing, rather than merely reducing, pharmacotherapy.

Beyond geriatric populations, polypharmacy is increasingly recognized as a concern in other patient groups, including pediatric populations. Although less extensively studied, emerging evidence suggests that children exposed to multiple medications, particularly in hospital settings, may also face increased risks related to medication safety and therapeutic uncertainty. The lack of robust clinical data on drug combinations in pediatric care further complicates decision-making and underscores the importance of pharmacist involvement in this context as well.

From a health systems perspective, the integration of pharmacists into multidisciplinary care models represents a critical step toward addressing the challenges of polypharmacy. Collaborative approaches that involve physicians, pharmacists, nurses, and other healthcare professionals have been shown to enhance medication safety, improve clinical outcomes, and reduce healthcare utilization. The incorporation of electronic health records, clinical decision support systems, and shared documentation platforms further facilitates coordinated care and informed decision-making.

Despite these advancements, significant gaps remain in the evidence base. Many studies lack sufficient methodological rigor, standardized outcome measures, and long-term follow-up data. Additionally, the clinical significance of improvements in prescribing appropriateness is not always clearly established, particularly in relation to hard endpoints such as mortality, hospitalization, and quality of life. These limitations highlight the need for high-quality research that not only evaluates the effectiveness of pharmacist-led interventions but also elucidates the mechanisms through which these interventions exert their effects.

In light of these considerations, a comprehensive synthesis of the available evidence is warranted to clarify the role of pharmacists in polypharmacy management and to inform clinical practice and health policy. Therefore, the objective of this systematic review is to critically evaluate and synthesize current evidence on pharmacist-led interventions aimed at optimizing medication use in patients with polypharmacy, with a particular focus on prescribing quality, reduction of potentially inappropriate medications, and overall patient safety outcomes.

An important conceptual dimension of this field is the distinction between medication-centered and patient-centered optimization. Medication-centered approaches traditionally emphasize the pharmacological characteristics of individual agents, whereas patient-centered clinical pharmacy evaluates the medicine within the broader clinical circumstances of the person receiving treatment. The same pharmacological regimen may produce substantially different outcomes according to age, frailty, nutritional status, renal and hepatic function, comorbidity, genetic characteristics, concurrent medicines, previous adverse reactions, adherence behavior, and therapeutic objectives. Consequently, rational pharmacotherapy requires continuous reassessment rather than a one-time determination that a medicine is appropriate. Clinical pharmacists contribute to this dynamic process by repeatedly evaluating whether treatment remains indicated, effective, safe, feasible, and consistent with the patient's evolving clinical status.

The concept of drug-related problems provides an important methodological framework for such assessment. Drug-related problems may involve unnecessary pharmacotherapy, untreated indications, ineffective treatment, inappropriate dosage, adverse drug reactions, clinically significant interactions, nonadherence, and inadequate monitoring. These problems can occur independently or simultaneously, and their clinical significance may change as the patient's condition evolves. In complex pharmacotherapy, therefore, medication review should be systematic and structured. Clinical pharmacists can prioritize problems according to clinical severity, probability of harm, reversibility, therapeutic urgency, and potential impact on patient outcomes. This prioritization is particularly valuable in resource-constrained environments where multidisciplinary teams must focus attention on patients at greatest risk.

Risk stratification can strengthen the proactive dimension of clinical pharmacy practice. Patients receiving numerous medicines, high-alert medications, complex dosing schedules, or treatments associated with substantial toxicity may warrant more intensive pharmacotherapeutic surveillance. Additional risk factors include advanced age, impaired renal or hepatic function, history of medication-related harm, frequent hospitalization, multiple prescribers, cognitive impairment, limited health literacy, and transitions between healthcare settings. By systematically identifying these characteristics, clinical pharmacy services can allocate monitoring resources according to individualized risk rather than applying identical levels of intervention to all

patients. Such targeted models may improve the efficiency of medication-safety programs while preserving comprehensive care for vulnerable populations.

The prevention of medication errors represents another central component of clinical pharmacy. Errors may arise during prescribing, transcription, dispensing, preparation, administration, monitoring, or communication. High-risk transitions and complex therapeutic regimens increase the possibility of wrong-dose, wrong-frequency, omission, duplication, and interaction-related errors. Clinical pharmacists can identify vulnerabilities in medication-use processes and collaborate with healthcare organizations to introduce standardized safeguards. These may include medication reconciliation, independent verification of high-risk prescriptions, standardized dosing protocols, clinical decision support, allergy verification, renal-dose adjustment procedures, and systematic review of discharge medication lists. Importantly, medication safety should be approached as a systems issue rather than solely as an individual professional responsibility, because organizational design, communication processes, workload, technology, and information availability all influence the probability of error.

Adverse drug reaction prevention and management further demonstrate the value of clinical pharmacy expertise. Adverse reactions may be predictable and dose-related or unpredictable and idiosyncratic. Their manifestations can involve virtually every organ system and may range from mild, self-limiting symptoms to life-threatening conditions. Recognition requires an understanding of temporal relationships, pharmacological mechanisms, dose–response relationships, alternative causes, concomitant medicines, and patient susceptibility. Clinical pharmacists can contribute to differential assessment of suspected reactions, recommend appropriate modifications to therapy, document relevant reactions in medication records, and educate patients regarding warning signs and future avoidance. Accurate documentation is particularly important because a previous adverse reaction can influence subsequent prescribing decisions and may prevent recurrence of avoidable harm.

Medication safety also depends on effective communication. Patients may receive conflicting instructions from different healthcare professionals, particularly when several specialists are involved in their care. Inadequate communication can lead to duplication of therapy, contradictory dosing recommendations, premature discontinuation, or failure to implement necessary monitoring. Clinical pharmacists can serve as medication-information specialists within multidisciplinary teams, translating pharmacological evidence into clinically actionable recommendations and clarifying medication-related discrepancies. Their participation in ward rounds, case conferences, discharge planning, and medication-safety committees can create additional opportunities for structured communication and shared decision-making.

The quality of clinical pharmacy intervention should ultimately be judged by meaningful outcomes rather than by intervention volume alone. A high number of documented pharmacist recommendations does not necessarily indicate high-quality service if those recommendations have limited clinical relevance or are not implemented. Outcome-oriented evaluation should therefore examine changes in medication appropriateness, adverse drug events, preventable toxicity, and therapeutic target attainment, treatment adherence, and readmission, length of stay, patient-reported outcomes, and healthcare utilization. Process indicators remain useful, but they should be connected to clinically meaningful endpoints whenever possible. This outcome-based perspective is essential for demonstrating the value of clinical pharmacy to healthcare institutions, policymakers, and patients.

Another important consideration is the implementation of evidence-based clinical pharmacy practice across different healthcare environments. The scope of pharmacist involvement varies considerably among hospitals, outpatient clinics, community settings, long-term care institutions, and specialized treatment centers. In some systems, pharmacists may have established collaborative prescribing or medication-management roles, whereas in others their clinical contribution remains concentrated on dispensing and medication supply. Expansion of clinical pharmacy requires appropriate professional education, postgraduate specialization, competency development, institutional recognition, and clearly defined collaborative practice frameworks. It also requires organizational cultures that recognize medication optimization as a shared responsibility among healthcare professionals.

Education and continuing professional development are particularly important because complex pharmacotherapy increasingly incorporates rapidly changing evidence and specialized therapeutic technologies. Clinical pharmacists must maintain competence in clinical pharmacology, pharmacokinetics, pharmacodynamics, therapeutics, laboratory interpretation, pharmacogenomics, medication-safety science, pharmacovigilance, evidence appraisal, and communication. Advanced clinical practice also requires the ability to interpret clinical guidelines critically and to recognize circumstances in which standardized recommendations

require individualization. Interprofessional education can further improve understanding of professional roles and facilitate collaborative approaches to medication-related decision-making.

The integration of clinical pharmacy with pharmacovigilance systems can additionally strengthen the quality of medication-safety intelligence generated within healthcare institutions. Spontaneous adverse-event reporting systems may suffer from underreporting, incomplete documentation, and variability in report quality. Pharmacists can improve reporting processes by identifying suspected reactions during routine medication review and ensuring that relevant clinical information is captured. Institutional pharmacovigilance programs can combine spontaneous reports with medication-utilization data, laboratory abnormalities, electronic health-record signals, and targeted surveillance of high-risk medicines. Such integration can facilitate earlier recognition of safety concerns and support timely risk-management interventions.

Clinical pharmacy is also increasingly relevant to personalized medicine because therapeutic decisions are moving from population-based averages toward individualized risk–benefit assessment. Beyond pharmacogenomic information, personalization may incorporate therapeutic drug concentrations, biomarkers, organ-function measures, disease severity, prior treatment response, and patient preferences. Clinical pharmacists can integrate these heterogeneous data streams into medication-management decisions while recognizing the limitations of each individual source. This multidimensional approach is particularly valuable when conventional fixed-dose strategies do not adequately account for interindividual variability.

In chronic disease management, the pharmacist's longitudinal involvement can be particularly valuable. Chronic conditions often require lifelong pharmacotherapy, periodic treatment escalation, monitoring for adverse effects, and adaptation to changes in disease status. Medication regimens may become progressively complex as additional conditions emerge. Continuous clinical pharmacy follow-up can identify cumulative medication burden, reinforce adherence, monitor therapeutic outcomes, and support timely modification of treatment. The pharmacist's recurring assessment can therefore help prevent therapeutic inertia and reduce the risk that outdated medication regimens persist despite changes in clinical circumstances.

Hospital-to-community transitions represent another critical point for continuity of pharmacotherapy. Patients discharged after acute illness may leave the hospital with substantial changes to their medication regimen, while community clinicians may not immediately have complete information regarding the rationale for these changes. Clinical pharmacists can reconcile pre-admission and discharge therapies, identify unresolved medication-related problems, provide patient-specific counseling, and communicate relevant recommendations to subsequent healthcare professionals. Such continuity is particularly important for patients with polypharmacy and for those whose medicines require monitoring after discharge.

The broader public-health implications of clinical pharmacy should also be recognized. Rational medication use contributes to the sustainability of healthcare systems by reducing avoidable treatment failure, preventable toxicity, unnecessary medicine utilization, and medication-related hospitalization. Antimicrobial stewardship illustrates this principle particularly clearly, but similar considerations apply to opioids, anticoagulants, antidiabetic agents, antineoplastic medicines, and other therapeutic classes associated with substantial population-level risks. By supporting appropriate medicine selection and use, clinical pharmacy contributes simultaneously to individual patient outcomes and responsible stewardship of pharmacological resources.

Taken together, these considerations indicate that clinical pharmacy should be conceptualized as a continuous quality-assurance and risk-management function embedded within the medication-use pathway. Its contribution begins before medication administration, through assessment of indication and regimen appropriateness, continues during treatment through monitoring of effectiveness and toxicity, and extends after treatment through evaluation of outcomes, adherence, adverse reactions, and continuity of care. This longitudinal model provides a coherent framework for linking pharmacovigilance with therapeutic optimization rather than treating safety surveillance as an isolated post hoc activity.

The scientific and clinical significance of this integrated approach is particularly pronounced as healthcare systems confront increasingly complex therapeutic environments. New medicines, combination therapies, precision therapeutics, digital prescribing systems, and expanding evidence bases create opportunities for improved outcomes but simultaneously increase the informational and decision-making burden associated with medication management. Clinical pharmacists can help translate this complexity into structured therapeutic decision-making by applying pharmacological expertise to real-world clinical contexts. Their role is consequently not merely complementary to medical care but increasingly integral to the safe, effective, rational, and individualized use of medicines.

The contemporary development of clinical pharmacy services should prioritize integration rather than fragmentation. Pharmacovigilance, medication reconciliation, therapeutic drug monitoring, toxicity surveillance, prescribing review, adherence support, antimicrobial stewardship, deprescribing, pharmacogenomic interpretation, and patient education should be coordinated within a coherent medication-management framework. Such integration can strengthen the capacity of healthcare systems to detect risks early, prevent avoidable harm, optimize therapeutic benefit, and continuously adapt pharmacotherapy to patient needs. The ultimate objective is not simply to increase pharmacist involvement in clinical care, but to establish measurable improvements in the quality, safety, effectiveness, and sustainability of pharmacotherapy across diverse patient populations and healthcare settings.

Background

The evolution of modern pharmacotherapy has fundamentally changed the responsibilities associated with medication management. Medicines remain among the most important interventions for preventing disease progression, controlling symptoms, reducing mortality, and improving quality of life; however, their therapeutic benefits are accompanied by intrinsic and context-dependent risks. The probability of medication-related harm increases when treatment involves multiple medicines, complex dosing schedules, narrow therapeutic indices, significant pharmacokinetic variability, substantial interaction potential, or patients with multiple comorbidities. Consequently, contemporary healthcare requires mechanisms capable of continuously evaluating whether pharmacotherapy is appropriate, effective, safe, and consistent with the patient's changing clinical circumstances. Clinical pharmacy services have progressively emerged as an important component of this medication-management infrastructure.

The historical development of clinical pharmacy reflects a broader transition in pharmacy practice from medicine-oriented product management toward direct participation in patient care. Traditional pharmaceutical practice was primarily concerned with the preparation, storage, supply, and accurate dispensing of medicines. Although these functions remain essential to medication safety, the increasing complexity of pharmacotherapy demonstrated that safe medication use also requires active clinical evaluation. Clinical pharmacy consequently developed around the principle that pharmacists should apply their specialized knowledge of pharmacology, pharmacokinetics, pharmacodynamics, therapeutics, and medication-use processes directly to individual patients. This transition established the clinical pharmacist as a healthcare professional capable of identifying medication-related problems, recommending therapeutic modifications, monitoring treatment outcomes, and participating in multidisciplinary clinical decision-making.

The increasing prevalence of multimorbidity represents one of the principal factors driving the need for advanced clinical pharmacy services. Patients with cardiovascular disease, diabetes mellitus, chronic kidney disease, respiratory disorders, neurological conditions, psychiatric illness, cancer, and other chronic diseases frequently require several medicines simultaneously. Although multidrug treatment can be clinically justified, the accumulation of medicines creates a progressively more complicated therapeutic environment. Each additional medicine may introduce new opportunities for drug–drug interactions, adverse effects, administration errors, adherence difficulties, and monitoring requirements. Moreover, the interaction between several medicines may generate clinical consequences that cannot be predicted by considering each drug independently. Comprehensive pharmacotherapy assessment is therefore necessary to understand the total medication burden and its relationship to the patient's therapeutic objectives.

Polypharmacy should not be interpreted automatically as inappropriate prescribing. In many patients, particularly those with multiple chronic diseases, several concurrent medicines may represent evidence-based and necessary treatment. The clinically relevant distinction is between appropriate polypharmacy, in which medicines have clear indications and collectively provide a favorable benefit–risk balance, and inappropriate polypharmacy, in which medication burden exceeds therapeutic necessity or exposes the patient to disproportionate risk. Clinical pharmacists can contribute to this distinction through systematic medication review, assessment of indications, evaluation of treatment duplication, identification of potentially inappropriate medicines, and consideration of deprescribing opportunities. Such assessment requires integration of clinical evidence with individual patient characteristics rather than reliance on medication counts alone.

Medication-related problems constitute a broad spectrum of potentially preventable or manageable clinical concerns. These include untreated indications, unnecessary pharmacotherapy, inappropriate drug selection, ineffective treatment, subtherapeutic dosing, excessive dosing, adverse drug reactions, and clinically significant interactions, inappropriate duration of treatment, medication nonadherence, and inadequate monitoring. In

complex pharmacotherapy, several such problems may coexist. A patient may simultaneously receive an unnecessary medicine, experience an interaction involving an essential drug, and demonstrate inadequate adherence because of an excessively complicated regimen. Clinical pharmacy services provide a structured framework for identifying these problems and prioritizing interventions according to clinical importance.

Medication errors represent another major dimension of medication-related risk. Errors may occur at virtually every stage of the medication-use process, including prescribing, transcription, dispensing, preparation, administration, monitoring, and communication during transitions of care. Errors involving high-alert medicines or narrow therapeutic-index drugs can result in severe consequences even when the underlying mistake appears relatively minor. Clinical pharmacists can strengthen medication safety through prescription screening, medication reconciliation, dose verification, interaction assessment, allergy review, renal and hepatic dose adjustment, and monitoring of high-risk medicines. Their contribution can be particularly important where medication regimens are frequently modified or where patients transition between different healthcare environments.

The concept of medication safety has progressively expanded from preventing individual errors to establishing system-level mechanisms for reducing avoidable harm. Contemporary medication-safety science recognizes that adverse events frequently arise from multiple interacting factors, including communication failures, inadequate information, poorly designed workflows, excessive workload, insufficient monitoring, fragmented healthcare delivery, and technological limitations. Clinical pharmacists can contribute to organizational medication-safety programs by participating in medication-safety committees, developing institutional protocols, analyzing medication incidents, reviewing high-risk prescribing patterns, and implementing standardized safeguards. Their role thus extends from individual patient assessment to broader healthcare-quality improvement.

Pharmacovigilance provides an essential scientific framework for understanding and managing medication-related risks. It encompasses the detection, assessment, understanding, and prevention of adverse effects and other medicine-related problems. While pharmacovigilance has historically been strongly associated with spontaneous reporting of adverse drug reactions, modern approaches increasingly incorporate active surveillance, electronic health-record data, medication-use information, laboratory abnormalities, targeted monitoring, and real-world evidence. Clinical pharmacists can contribute to each of these activities because their routine professional responsibilities place them in direct contact with patients, medicines, prescribing decisions, and therapeutic outcomes.

One of the principal challenges in pharmacovigilance is underrecognition and underreporting of adverse drug reactions. Patients may not recognize symptoms as medicine-related, while healthcare professionals may attribute manifestations to underlying disease or may not have sufficient time to document and report suspected reactions. Clinical pharmacists can increase the sensitivity of medication-safety systems by systematically reviewing patients for potential adverse reactions and investigating temporal and pharmacological relationships. They can also educate patients regarding symptoms requiring medical attention and encourage appropriate communication of suspected medicine-related events. Improved reporting and documentation contribute to a more comprehensive understanding of medicine safety profiles.

Drug toxicity represents an important intersection between pharmacology, clinical pharmacy, and pharmacovigilance. Toxicity may result from excessive dose, drug accumulation, impaired elimination, metabolic inhibition, pharmacodynamic interactions, cumulative exposure, organ dysfunction, genetic susceptibility, or inappropriate treatment duration. Certain medicines are particularly sensitive to variations in exposure because their therapeutic and toxic concentration ranges are relatively close. In such circumstances, small changes in renal function, hepatic metabolism, interacting medicines, or adherence can substantially modify systemic exposure. Clinical pharmacists can identify these risks through pharmacokinetic assessment, dose review, laboratory monitoring, and therapeutic drug monitoring.

Renal and hepatic function are particularly important determinants of pharmacotherapy safety. Reduced renal clearance can lead to accumulation of medicines or active metabolites, while hepatic impairment can affect metabolism, protein binding, and systemic exposure. However, dose adjustment should not be based solely on an isolated laboratory value. Clinical interpretation requires consideration of the medicine's pharmacokinetic properties, therapeutic index, treatment indication, disease severity, and the reliability of available estimates of organ function. Clinical pharmacists can integrate these variables into individualized dosing recommendations and thereby reduce the probability of avoidable toxicity.

Therapeutic drug monitoring provides another mechanism for individualized pharmacotherapy. For selected medicines, measurement of drug concentrations can help determine whether exposure is likely to be therapeutic

or toxic. Nevertheless, concentration measurement is meaningful only when interpreted within the context of dosage, timing of administration, sampling time, pharmacokinetic characteristics, patient physiology, concomitant medicines, and therapeutic objectives. Clinical pharmacists can facilitate appropriate sampling and interpretation and can recommend dosage modifications when concentration data indicate clinically relevant deviations from the desired exposure. This approach is particularly valuable for medicines for which therapeutic response or toxicity correlates with systemic exposure.

The benefit–risk relationship represents the central principle underlying therapeutic optimization. A medicine should not be considered appropriate merely because it is effective under controlled conditions; its expected therapeutic benefit must be evaluated in relation to the patient's individual risk of adverse outcomes. This balance can change over time. A medicine initially prescribed for an acute indication may become unnecessary after clinical stabilization, while chronic therapy may require adjustment when renal function, weight, comorbidity, or concomitant medication changes. Clinical pharmacists can support continuous reassessment of this benefit–risk relationship and communicate recommendations to prescribers and patients.

Prescribing quality is closely connected with medication safety and therapeutic effectiveness. Rational prescribing requires an appropriate indication, evidence-supported drug selection, individualized dosage, suitable route and formulation, appropriate treatment duration, adequate monitoring, and periodic reassessment. Poor prescribing may involve unnecessary medications, inappropriate combinations, excessive duration, inadequate dosing, therapeutic duplication, or insufficient monitoring. Clinical pharmacy review can identify these problems before they result in clinically significant harm. Importantly, pharmacist recommendations should complement rather than replace physician judgment, functioning within an interdisciplinary framework in which therapeutic decisions are shared according to professional competence and patient needs.

Medication reconciliation has become a particularly important clinical pharmacy intervention because discrepancies frequently arise when patients move between healthcare settings. At admission, patients may be unable to provide accurate medication histories, while information from community pharmacies, outpatient records, previous hospitalizations, or multiple prescribers may be incomplete. During hospitalization, medicines may be intentionally changed, temporarily withheld, or discontinued. At discharge, these changes must be accurately communicated to patients and subsequent healthcare professionals. Clinical pharmacists can compare medication histories with current orders, identify unintended discrepancies, clarify treatment intentions, and support accurate discharge medication lists.

Transitions of care are therefore critical periods for medication safety. Errors occurring during admission, transfer, and discharge may remain undetected until they produce clinical consequences after the patient has left the healthcare facility. Pharmacist-led reconciliation and counseling can help ensure continuity and improve patients' understanding of medication changes. Follow-up after discharge can provide an additional opportunity to identify adverse effects, adherence difficulties, and unresolved discrepancies. This longitudinal approach reinforces the principle that medication safety extends beyond the physical boundaries of a hospital.

Clinical pharmacy services are also highly relevant to antimicrobial stewardship. Antimicrobial resistance has transformed appropriate antimicrobial prescribing into both an individual patient-safety issue and a major public-health priority. Excessive antimicrobial exposure can increase adverse effects and selection pressure for resistant organisms, whereas inadequate therapy can result in treatment failure and complications. Pharmacists participating in antimicrobial stewardship can assess indication, microbiological results, dosage, route, renal function, interactions, treatment duration, de-escalation opportunities, and intravenous-to-oral conversion. These activities support both effective treatment and responsible antimicrobial use.

High-risk medicines require particularly systematic clinical pharmacy involvement. Anticoagulants, insulin, opioids, antineoplastic medicines, immunosuppressants, selected antiarrhythmics, anticonvulsants, aminoglycosides, and other medicines with substantial toxicity potential may produce serious harm when incorrectly prescribed, administered, or monitored. Clinical pharmacists can develop or implement protocols addressing dosing, laboratory surveillance, interaction management, patient education, and transitions of care. Risk-based allocation of pharmacy resources allows intensive monitoring to be directed toward patients and medicines with the greatest potential for preventable harm.

Patient adherence constitutes an additional determinant of therapeutic effectiveness. Even an optimally selected medication regimen cannot produce its intended benefit if the patient cannot or does not use the medicine appropriately. Nonadherence may be intentional or unintentional and can result from adverse effects, complex regimens, inadequate understanding, cost, forgetfulness, cultural or social factors, or concerns regarding medication necessity. Clinical pharmacists can assess adherence barriers and develop individualized strategies

such as regimen simplification, counseling, medication synchronization, education, reminders, and collaborative goal setting. Importantly, adherence should be approached as a multifactorial clinical phenomenon rather than simply as a matter of patient behavior.

Patient education is therefore integral to clinical pharmacy. Effective counseling can improve understanding of medication purpose, dosage, administration, expected benefits, potential adverse effects, warning signs, storage requirements, and monitoring needs. Education also supports shared decision-making by enabling patients to participate meaningfully in discussions about treatment options. In complex pharmacotherapy, patient understanding is particularly important because multiple medicines may have different administration schedules and monitoring requirements. Clinical pharmacists can translate technical pharmacological information into accessible explanations while maintaining scientific accuracy.

The development of precision medicine has expanded the potential contribution of clinical pharmacy beyond conventional medication review. Individual variability in drug response can be influenced by genetics, age, organ function, disease characteristics, concomitant medicines, environmental factors, and adherence. Pharmacogenomic testing can provide clinically actionable information for selected medicines and patient populations. Clinical pharmacists with appropriate expertise can assist in interpreting pharmacogenomic results and integrating them with clinical data. However, precision pharmacotherapy should be viewed as multidimensional rather than exclusively genetic; individualized treatment requires synthesis of pharmacogenomic, pharmacokinetic, pharmacodynamic, clinical, and patient-reported information.

Deprescribing has similarly become an important component of medication optimization. In patients with long-term polypharmacy, medicines may remain on medication lists even after the original indication has changed or disappeared. Continued exposure can increase treatment burden and adverse-event risk. Structured deprescribing involves evaluating the ongoing indication, expected benefit, potential harm, treatment goals, withdrawal risks, and patient preferences. Clinical pharmacists can identify candidates for deprescribing and work with prescribers and patients to develop safe discontinuation or dose-reduction strategies. Appropriate deprescribing is not undertreatment; rather, it represents rational optimization of medication burden according to current therapeutic priorities.

Clinical pharmacy also contributes to chronic disease management. Long-term treatment requires repeated evaluation because disease status and therapeutic response are dynamic. Patients may require medication escalation, de-escalation, substitution, or discontinuation over time. Clinical pharmacists can monitor treatment effectiveness, identify adverse effects, reinforce adherence, review laboratory results, and communicate recommendations to the broader healthcare team. Their longitudinal involvement can improve continuity and support sustained therapeutic control.

The digitalization of healthcare has created new opportunities for clinical pharmacy practice. Electronic prescribing systems can facilitate prescription review and reduce certain transcription errors, while electronic health records provide access to medication histories, laboratory results, diagnoses, and clinical observations. Clinical decision-support systems can identify potential interactions, contraindications, allergies, and dosing concerns. Nevertheless, automated systems may produce excessive low-value alerts, potentially contributing to alert fatigue. Clinical pharmacists can add value by interpreting alerts according to clinical relevance and prioritizing interventions according to actual patient risk.

Artificial intelligence, predictive analytics, and pharmacovigilance databases may further transform medication-risk surveillance. Algorithms can potentially identify patterns associated with adverse events, treatment failure, or inappropriate prescribing across large datasets. However, algorithmic outputs require clinical validation and contextual interpretation. Clinical pharmacists can contribute to the safe implementation of such technologies by evaluating the pharmacological plausibility of detected signals, assessing clinical relevance, and ensuring that automated recommendations remain subordinate to individualized professional judgment.

Interprofessional collaboration is fundamental to effective clinical pharmacy practice. Complex pharmacotherapy cannot be safely managed through isolated professional activity. Physicians contribute diagnostic and therapeutic expertise; nurses provide continuous patient observation and medication-administration information; pharmacists contribute specialized medication expertise; laboratory professionals provide objective biochemical and hematological data; and other healthcare professionals contribute additional dimensions of patient care. Clinical pharmacists can function as medication-therapy specialists within this team, facilitating communication and ensuring that pharmacotherapeutic considerations are incorporated into broader clinical decision-making.

The effectiveness of clinical pharmacy services should be assessed through robust clinical, process, economic, and patient-centered outcomes. Counting the number of pharmacist interventions provides limited information unless those interventions are connected to meaningful improvements in care. Appropriate evaluation may include reductions in preventable adverse drug events, improvement in medication appropriateness, achievement of therapeutic targets, reduction in medication discrepancies, improved adherence, decreased treatment-related toxicity, reduced readmissions, shorter hospitalization, improved quality of life, and more efficient healthcare-resource utilization. Economic evaluation can additionally determine whether clinical pharmacy interventions provide sufficient value to support long-term institutional investment.

Despite increasing recognition of the clinical pharmacist's role, implementation remains heterogeneous across healthcare systems. Barriers may include insufficient staffing, inconsistent professional recognition, limited prescribing authority, inadequate access to patient information, insufficient reimbursement, weak integration into clinical teams, and variability in postgraduate education. In some settings, pharmacists remain predominantly associated with medication supply rather than direct patient care. The transition toward comprehensive clinical pharmacy therefore requires institutional commitment, competency-based education, professional development, interdisciplinary collaboration, and clear definitions of clinical responsibilities.

The educational foundation of clinical pharmacy must correspond to the increasing complexity of pharmacotherapy. Modern clinical pharmacists require advanced knowledge of pharmacology, pharmacokinetics, pharmacodynamics, therapeutics, pathophysiology, laboratory interpretation, pharmacovigilance, medication-safety science, evidence-based medicine, communication, and health informatics. Continuing professional development is particularly important because new medicines, therapeutic guidelines, safety signals, and pharmacogenomic evidence continue to emerge. Advanced education can strengthen pharmacists' capacity to interpret complex clinical information and participate meaningfully in multidisciplinary treatment decisions.

From a healthcare-system perspective, clinical pharmacy can be viewed as a strategic mechanism for improving the quality of medication use. Its functions intersect with patient safety, clinical effectiveness, quality assurance, antimicrobial stewardship, pharmacovigilance, chronic disease management, and healthcare-resource optimization. The pharmacist's contribution is therefore broader than preventing isolated medication errors. It involves establishing a continuous process in which medication regimens are assessed, monitored, adjusted, and reassessed according to evolving patient needs.

The conceptual framework underlying contemporary clinical pharmacy can consequently be summarized through several interconnected domains: **appropriateness, effectiveness, safety, adherence, monitoring, continuity, and risk management.** Appropriateness concerns whether the medicine is indicated and suitable; effectiveness concerns whether the intended therapeutic outcome is achieved; safety concerns whether treatment produces unacceptable harm; adherence concerns whether the patient can and does use therapy correctly; monitoring concerns whether response and toxicity are systematically evaluated; continuity concerns whether medication information remains accurate across healthcare settings; and risk management concerns whether foreseeable medication-related hazards are proactively identified and mitigated. Clinical pharmacy services provide a professional structure through which these domains can be integrated.

The growing complexity of therapeutic decision-making therefore reinforces the need for a coordinated clinical pharmacy model. Pharmacovigilance should not be separated from medication review; toxicity monitoring should not be separated from therapeutic drug monitoring; prescribing quality should not be separated from medication reconciliation; and treatment effectiveness should not be assessed independently of adherence and patient preferences. These domains are functionally interconnected. A medicine may be pharmacologically effective but clinically inappropriate because of toxicity; an appropriate medicine may fail because of nonadherence; a safe regimen may become unsafe following deterioration in renal function; and an effective treatment may become unnecessary following a change in therapeutic goals.

The modern clinical pharmacy is characterized by a transition from episodic medication checking toward continuous medication management. This transition reflects the recognition that medication-related outcomes emerge from interactions among pharmacological properties, patient characteristics, clinical decisions, healthcare processes, and patient behavior. Clinical pharmacists are uniquely positioned to integrate these dimensions because their professional expertise is specifically focused on the safe and effective use of medicines.

The strategic importance of clinical pharmacy is consequently increasing as healthcare systems seek to improve patient safety while maintaining therapeutic effectiveness and controlling resource utilization. A mature clinical

pharmacy service can contribute to earlier identification of medication-related risks, more rational prescribing, improved monitoring, and reduction of unnecessary medication exposure, better adherence, and stronger continuity of care. These contributions are especially relevant to patients receiving complex pharmacotherapy, for whom conventional medication-management approaches may be insufficient.

The scientific rationale for integrating clinical pharmacy services into complex pharmacotherapy rests on the principle that optimal medication use requires continuous clinical assessment. The objective is not simply to ensure that the correct medicine reaches the correct patient, but to ensure that the selected medicine remains appropriate, correctly dosed, adequately monitored, effectively used, and consistent with the patient's evolving therapeutic goals. Through integration of pharmacovigilance, medication-safety surveillance, toxicity prevention, therapeutic optimization, prescribing-quality assessment, adherence support, therapeutic drug monitoring, deprescribing, antimicrobial stewardship, and interdisciplinary collaboration, clinical pharmacy provides a comprehensive framework for reducing medication-related risk while maximizing therapeutic benefit.

Within this framework, the role of the clinical pharmacist is increasingly recognized as an essential component of evidence-based, patient-centered pharmacotherapy. The expansion of clinical pharmacy services represents not merely an evolution of professional practice but a broader transformation in how healthcare systems conceptualize medication safety and therapeutic quality. The central objective is to establish medication use as a continuously monitored clinical process in which risks are anticipated, benefits are evaluated, treatment is individualized, and outcomes are systematically assessed. Such an approach provides the scientific foundation for integrating clinical pharmacy more deeply into modern pharmacotherapy and for strengthening the overall quality, safety, effectiveness, and sustainability of medication-related care.

Goal

The primary goal of this scientific discourse is to comprehensively evaluate and substantiate the role of clinical pharmacy services in optimizing complex pharmacotherapy through an integrated, evidence-based, patient-centered framework encompassing pharmacovigilance, drug-toxicity surveillance, medication safety, therapeutic optimization, treatment effectiveness, prescribing quality, and medication-related risk reduction.

Specifically, the study aims to:

- Examine the scientific and clinical foundations of contemporary clinical pharmacy services and their evolving role in multidisciplinary healthcare and complex medication management.
- Evaluate the contribution of clinical pharmacists to pharmacotherapy optimization, including medication review, medication reconciliation, therapeutic assessment, dose individualization, treatment monitoring, and identification of drug-related problems.
- Analyze the role of clinical pharmacy in pharmacovigilance, particularly in the detection, assessment, documentation, reporting, prevention, and management of adverse drug reactions and other medicine-related safety signals.
- Assess strategies for preventing and managing drug toxicity, with particular consideration of high-risk medicines, narrow therapeutic-index drugs, polypharmacy, drug interactions, renal and hepatic impairment, cumulative drug exposure, and patient-specific susceptibility.
- Examine the contribution of clinical pharmacy services to medication safety through prevention and identification of prescribing errors, dispensing discrepancies, administration errors, contraindications, therapeutic duplication, inappropriate dosing, and medication-related harm.
- Evaluate approaches to therapeutic optimization and individualized pharmacotherapy, incorporating pharmacokinetic and pharmacodynamic principles, therapeutic drug monitoring, clinical laboratory parameters, pharmacogenomic considerations, and patient-specific therapeutic goals.
- Analyze the influence of clinical pharmacy interventions on prescribing quality, including appropriate drug selection, dosage, duration, route of administration, treatment indication, monitoring requirements, deprescribing, and adherence to evidence-based clinical guidelines.
- Investigate the potential of clinical pharmacy services to improve therapeutic effectiveness and patient outcomes through continuous monitoring, adherence support, patient counseling, regimen simplification, and interdisciplinary clinical decision-making.
- Examine the role of clinical pharmacists in medication-related risk stratification and prevention, emphasizing proactive identification of patients, medicines, and therapeutic situations associated with elevated risks of adverse outcomes.

- Develop an integrated conceptual framework linking clinical pharmacy, pharmacovigilance, medication safety, toxicity prevention, therapeutic optimization, prescribing quality, and risk reduction as interconnected components of modern evidence-based pharmacotherapy.
- Identify contemporary challenges and future directions for clinical pharmacy practice, including digital health technologies, electronic prescribing, clinical decision-support systems, artificial intelligence, pharmacogenomics, precision medicine, and advanced pharmacovigilance methodologies.
- Emphasize the importance of interdisciplinary collaboration among clinical pharmacists, physicians, nurses, pharmacologists, and other healthcare professionals in achieving safe, effective, individualized, and rational pharmacotherapy.
- The goal is to demonstrate that integrated clinical pharmacy services constitute a critical healthcare mechanism for maximizing therapeutic benefit while minimizing preventable medication-related harm, thereby strengthening the quality, safety, effectiveness, rationality, and sustainability of complex pharmacotherapy.

METHODOLOGY

This scientific discourse employed a comprehensive narrative and integrative literature-review methodology to critically examine the role of clinical pharmacy services in optimizing complex pharmacotherapy, with particular emphasis on pharmacovigilance, drug toxicities, medication safety, therapeutic optimization, treatment effectiveness, prescribing quality, and medication-related risk reduction. The methodological framework was designed to synthesize evidence from clinical pharmacology, pharmacy practice, pharmacovigilance, medication-safety science, therapeutics, and multidisciplinary healthcare research.

Relevant scientific literature was identified through systematic searches of major biomedical and pharmaceutical information sources, including PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar, and relevant international clinical and regulatory publications. Search concepts incorporated combinations of terms such as clinical pharmacy services, clinical pharmacist, complex pharmacotherapy, polypharmacy, pharmacovigilance, adverse drug reactions, drug toxicity, medication safety, medication errors, therapeutic optimization, therapeutic drug monitoring, prescribing quality, medication reconciliation, deprescribing, antimicrobial stewardship, and risk reduction. Priority was given to peer-reviewed studies, systematic and narrative reviews, clinical guidelines, consensus statements, pharmacovigilance reports, and authoritative medication-safety documents.

The retrieved evidence was critically analyzed according to several interconnected domains: (1) identification and prevention of medication-related problems; (2) adverse drug reaction detection and pharmacovigilance; (3) prevention and management of drug toxicity; (4) medication reconciliation and medication-error prevention; (5) individualized dosage and therapeutic drug monitoring; (6) prescribing appropriateness and deprescribing; (7) adherence and patient-centered pharmaceutical care; (8) antimicrobial stewardship; and (9) clinical and healthcare-system outcomes associated with pharmacist interventions.

Evidence was synthesized thematically rather than through quantitative meta-analysis. Particular attention was given to the consistency of findings, clinical relevance, methodological limitations, applicability to complex patients, and the relationship between pharmacist interventions and measurable therapeutic or safety outcomes. The analysis also incorporated an interdisciplinary perspective integrating pharmacological, clinical, epidemiological, technological, and healthcare-quality considerations.

The synthesized evidence was used to develop an integrated conceptual interpretation of clinical pharmacy as a continuous medication-management process in which risk identification, pharmacovigilance, safety surveillance, therapeutic optimization, prescribing-quality improvement, and outcome monitoring operate synergistically. The methodology therefore emphasized evidence-based interpretation while recognizing heterogeneity among healthcare systems, clinical settings, patient populations, and models of clinical pharmacy practice.

This study was conducted as a systematic review in accordance with the principles of PRISMA 2020 to ensure methodological transparency and reproducibility. A comprehensive literature search was performed across major biomedical databases, including PubMed/MEDLINE, Scopus, and Web of Science, to identify relevant studies evaluating pharmacist-led interventions in the management of polypharmacy.

Data extraction was performed systematically, capturing study design, population characteristics, intervention type, and key outcomes. The methodological quality and risk of bias of included studies were assessed using standardized tools developed by the Cochrane Collaboration. Due to heterogeneity in study designs and outcome

measures, findings were synthesized using a structured narrative approach with quantitative interpretation where applicable.

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis demonstrated that clinical pharmacy services constitute a multidimensional component of contemporary healthcare delivery, particularly in patients exposed to complex pharmacotherapy, polypharmacy, high-risk medicines, narrow therapeutic-index drugs, and treatment regimens requiring continuous monitoring. The synthesized evidence indicates that the contribution of clinical pharmacists extends substantially beyond medication dispensing and conventional pharmaceutical supply. Clinical pharmacy practice increasingly encompasses systematic medication review, identification and resolution of drug-related problems, pharmacotherapeutic assessment, adverse drug reaction surveillance, therapeutic drug monitoring, medication reconciliation, optimization of dosage regimens, prevention of medication errors, patient education, adherence support, interprofessional collaboration, and participation in clinical decision-making. Collectively, these activities were associated with improved medication safety, more rational prescribing, reduction of preventable drug-related harm, optimization of therapeutic outcomes, and strengthening of pharmacovigilance systems.

A principal result was the consistent identification of medication-related risk as a major determinant of preventable morbidity within complex therapeutic environments. The probability of inappropriate prescribing, drug–drug interactions, therapeutic duplication, contraindicated treatment, dosing errors, inadequate monitoring, and adverse drug reactions increases as the number and complexity of medicines increase. Clinical pharmacy interventions provided an organized mechanism for detecting these risks before they resulted in clinically significant harm. Medication histories, reconciliation procedures, prescription screening, laboratory-data interpretation, and systematic assessment of the indication, effectiveness, safety, and appropriateness of each medicine enabled pharmacists to identify discrepancies that might otherwise remain undetected. The results therefore support the interpretation of clinical pharmacy as a preventive clinical discipline in which medication-related risks are actively identified and managed rather than addressed only after adverse outcomes occur.

The findings demonstrated that medication reconciliation represents one of the most important operational mechanisms through which clinical pharmacy services improve pharmacotherapy. Reconciliation is particularly relevant during transitions of care, including hospital admission, transfer between clinical departments, discharge, and movement from institutional to community-based care. Differences between pre-admission medicines and newly prescribed therapies may arise from incomplete medication histories, communication failures, patient misunderstanding, changes in clinical status, or unintended discontinuation and duplication. Pharmacist-led reconciliation enables these discrepancies to be systematically classified as intentional or unintentional and facilitates communication with prescribers and other healthcare professionals. The resulting improvement in medication-list accuracy contributes directly to prescribing quality and reduces the likelihood of omission, duplication, incorrect dosage, or inappropriate continuation of therapy.

Another major result concerned the role of clinical pharmacists in optimizing pharmacotherapy through individualized assessment. Complex pharmacotherapy cannot be adequately evaluated by considering individual medicines in isolation. The therapeutic response of one medicine may depend on renal function, hepatic function, age, body composition, nutritional status, comorbidities, genetic characteristics, concurrent medicines, and adherence behavior. Clinical pharmacists contribute by evaluating the entire pharmacotherapeutic regimen and identifying interactions between pharmacological treatment and patient-specific characteristics. This approach facilitates individualized dose selection, appropriate treatment duration, optimization of administration schedules, and selection of therapeutically appropriate alternatives when a medicine presents excessive risk or insufficient benefit.

The findings showed that renal and hepatic function are particularly important determinants of pharmacotherapeutic safety. Medicines eliminated predominantly through the kidneys may accumulate when renal clearance is impaired, whereas drugs extensively metabolized by the liver may demonstrate altered exposure in patients with hepatic dysfunction. Clinical pharmacists can integrate laboratory parameters with pharmacological knowledge to identify patients requiring dose adjustment, altered dosing intervals, intensified monitoring, or therapeutic substitution. This activity is particularly important for antimicrobials, anticoagulants, antiepileptic medicines, cardiovascular agents, immunosuppressive drugs, and other therapies for which relatively small changes in systemic exposure may produce clinically meaningful differences in effectiveness or toxicity.

The analysis also demonstrated an important relationship between clinical pharmacy services and pharmacovigilance. Pharmacovigilance is dependent not only on the existence of spontaneous adverse-event reporting systems but also on the capacity of healthcare professionals to recognize, document, evaluate, communicate, and prevent medication-related harm. Clinical pharmacists occupy a strategically important position because their professional activities place them at the interface between pharmacological knowledge, medication utilization, patient monitoring, and clinical decision-making. Their participation improves the identification of suspected adverse drug reactions and facilitates evaluation of temporal relationships, dose relationships, alternative explanations, concomitant medicines, and patient-specific susceptibility factors.

The results indicated that pharmacist involvement can strengthen the quality of adverse drug reaction documentation. Accurate documentation requires more than recording the presence of a symptom. Clinically meaningful pharmacovigilance information may include the suspected medicine, dosage, route of administration, treatment duration, onset of the reaction, clinical manifestations, relevant laboratory findings, concomitant medicines, interventions undertaken, outcome, and subsequent recommendations. Clinical pharmacists are particularly positioned to contribute to this process because of their expertise in pharmacodynamics, pharmacokinetics, adverse-effect profiles, drug interactions, and medication-related causality assessment. Consequently, pharmacist participation may increase the clinical value of safety reports and facilitate identification of recurring medication-related signals.

Drug toxicity management emerged as another major area of clinical pharmacy contribution. Toxicity may result from excessive dose, accumulation, pharmacokinetic interactions, pharmacodynamic interactions, inappropriate duration of therapy, patient-specific susceptibility, medication error, or intentional or unintentional overdose. The findings support a model in which clinical pharmacists participate throughout the toxicity-management continuum, from prevention and early detection to intervention and follow-up. Early recognition of abnormal laboratory parameters, unexpected clinical symptoms, changes in vital signs, or patterns suggestive of drug-induced organ injury permits earlier communication with the medical team and potentially prevents progression to severe toxicity.

Particular importance was identified for medicines associated with nephrotoxicity, hepatotoxicity, cardiotoxicity, neurotoxicity, hematological toxicity, gastrointestinal injury, bleeding, and metabolic disturbances. Clinical pharmacy monitoring can assist in identifying patients who require baseline investigations, periodic laboratory surveillance, dose modification, or discontinuation of potentially harmful therapy. In complex treatment regimens, the pharmacist's contribution is not limited to identifying a toxic medicine; it also involves distinguishing medication-related toxicity from disease-related manifestations and determining whether alternative therapeutic strategies can preserve treatment effectiveness while reducing risk.

The results additionally demonstrated the significance of therapeutic drug monitoring in selected pharmacotherapeutic situations. Therapeutic drug monitoring is particularly valuable when there is a relatively narrow therapeutic window, substantial interindividual pharmacokinetic variability, a strong relationship between concentration and clinical effect or toxicity, or a need to maintain therapeutic exposure during prolonged treatment. Clinical pharmacists contribute to appropriate selection of medicines requiring monitoring, interpretation of measured concentrations, assessment of sampling time, evaluation of pharmacokinetic variables, and translation of laboratory results into practical dosing recommendations. Importantly, concentration values should not be interpreted independently of clinical circumstances. The findings therefore support an integrated therapeutic drug-monitoring approach that combines measured drug concentrations with dosing history, sampling time, renal and hepatic function, interacting medicines, treatment response, and toxicity indicators.

Drug–drug interaction management represented another prominent outcome. Polypharmacy increases the possibility of pharmacokinetic interactions involving absorption, distribution, metabolism, or elimination, as well as pharmacodynamic interactions involving additive, synergistic, or antagonistic effects. Clinical pharmacists can systematically review medication profiles and identify combinations associated with clinically important risks. Such risks include excessive anticoagulation, QT-interval prolongation, central nervous system depression, serotonergic toxicity, hypotension, hypoglycemia, nephrotoxicity, altered antimicrobial exposure, and reduced therapeutic effectiveness. The findings indicate that the clinical value of interaction screening depends on prioritization. Not every theoretical interaction requires intervention; therefore, pharmacists must distinguish clinically relevant interactions from interactions that have limited practical significance.

Prescribing quality was also substantially linked to clinical pharmacy involvement. Rational prescribing requires that the selected medicine has an appropriate indication, produces an expected benefit, is administered at an

appropriate dose and duration, is suitable for the individual patient, and is accompanied by appropriate monitoring. Pharmacists contribute to each of these dimensions by reviewing prescriptions and identifying deviations from evidence-based therapeutic principles. Their interventions may include recommending discontinuation of unnecessary therapy, correcting doses, optimizing administration schedules, suggesting therapeutic alternatives, identifying contraindications, and recommending appropriate monitoring.

The results showed that deprescribing is an important component of medication optimization, particularly among patients receiving multiple long-term medicines. Polypharmacy should not be interpreted solely by the number of medicines prescribed; clinical appropriateness, therapeutic goals, treatment duration, patient preferences, and risk–benefit relationships must also be considered. Clinical pharmacists can identify medicines with limited current benefit, therapeutic duplication, potentially inappropriate medicines, and treatments whose risks have become greater than their anticipated benefits because of changes in clinical condition. Structured deprescribing can therefore reduce medication burden while maintaining or improving therapeutic objectives.

The contribution of clinical pharmacy to antimicrobial stewardship. Inappropriate antimicrobial prescribing contributes to antimicrobial resistance, unnecessary adverse effects, increased healthcare expenditure, and avoidable disruption of the patient's microbiome. Clinical pharmacists can participate in antimicrobial selection, dose optimization, route conversion, duration assessment, de-escalation, renal-dose adjustment, therapeutic drug monitoring, and evaluation of microbiological data. These interventions connect individual patient safety with population-level public health objectives. Optimizing antimicrobial exposure can simultaneously improve treatment effectiveness, reduce toxicity, and limit unnecessary selective pressure favoring antimicrobial resistance.

The analysis demonstrated that medication safety is strongly dependent on interprofessional communication. Clinical pharmacists achieve greater impact when integrated into multidisciplinary healthcare teams rather than functioning as isolated medication reviewers. Collaboration with physicians, nurses, laboratory specialists, and other healthcare professionals facilitates timely exchange of information regarding treatment response, adverse reactions, laboratory abnormalities, adherence, and changes in clinical status. Pharmacists can translate pharmacological information into actionable recommendations, while other professionals provide complementary clinical information required for individualized therapeutic decisions.

The study also identified patient education as an important mechanism connecting pharmacotherapy optimization with real-world treatment effectiveness. Even a pharmacologically appropriate prescription may fail to achieve its intended outcome if patients do not understand how and when to take their medicines, discontinue therapy prematurely, use medicines incorrectly, or experience barriers to adherence. Clinical pharmacists can provide individualized counseling concerning dosing schedules, administration techniques, expected therapeutic effects, common adverse effects, warning symptoms, interactions with other medicines or substances, and the importance of adherence. Education may also improve patients' ability to recognize potentially serious adverse reactions and seek appropriate medical assistance.

Medication adherence emerged as a multidimensional determinant of effectiveness. Nonadherence may be intentional or unintentional and can arise from adverse effects, complex regimens, cost, inadequate understanding, forgetfulness, cognitive limitations, or perceived lack of therapeutic benefit. Clinical pharmacy services can address these factors through regimen simplification, synchronization of medication schedules, education, follow-up, adherence assessment, and communication with prescribers regarding tolerability problems. The results therefore support the concept that adherence should be approached as a therapeutic variable rather than merely as a behavioral problem.

The research indicated that clinical pharmacy services can improve continuity of pharmacotherapy across healthcare settings. Fragmentation between inpatient and outpatient care creates substantial opportunities for medication discrepancies and therapeutic misunderstanding. Pharmacist involvement in discharge planning can ensure that medication changes are clearly documented, that discontinued medicines are distinguished from continuing therapies, and that patients understand the purpose and administration of newly prescribed medicines. Follow-up after discharge provides an additional opportunity to identify adverse effects, adherence problems, and unresolved medication-related issues. Such continuity contributes to safer transitions and potentially reduces avoidable healthcare utilization.

A further result was the relationship between clinical pharmacy interventions and healthcare-resource utilization. Preventing adverse drug events, avoiding unnecessary medicines, optimizing dosing, and reducing treatment failure can decrease avoidable hospital admissions, prolonged hospitalization, emergency consultations, laboratory investigations, and additional therapeutic interventions. Although the magnitude of economic benefit

varies according to healthcare setting and intervention type, the overall direction of effect supports the economic rationale for integrating clinical pharmacists into multidisciplinary care. Importantly, the economic value of clinical pharmacy should be assessed not merely through direct medication-cost reductions but through the broader consequences of preventing clinically significant medication-related harm.

The public health implications of clinical pharmacy services were substantial. Medication safety is fundamentally a public health issue because preventable medication-related harm affects patients across hospitals, outpatient practices, long-term care facilities, pharmacies, and community settings. Clinical pharmacists can contribute to public health by improving rational medicine use, strengthening pharmacovigilance, supporting antimicrobial stewardship, promoting adherence, reducing inappropriate polypharmacy, and improving health literacy. Their activities therefore operate simultaneously at the individual, organizational, and population levels.

The findings suggest that pharmacovigilance and public health should not be considered separate domains. Signals identified through individual patient encounters can contribute to broader understanding of medicine-associated risks. Systematic documentation of adverse drug reactions, medication errors, treatment failures, and toxicity patterns can generate information useful for institutional medication-safety programs and wider pharmacovigilance systems. Clinical pharmacists can consequently serve as an important bridge between patient-level medication surveillance and population-level drug-safety monitoring.

Digital health technologies were also identified as increasingly relevant to clinical pharmacy practice. Electronic prescribing systems, computerized clinical decision support, electronic medication reconciliation, interaction databases, laboratory-alert systems, and electronic pharmacovigilance platforms can increase the capacity of pharmacists to detect medication-related risks. However, the results indicate that technology should function as a decision-support mechanism rather than a substitute for professional clinical judgment. Automated alerts may produce alert fatigue when poorly prioritized; therefore, pharmacist interpretation remains necessary to determine the clinical relevance of electronically generated warnings.

The analysis additionally highlighted the potential role of pharmacogenomics and precision medicine in future clinical pharmacy practice. Genetic differences affecting drug metabolism, transport, receptor activity, and immune-mediated responses can contribute to interindividual variation in treatment response and adverse drug reactions. Pharmacists with appropriate training can assist in interpreting pharmacogenomic information and incorporating it into medication selection and dose optimization. Nevertheless, the findings support cautious implementation based on clinically validated biomarkers, evidence of actionable therapeutic benefit, appropriate laboratory infrastructure, and consideration of cost-effectiveness and ethical issues.

The results showed that clinical pharmacy effectiveness is influenced by the organizational environment in which services are delivered. Pharmacists require appropriate access to patient records, laboratory results, medication histories, prescribing information, and relevant clinical documentation. Clear professional responsibilities, collaborative relationships, standardized intervention protocols, and institutional support facilitate effective practice. Conversely, limited access to clinical information, inadequate staffing, insufficient integration into clinical teams, and unclear professional roles can restrict the potential impact of pharmacy services.

Another important finding concerned the need for standardized documentation and outcome measurement. Recording the number of pharmacist interventions alone provides limited information about clinical value. More meaningful evaluation should consider the type and severity of medication-related problems identified, interventions accepted by prescribers, changes in medication utilization, adverse drug events prevented, clinical outcomes, readmission rates, treatment effectiveness, patient-reported outcomes, and economic consequences. Standardized outcome frameworks can improve comparability across institutions and strengthen the evidence base for clinical pharmacy implementation.

The findings also support the importance of risk stratification. Not all patients require identical levels of pharmacist intervention. Individuals receiving multiple medicines, high-alert medications, narrow therapeutic-index drugs, complex regimens, or medicines requiring intensive laboratory monitoring may benefit from more comprehensive pharmaceutical care. Similarly, patients undergoing transitions of care or demonstrating previous medication-related problems may warrant intensified review. Risk-based allocation of pharmacist resources can increase efficiency while preserving patient safety.

The results demonstrate that clinical pharmacy services represent an integrated medication-management system rather than a single intervention. Their effectiveness derives from the interaction of multiple activities: medication reconciliation identifies discrepancies; medication review evaluates appropriateness;

pharmacovigilance detects adverse reactions; therapeutic drug monitoring supports exposure optimization; interaction assessment prevents pharmacological hazards; patient education promotes adherence; antimicrobial stewardship supports rational anti-infective use; and interprofessional collaboration ensures that recommendations are incorporated into broader clinical decision-making.

The findings support a conceptual model in which clinical pharmacy contributes to a continuous cycle of medication optimization. The cycle begins with comprehensive assessment of the patient's medicines and clinical characteristics, followed by identification of medication-related problems, evaluation of therapeutic alternatives, implementation of individualized interventions, monitoring of effectiveness and safety, reassessment of treatment response, and modification of therapy when necessary. This iterative process is particularly appropriate for chronic disease management and other clinical situations in which pharmacotherapy evolves with changes in disease status, laboratory parameters, treatment response, and patient preferences.

The evidence also indicates that the ultimate value of clinical pharmacy services should not be reduced to the number of interventions performed. The clinically meaningful endpoint is whether pharmaceutical expertise contributes to better patient outcomes, safer medication use, improved prescribing quality, reduced preventable harm, and more efficient utilization of healthcare resources. From this perspective, clinical pharmacists function as medication-therapy specialists embedded within multidisciplinary care systems.

The results show a strong scientific rationale for expanding clinical pharmacy services within modern healthcare systems. Clinical pharmacists contribute to pharmacovigilance, toxicity prevention and management, medication-error reduction, therapeutic optimization, prescribing quality, treatment effectiveness, adherence, antimicrobial stewardship, and continuity of care. These contributions collectively reduce medication-related risk and extend beyond individual patient management toward broader public health objectives. The synthesis consequently supports the integration of clinical pharmacy into institutional medication-safety strategies, multidisciplinary clinical pathways, pharmacovigilance programs, antimicrobial stewardship initiatives, and population-oriented rational medicine-use policies. The emerging model is one in which clinical pharmacy is positioned not as an auxiliary pharmaceutical function but as a clinically integrated component of evidence-based pharmacotherapy and medication safety, with the potential to improve both individual therapeutic outcomes and the overall quality, safety, efficiency, and public health performance of healthcare systems.

The present research demonstrates that clinical pharmacy services constitute a critical component of contemporary medication-use systems and have substantial potential to improve the safety, quality, effectiveness, and rationality of complex pharmacotherapy. The findings indicate that the clinical pharmacist has evolved from a predominantly product-oriented professional responsible for medication preparation and dispensing into an integral clinical practitioner participating in medication reconciliation, pharmacotherapeutic assessment, identification and prevention of drug-related problems, therapeutic optimization, pharmacovigilance, adverse drug reaction management, medication-error prevention, patient education, treatment monitoring, and interdisciplinary decision-making. This transformation is particularly important in patients exposed to polypharmacy, narrow therapeutic-index medicines, multiple chronic diseases, complex dosing regimens, frequent transitions of care, and treatments associated with significant toxicity. The evidence considered in this research consistently supports the proposition that clinical pharmacy services can strengthen the medication-management process by introducing systematic pharmacological expertise at multiple stages of prescribing, dispensing, administration, monitoring, and follow-up.

The findings further demonstrate that complex pharmacotherapy represents a multidimensional clinical challenge in which therapeutic benefit must continuously be balanced against potential medication-related harm. Complexity is not determined solely by the number of prescribed medicines. It also reflects the pharmacodynamic and pharmacokinetic characteristics of medicines, therapeutic index, dosing frequency, route of administration, duration of treatment, comorbidities, organ-function status, age-related physiological changes, genetic variability, adherence characteristics, drug-drug and drug-disease interactions, previous adverse drug reactions, and the clinical environment in which medicines are administered. In this context, conventional prescribing models may be insufficient to detect the full spectrum of medication-related risks. Clinical pharmacy interventions provide a structured mechanism for examining the complete pharmacotherapy profile of individual patients and identifying clinically significant problems before they result in preventable morbidity, treatment failure, hospitalization, or additional healthcare utilization.

A central finding of the research is that medication reconciliation is one of the most important clinical pharmacy interventions for reducing discrepancies and improving continuity of pharmacotherapy. Medication discrepancies frequently arise when patients move between primary care, emergency departments, inpatient

wards, outpatient clinics, rehabilitation facilities, and community settings. Differences may occur between the medicines documented in the medical record and those actually taken by the patient, while omissions, duplications, inappropriate continuation, incorrect doses, contraindicated medicines, and unintended changes may remain undetected. Clinical pharmacists are particularly well positioned to compare medication histories, prescribing records, dispensing information, patient-reported use, and clinical indications. The research indicates that systematic reconciliation at admission, transfer, and discharge can identify potentially harmful discrepancies and provide an important safety barrier against medication errors.

The findings also emphasize that medication reconciliation should not be interpreted as a purely administrative activity. Its clinical value depends on the pharmacist's ability to determine whether each medicine is necessary, appropriately dosed, therapeutically effective, safe under current physiological conditions, and compatible with the patient's other treatments. A complete reconciliation process therefore incorporates evaluation of indication, therapeutic duplication, dose appropriateness, contraindications, interactions, adherence, monitoring requirements, and treatment duration. In patients with extensive medication lists, this approach can reveal therapeutic redundancies or inappropriate continuation of medicines that were initially prescribed for acute conditions but subsequently remained on the medication list without a continuing indication. Such findings illustrate the importance of active pharmacotherapy review rather than passive medication documentation.

Another important finding concerns the role of clinical pharmacists in identifying and resolving drug-related problems. Drug-related problems encompass a broad spectrum of clinical issues, including untreated indications, unnecessary therapy, inappropriate medicine selection, subtherapeutic dosing, excessive dosing, adverse drug reactions, clinically relevant interactions, non-adherence, inappropriate duration, medication errors, and inadequate monitoring. The research indicates that systematic pharmaceutical care processes enable these problems to be identified through structured review rather than relying exclusively on spontaneous recognition by other members of the healthcare team. This is particularly relevant in complex patients, for whom the probability of medication-related problems increases with the number of medicines, disease burden, treatment duration, and clinical instability.

The findings indicate that clinical pharmacists contribute to therapeutic optimization by evaluating the relationship between pharmacological mechanisms and individual patient characteristics. Rational pharmacotherapy requires more than selecting a medicine that is generally effective for a particular diagnosis. The selected therapy must also be appropriate for the patient's renal and hepatic function, age, body composition, concomitant medicines, allergies, previous treatment responses, genetic characteristics where relevant, and specific clinical objectives. Pharmacists can therefore contribute to individualized treatment selection by integrating pharmacological knowledge with patient-specific clinical data. This process may involve dose adjustment, therapeutic substitution, discontinuation of unnecessary medicines, optimization of administration schedules, modification of treatment duration, or recommendation of alternative agents with more favorable safety profiles.

Renal impairment emerged as an especially important determinant of pharmacotherapy safety. Numerous medicines or active metabolites undergo substantial renal elimination, and impaired renal function may increase systemic exposure and consequently enhance toxicity. The findings indicate that clinical pharmacists can reduce this risk by reviewing estimated renal function, identifying medicines requiring dose adjustment, assessing cumulative nephrotoxic exposure, and recommending appropriate dosing strategies. This function becomes increasingly important in older adults and critically ill patients, in whom renal function may fluctuate rapidly. A static medication list may therefore be inadequate for safe treatment, whereas continuous pharmacist involvement can support dynamic pharmacotherapy adjustment in response to changing clinical parameters.

Hepatic function similarly influences medication safety and therapeutic effectiveness. Medicines extensively metabolized by the liver may accumulate in patients with significant hepatic dysfunction, while altered protein binding and hepatic blood flow can further complicate pharmacokinetic interpretation. Clinical pharmacists can evaluate the hepatic profile of medicines, identify potentially problematic combinations, and support individualized dosing when appropriate. The research suggests that integrating laboratory information into medication review enhances the clinical value of pharmacy services because pharmacotherapy cannot be safely optimized when prescribing decisions are disconnected from relevant physiological and biochemical parameters.

Polypharmacy represents another major area in which clinical pharmacy services demonstrate particular relevance. The research indicates that polypharmacy should not automatically be equated with inappropriate prescribing, because patients with multiple diseases may require several evidence-based therapies. The clinically meaningful distinction is therefore between appropriate polypharmacy and problematic polypharmacy.

Appropriate polypharmacy occurs when medicines are evidence-based, indication-specific, beneficial, and monitored, whereas problematic polypharmacy involves unnecessary, duplicative, ineffective, excessively risky, or poorly monitored treatment. Clinical pharmacists can help make this distinction through comprehensive medication review and prioritization of therapeutic objectives.

The findings suggest that deprescribing is an increasingly important dimension of clinical pharmacy practice. Deprescribing should be regarded as a structured clinical process rather than indiscriminate reduction of medication numbers. It involves identifying medicines for which potential harms outweigh current benefits, considering the patient's prognosis and preferences, developing a discontinuation or dose-reduction strategy, and monitoring for withdrawal effects, disease recurrence, or other consequences. Pharmacists can contribute by identifying candidates for deprescribing and communicating recommendations to prescribers and patients. This approach is especially valuable among older adults and patients with multiple chronic conditions, where treatment burden may become substantial.

Drug-drug interactions represent a further domain in which clinical pharmacy expertise can materially strengthen medication safety. The research indicates that interactions may occur through pharmacokinetic mechanisms, including changes in absorption, distribution, metabolism, transport, and elimination, or through pharmacodynamic mechanisms involving additive, synergistic, or antagonistic effects. Clinically significant interactions may lead to therapeutic failure, toxicity, bleeding, arrhythmia, central nervous system depression, altered antimicrobial activity, or other adverse outcomes. Importantly, the clinical significance of an interaction depends on patient-specific characteristics and exposure levels. Clinical pharmacists can therefore distinguish theoretically possible interactions from those that are clinically meaningful and require intervention.

The research also identifies drug-disease interactions as an important but sometimes underrecognized source of medication-related harm. A medicine may be appropriate in the general population but problematic in a patient with a particular comorbidity. For example, certain medicines may exacerbate renal dysfunction, heart failure, gastrointestinal bleeding, electrolyte disturbances, cognitive impairment, or respiratory compromise. Clinical pharmacists can identify these relationships through integration of the medication profile with the patient's diagnoses, symptoms, laboratory results, and physiological status. This integrated approach contributes to a more comprehensive assessment of pharmacotherapy risk.

Pharmacovigilance represents a fundamental component of the clinical pharmacy contribution identified in the research. Pharmacovigilance extends beyond spontaneous reporting of adverse drug reactions and includes the systematic detection, assessment, understanding, prevention, and management of adverse effects and other medicine-related safety problems. Clinical pharmacists are strategically positioned to participate in pharmacovigilance because they have detailed knowledge of medication exposure and are frequently involved in direct patient assessment. Their clinical role allows them to recognize temporal relationships between drug administration and new symptoms, distinguish expected adverse effects from potentially serious reactions, identify high-risk medicines, document suspected reactions, and communicate safety concerns to clinicians and relevant pharmacovigilance systems.

The findings suggest that underreporting of adverse drug reactions remains an important challenge and that greater integration of pharmacists into pharmacovigilance activities can improve detection. Patients may not recognize symptoms as medication-related, clinicians may attribute adverse events to underlying disease, and mild or transient reactions may not be formally documented. Pharmacists can increase awareness by systematically asking about adverse effects during medication reviews and follow-up encounters. This can improve the quality of medication histories and create opportunities for earlier intervention. In addition, pharmacists can educate patients about symptoms that require immediate medical attention, thereby extending pharmacovigilance beyond the healthcare institution into the community.

The research demonstrates that adverse drug reactions should be evaluated according to severity, preventability, probability, clinical significance, and consequences for ongoing therapy. Not every adverse effect requires discontinuation of the causative medicine, because some reactions may be predictable, mild, dose-dependent, or manageable through monitoring and supportive measures. Conversely, serious or potentially life-threatening reactions require rapid recognition and appropriate intervention. Clinical pharmacists can contribute to this risk stratification by applying pharmacological knowledge and evaluating whether the observed event is consistent with the medicine's known safety profile, whether alternative explanations exist, and whether continued exposure is justified.

Medication safety is closely related to medication-error prevention. The findings indicate that errors can occur at prescribing, transcription, dispensing, preparation, administration, monitoring, and discharge stages. Errors

may involve incorrect medicine selection, wrong dose, wrong route, incorrect frequency, inappropriate duration, duplication, omission, or failure to account for allergies and interactions. Clinical pharmacy services create opportunities to intercept errors before they reach patients. Prescription review, computerized medication screening, direct communication with prescribers, and bedside assessment can all contribute to reducing preventable medication-related harm.

The research further indicates that pharmacists can strengthen medication safety by identifying high-alert medicines that require enhanced safeguards. Medicines associated with a high risk of severe harm when used incorrectly require careful attention to dosing, administration, monitoring, and transitions of care. Clinical pharmacists can support standardized protocols, dose verification, monitoring plans, staff education, and patient counseling for such medicines. Their contribution is particularly relevant when high-alert therapies are combined with other medicines capable of producing additive toxicity or physiological instability.

Antimicrobial pharmacotherapy provides another important field of clinical pharmacy intervention. The findings indicate that inappropriate antimicrobial selection, unnecessary broad-spectrum therapy, excessive treatment duration, inadequate dosing, and failure to adjust treatment according to microbiological information can contribute to treatment failure, toxicity, healthcare costs, and antimicrobial resistance. Clinical pharmacists participating in antimicrobial stewardship can review indications, microbiological results, dosing, and spectrum of activity, route of administration, duration, and opportunities for de-escalation. Pharmacist involvement can therefore support both individual patient outcomes and broader public health objectives.

The research demonstrates that clinical pharmacy services are also relevant to therapeutic drug monitoring. Therapeutic drug monitoring is particularly valuable for medicines with narrow therapeutic indices, substantial interindividual pharmacokinetic variability, or concentration-dependent efficacy and toxicity. Clinical pharmacists can interpret measured concentrations in relation to dose, timing of administration, sampling time, renal and hepatic function, interacting medicines, and therapeutic targets. Importantly, therapeutic drug monitoring should not be reduced to measurement of a drug concentration alone. The clinical interpretation of the result is essential. Pharmacists can integrate pharmacokinetic principles with clinical information to determine whether dosage modification is justified.

Pharmacogenomics represents a further development of individualized pharmacotherapy. The research indicates that genetic variability can influence drug metabolism, transport, receptor activity, and immune-mediated adverse reactions. Although pharmacogenomic implementation varies according to healthcare setting, availability of testing, cost, evidence strength, and clinical guidelines, clinical pharmacists can contribute to the interpretation and clinical application of pharmacogenomic information. The pharmacist's role may include identifying medicines for which genetic information is clinically relevant, reviewing test results, supporting genotype-guided dose selection, and incorporating pharmacogenomic considerations into broader medication management. This approach illustrates the transition from generalized prescribing toward increasingly individualized therapeutic decision-making.

The findings also emphasize the importance of medication adherence as a determinant of therapeutic effectiveness. A pharmacologically appropriate treatment regimen may fail if patients cannot or do not take medicines as intended. Non-adherence may result from complex dosing schedules, adverse effects, financial barriers, limited health literacy, forgetfulness, misconceptions about treatment, or insufficient understanding of the therapeutic objective. Clinical pharmacists can identify barriers through direct patient communication and then implement individualized strategies such as simplification of regimens, counseling, synchronization of medication schedules, education concerning adverse effects, and reinforcement of treatment benefits. Consequently, adherence should be understood as a multidimensional clinical phenomenon rather than simply a matter of patient behavior.

Patient education emerged as a major mechanism through which clinical pharmacy services improve medication safety. Effective counseling can improve understanding of indications, administration, dosing schedules, expected therapeutic effects, potential adverse reactions, interaction risks, storage requirements, and circumstances requiring medical consultation. The findings suggest that counseling is most effective when adapted to the patient's level of health literacy and specific circumstances. Communication should therefore be interactive rather than limited to providing written information. Teach-back approaches, structured counseling, and individualized medication instructions can help verify whether patients understand how to use their medicines correctly.

Transitions of care constitute another high-risk period identified in the research. Patients frequently experience medication changes during hospitalization, and communication failures can result in unintended discontinuation,

duplication, or continuation of therapy after discharge. Clinical pharmacists can contribute to safer transitions by reconciling medicines, clarifying intentional changes, preparing accurate discharge medication lists, counseling patients, and communicating relevant information to primary care providers and community pharmacists. The continuity of pharmacotherapy is particularly important for patients receiving chronic cardiovascular, antidiabetic, anticoagulant, antiepileptic, immunosuppressive, psychiatric, or oncological treatments.

The findings support the proposition that clinical pharmacy services are most effective when embedded within multidisciplinary healthcare teams. Pharmacists should not operate as isolated medication reviewers but as collaborative clinical professionals participating in shared decision-making with physicians, nurses, laboratory specialists, and other healthcare practitioners. Interdisciplinary collaboration enables medication-related recommendations to be integrated with diagnostic information, nursing observations, therapeutic objectives, and patient preferences. Effective communication is therefore a central determinant of pharmacist impact. Recommendations should be clinically relevant, clearly justified, prioritized according to risk, and communicated at an appropriate time.

The research indicates that the quality of pharmacist interventions depends substantially on the degree of clinical integration. Reactive consultation models may identify problems when another healthcare professional requests assistance, but proactive models allow pharmacists to systematically review patients at predefined points. Daily medication review, participation in clinical rounds, targeted review of high-risk patients, and structured monitoring can increase the probability that clinically important problems will be identified before harm occurs. The findings therefore favor proactive clinical pharmacy practice, particularly in high-complexity environments.

Risk stratification emerged as an important methodological principle. Not every patient requires the same intensity of pharmacy intervention. Patients receiving numerous medicines, high-alert drugs, narrow therapeutic-index agents, nephrotoxic or hepatotoxic treatments, anticoagulants, immunosuppressants, antineoplastic medicines, or complex antimicrobial regimens may require more intensive review. Likewise, patients with substantial renal or hepatic impairment, multiple comorbidities, previous medication-related harm, or frequent hospitalizations may benefit from enhanced pharmaceutical monitoring. Risk-based allocation of clinical pharmacy resources can improve efficiency while maintaining a strong focus on patients with the greatest potential for medication-related harm.

The findings also demonstrate the relevance of clinical decision-support systems. Electronic prescribing, computerized interaction screening, medication alerts, clinical databases, and electronic health records can assist pharmacists in identifying potential problems. However, technology cannot replace professional clinical judgment. Excessive or poorly designed alerts may contribute to alert fatigue, causing important warnings to be overlooked. Clinical pharmacists can therefore serve as a critical interpretive layer between automated information and clinical decision-making. Their expertise allows them to determine whether an alert represents a clinically meaningful problem and what intervention is appropriate.

The integration of laboratory data into clinical pharmacy practice was identified as an important determinant of therapeutic monitoring. Pharmacotherapy frequently requires monitoring of renal function, hepatic enzymes, electrolytes, blood counts, coagulation parameters, glucose, lipid profiles, drug concentrations, and other biomarkers. Clinical pharmacists can establish whether monitoring is appropriate for a particular medicine, determine whether results are within acceptable parameters, and recommend intervention when abnormalities indicate potential toxicity or treatment failure. Such monitoring supports the transition from medication dispensing toward longitudinal therapeutic management.

The research further indicates that clinical pharmacists can contribute to reducing preventable hospitalizations associated with medication-related problems. Adverse reactions, inappropriate dosing, non-adherence, interactions, and inadequate monitoring can all contribute to deterioration requiring emergency treatment or admission. Early identification and management of these problems may therefore have downstream effects on healthcare utilization. This relationship is particularly important in older adults and patients with multiple chronic conditions, who may have limited physiological reserve and a higher susceptibility to medication-related complications.

Economic findings discussed in the literature suggest that clinical pharmacy interventions may also generate value through avoidance of preventable adverse events, optimization of medicine selection, reduction of unnecessary therapy, improved adherence, and more efficient use of healthcare resources. However, economic value should not be measured exclusively through direct medication expenditure. A medicine with a higher acquisition cost may be preferable if it reduces serious toxicity or treatment failure. Similarly, discontinuing an

inexpensive medicine may have little economic value if the medicine is clinically necessary. Pharmacoeconomic evaluation should therefore incorporate total treatment costs, adverse-event consequences, hospitalization, monitoring requirements, productivity, and patient outcomes.

The findings support a broader interpretation of prescribing quality in which appropriate prescribing encompasses effectiveness, safety, evidence concordance, patient-centeredness, efficiency, and monitoring. Clinical pharmacists can assess whether medicines have clear indications, whether therapeutic goals are defined, whether doses are appropriate, whether treatment duration is justified, and whether outcomes are being evaluated. This contribution is particularly valuable because prescribing quality can deteriorate gradually as patients accumulate diagnoses and medicines over time. Regular medication review provides an opportunity to reassess treatment according to current clinical circumstances rather than simply continuing historical prescribing decisions.

Patient-centered care emerged as a foundational principle underlying effective clinical pharmacy practice. The research indicates that therapeutic decisions should incorporate patient preferences, values, functional status, treatment goals, and tolerance of risk. A theoretically optimal regimen may be inappropriate if it is excessively burdensome or inconsistent with the patient's priorities. Pharmacists can facilitate shared decision-making by explaining treatment alternatives, expected benefits, potential risks, administration requirements, and monitoring needs in understandable language. This supports autonomy while promoting rational pharmacotherapy.

The findings also demonstrate that clinical pharmacy services can contribute to reducing therapeutic inertia. Long-term medication use may continue despite changes in disease status, emergence of adverse effects, or availability of more appropriate therapeutic alternatives. Pharmacists who routinely reassess medication profiles can identify opportunities for treatment intensification, modification, simplification, or discontinuation. Thus, clinical pharmacy supports not only prevention of excessive treatment but also prevention of undertreatment.

In chronic disease management, pharmacists can contribute to maintaining continuity and monitoring therapeutic response. Cardiovascular disease, diabetes, chronic respiratory disorders, neurological conditions, psychiatric disorders, and other chronic illnesses frequently require long-term multidrug therapy. The cumulative medication burden may create interactions and adherence challenges that are not apparent when each medicine is considered individually. Comprehensive pharmaceutical review allows the treatment regimen to be evaluated as an integrated system.

The findings are particularly relevant to oncology and other therapeutic areas involving high-risk pharmacotherapy. Antineoplastic medicines may have narrow therapeutic margins and complex toxicity profiles involving hematological, gastrointestinal, hepatic, renal, neurological, dermatological, cardiovascular, and immunological systems. Clinical pharmacists can assist with dose verification, interaction assessment, supportive pharmacotherapy, toxicity monitoring, antiemetic optimization, medication reconciliation, and patient education. The complexity of modern oncology, including cytotoxic agents, targeted therapies, immunotherapies, hormone therapies, and oral anticancer medicines, reinforces the need for specialized medication-management expertise.

Similarly, anticoagulant therapy illustrates the importance of pharmacist-led safety monitoring. Both underexposure and overexposure may have serious consequences. Clinical pharmacists can assess indications, dosing, renal function, interacting medicines, adherence, bleeding risk, and relevant laboratory or clinical parameters. Patient counseling concerning missed doses, bleeding symptoms, and interaction risks is also essential. This example demonstrates how therapeutic optimization requires simultaneous consideration of efficacy and safety rather than prioritization of one outcome in isolation.

The research identifies medication toxicity as a dynamic phenomenon influenced by cumulative exposure, patient characteristics, interactions, and changes in organ function. Toxicity may emerge even when a medicine was initially prescribed appropriately. Therefore, safe pharmacotherapy requires continuous reassessment rather than one-time approval at the beginning of treatment. Clinical pharmacists can provide longitudinal surveillance and recognize patterns suggesting emerging toxicity. This is especially important for chronic therapies in which cumulative adverse effects may develop gradually.

The findings further indicate that prevention is generally more effective than retrospective management of medication-related harm. Pharmacist intervention before administration can prevent errors, while monitoring after administration can detect toxicity early. The combination of prospective medication review and ongoing surveillance therefore creates a more comprehensive safety system. This dual approach supports the concept of clinical pharmacy as both a preventive and therapeutic discipline.

An important finding is that documentation of pharmacist interventions is essential for evaluating service effectiveness. Structured documentation can record the medication-related problem, clinical assessment, recommendation, communication with the healthcare team, action taken, and outcome. Such documentation supports continuity of care and enables healthcare organizations to evaluate the contribution of pharmacy services. It also provides data for quality improvement, education, audit, and research. Standardized classification systems for pharmaceutical interventions can facilitate comparison across clinical settings.

The research suggests that outcome evaluation should extend beyond counting pharmacist recommendations. The number of interventions does not necessarily reflect clinical impact. More meaningful indicators include acceptance of recommendations, prevention of serious medication errors, reduction in adverse drug reactions, improvement in medication appropriateness, therapeutic target attainment, adherence, patient-reported outcomes, hospitalization rates, and mortality where appropriate. Process indicators remain useful, but they should be integrated with clinical and patient-centered outcomes.

The findings also highlight the importance of professional education and competency development. Modern clinical pharmacists require strong foundations in pharmacology, pharmacokinetics, pharmacodynamics, therapeutics, pathophysiology, clinical laboratory interpretation, pharmacovigilance, communication, evidence-based medicine, and health informatics. Continuing professional development is necessary because therapeutic options and safety evidence evolve rapidly. Competency-based training can therefore strengthen the capacity of pharmacists to provide advanced clinical services.

The research further indicates that organizational factors influence the effectiveness of clinical pharmacy services. Adequate staffing, clearly defined responsibilities, access to clinical information, integration into healthcare teams, institutional support, and appropriate documentation systems facilitate pharmacist involvement. Conversely, limited staffing, restricted access to patient records, insufficient recognition of pharmacists as clinical practitioners, and poorly defined workflows may reduce the potential impact of pharmacy services. Therefore, improving clinical pharmacy outcomes requires both professional development and system-level support.

The findings support the use of standardized clinical pharmacy protocols while preserving individualized clinical judgment. Protocols can provide consistency in medication reconciliation, antimicrobial stewardship, therapeutic drug monitoring, anticoagulation management, renal-dose adjustment, and adverse reaction assessment. Nevertheless, protocols should function as decision-support frameworks rather than rigid substitutes for clinical reasoning. Individual patients may present circumstances requiring deviation from standard pathways.

The research also identifies communication with community pharmacists as an underused opportunity for continuity of medication management. Community pharmacists frequently have longitudinal contact with patients and can identify adherence difficulties, repeated early or late refills, adverse effects, and discrepancies between prescribed and actual medication use. Integration between hospital, ambulatory, and community pharmacy services could therefore strengthen the continuity of pharmacotherapy across healthcare settings.

Digital health technologies offer additional opportunities for clinical pharmacy practice. Electronic medication records, remote monitoring, telepharmacy, automated adherence systems, and integrated clinical decision-support platforms may enable pharmacists to follow patients beyond traditional face-to-face encounters. These technologies can facilitate identification of abnormal laboratory values, missed monitoring, medication duplication, and potential interactions. Nevertheless, digital transformation should be accompanied by appropriate governance, privacy safeguards, data quality assurance, and professional oversight.

The research demonstrates that clinical pharmacy services contribute to a culture of medication safety by promoting systematic questioning of medication necessity, appropriateness, efficacy, and risk. This cultural effect may extend beyond individual interventions. Pharmacists can participate in medication-safety committees, develop institutional policies, conduct medication-use evaluations, educate healthcare professionals, and analyze patterns of medication errors. In this broader role, the clinical pharmacist becomes an important contributor to organizational quality improvement.

Another important finding concerns the relationship between pharmacovigilance and medication-error surveillance. Although adverse drug reactions and medication errors are conceptually distinct, they may overlap in clinical practice. An adverse event may result from the pharmacological properties of a correctly administered medicine, from an inappropriate dose, from an interaction, or from an administration error. Comprehensive clinical pharmacy surveillance can help distinguish these mechanisms and support appropriate corrective actions. Such differentiation is essential for preventing recurrence.

The findings indicate that patient safety should be considered throughout the entire medication-use process. Safe prescribing cannot compensate for unsafe administration, and accurate dispensing cannot compensate for inadequate monitoring. Clinical pharmacy services therefore have greatest potential when they are integrated across the medication-use continuum. This systems-based perspective shifts attention from isolated errors toward the interactions among prescribing practices, information systems, human factors, organizational processes, patient characteristics, and medication properties.

The research further supports the concept of pharmacotherapy as a dynamic therapeutic system. Medication effectiveness and safety are not fixed characteristics of a prescription but outcomes arising from the interaction between medicine, patient, disease, environment, healthcare professionals, and treatment process. Clinical pharmacists contribute by continuously evaluating these interactions. Their intervention may be required when the patient's condition changes, when laboratory results become abnormal, when a new medicine is initiated, when treatment goals are not achieved, or when an adverse event occurs.

The findings suggest that clinical pharmacy services can also improve prescribing quality through feedback and educational interventions. Pharmacists may identify recurring patterns of inappropriate prescribing, such as unnecessary duplication, excessive duration, inappropriate dose selection, or insufficient monitoring. Aggregated data can then inform targeted educational programs and institutional prescribing policies. Thus, individual patient-level intervention can generate system-level learning.

A further finding is that clinical pharmacy services may improve the appropriateness of medicine use without necessarily increasing overall treatment complexity. In many circumstances, pharmacist interventions simplify regimens by discontinuing unnecessary medicines, consolidating dosing schedules, substituting safer alternatives, or clarifying administration instructions. Simplification may improve adherence while reducing opportunities for error. Therefore, therapeutic optimization should include assessment of regimen complexity as an independent safety and effectiveness factor.

The research also emphasizes the importance of balancing evidence-based recommendations with real-world clinical feasibility. Clinical guidelines provide essential frameworks for treatment decisions, but individual patients may not conform to guideline populations. Comorbidities, contraindications, previous treatment failures, patient preferences, resource availability, and adherence considerations can require modification of standard recommendations. Clinical pharmacists can help translate evidence into individualized treatment plans while maintaining scientific rigor.

The findings indicate that clinical pharmacy interventions are particularly valuable when uncertainty is high. Complex cases frequently involve competing therapeutic objectives, incomplete information, rapidly changing clinical parameters, or multiple plausible treatment options. Pharmacists can support decision-making by evaluating pharmacological evidence, estimating risks, assessing interactions, and identifying monitoring strategies. Their contribution is therefore not limited to routine medication review but extends to clinical reasoning in complex therapeutic situations.

An important conclusion emerging from the research is that medication safety and therapeutic effectiveness should not be treated as competing objectives. Appropriate clinical pharmacy practice seeks to maximize the probability of achieving therapeutic goals while minimizing avoidable harm. A treatment that is highly effective but poorly tolerated may be clinically unsuccessful, whereas a very safe medicine that fails to control the disease is also inadequate. Therapeutic optimization therefore requires simultaneous assessment of benefit-risk balance, patient preferences, and measurable outcomes.

The research supports the development of integrated clinical pharmacy models incorporating pharmacovigilance, medication reconciliation, therapeutic optimization, antimicrobial stewardship, therapeutic drug monitoring, pharmacogenomic interpretation, medication-error prevention, patient education, and longitudinal follow-up. Such integration is more consistent with the complexity of contemporary pharmacotherapy than fragmented services operating independently. An integrated model can create a continuous feedback loop in which prescribing decisions are informed by monitoring results, adverse events are used to improve future prescribing, and patient experiences contribute to treatment modification.

The findings demonstrate that clinical pharmacy services should be considered an essential component of high-quality healthcare rather than an optional supplementary activity. The increasing prevalence of multimorbidity, polypharmacy, aging populations, complex therapeutic technologies, precision medicine, and high-risk medicines increases the need for specialized medication-management expertise. Clinical pharmacists provide a distinctive combination of pharmacological knowledge, therapeutic reasoning, medication-safety expertise, and patient-centered communication that can address these challenges.

The evidence synthesized through this research indicates that the greatest value of clinical pharmacy services lies not in a single intervention but in the cumulative effect of multiple coordinated activities across the medication-use pathway. Medication reconciliation prevents discrepancies; medication review identifies drug-related problems; pharmacovigilance detects adverse reactions; therapeutic monitoring identifies emerging toxicity or inadequate exposure; pharmacogenomic assessment can support individualized therapy; patient counseling improves understanding and adherence; antimicrobial stewardship promotes rational antimicrobial use; and interdisciplinary collaboration facilitates implementation of therapeutic recommendations. Together, these functions create a comprehensive medication-management framework.

The findings also suggest that future development of clinical pharmacy should increasingly emphasize measurable outcomes, digital integration, individualized risk assessment, and longitudinal care. Research should examine not only whether pharmacists intervene but whether those interventions produce durable improvements in clinical outcomes, patient safety, quality of life, treatment adherence, healthcare utilization, and cost-effectiveness. Standardized outcome measures will facilitate comparison between institutions and healthcare systems and strengthen the evidence base for further expansion of pharmacist-led services.

The research establishes that clinical pharmacy services have a multidimensional role in optimizing complex pharmacotherapy. Their contribution encompasses prevention, detection, assessment, intervention, monitoring, education, and continuous improvement. By systematically integrating pharmacological expertise with patient-specific clinical information, clinical pharmacists can identify medication-related risks, improve prescribing quality, reduce preventable toxicity, strengthen pharmacovigilance, enhance medication safety, support therapeutic effectiveness, and promote rational medicine use. The findings therefore support a healthcare model in which pharmacists are fully integrated into multidisciplinary clinical teams and participate actively in therapeutic decision-making throughout the patient's medication journey. Such integration represents an important strategy for responding to the growing complexity of modern pharmacotherapy and for establishing a safer, more effective, evidence-based, and patient-centered medication-use system.

The synthesis of the available scientific literature demonstrates that clinical pharmacy services have evolved into a multidimensional component of contemporary pharmacotherapy, extending substantially beyond traditional medication-dispensing functions. Across different healthcare environments, the clinical pharmacist increasingly participates in medication reconciliation, comprehensive medication review, pharmacovigilance, therapeutic drug monitoring, adverse-drug-reaction assessment, antimicrobial stewardship, medication-error prevention, prescribing optimization, patient counseling, adherence support, deprescribing, and multidisciplinary therapeutic decision-making. The evidence collectively indicates that these activities are particularly valuable when pharmacotherapy is complex, the medication burden is high, or the consequences of inappropriate medication use may be clinically significant.

Clinical Pharmacy as an Integrated Pharmacotherapeutic Service

The principal result emerging from the scientific discourse is that clinical pharmacy should be conceptualized as an **integrated clinical service rather than an isolated pharmaceutical intervention.** Complex pharmacotherapy requires continuous assessment of medication appropriateness, efficacy, safety, and adherence, interactions, monitoring requirements, and changing patient characteristics. A medication regimen that is appropriate at one point in time may become inappropriate following changes in renal function, hepatic function, disease status, laboratory parameters, concomitant medicines, or therapeutic objectives.

Clinical pharmacists provide a structured mechanism for repeatedly evaluating these variables. Their contribution is particularly relevant to patients with multimorbidity and polypharmacy, where the probability of medication-related problems increases as the therapeutic regimen becomes more complicated. The pharmacist's systematic medication review can identify unnecessary medicines, untreated indications, inappropriate doses, therapeutic duplication, clinically significant interactions, contraindications, adverse effects, and monitoring deficiencies.

This supports a broader model of pharmacotherapy in which the quality of medication use is determined not simply by whether an appropriate medicine has been prescribed, but by whether the **entire therapeutic regimen remains clinically justified, safe, effective, feasible, and consistent with patient-specific goals.**

Impact on Complex Pharmacotherapy and Polypharmacy

The analysis indicates that polypharmacy represents one of the principal clinical environments in which pharmacy-led medication optimization becomes particularly important. Polypharmacy may be clinically

appropriate, especially among patients with several chronic conditions; however, increasing medication exposure creates greater opportunities for pharmacokinetic and pharmacodynamic interactions, adverse drug reactions, prescribing cascades, medication discrepancies, administration errors, and nonadherence.
Clinical pharmacists can address these problems through structured medication reviews. The process typically involves establishing an accurate medication history, determining the indication for each medicine, evaluating therapeutic effectiveness, identifying potential safety concerns, reviewing dosing and administration, assessing interactions, and determining whether continued therapy remains justified.
An important implication is that **medication quantity alone is insufficient to define inappropriate pharmacotherapy.** Clinical appropriateness depends on the relationship between medication burden and therapeutic necessity. Clinical pharmacy therefore contributes not simply by reducing the number of medicines but by improving the overall quality of the medication regimen.

Pharmacovigilance and Adverse Drug Reaction Detection
Pharmacovigilance represents one of the most important areas in which clinical pharmacy can influence patient safety. The analysis demonstrates that clinical pharmacists are strategically positioned to identify suspected adverse drug reactions because they routinely assess medication histories, treatment changes, laboratory findings, patient complaints, and therapeutic responses.
Adverse drug reactions can present with nonspecific manifestations and may therefore be incorrectly attributed to underlying disease. Clinical pharmacists can improve recognition by systematically considering temporal relationships between medication exposure and clinical events, known pharmacological mechanisms, dose relationships, alternative explanations, and the patient's concomitant therapy.
The contribution of pharmacists to pharmacovigilance is consequently both **reactive and preventive.** Reactive pharmacovigilance involves recognition, documentation, assessment, and reporting of suspected adverse reactions. Preventive pharmacovigilance involves identifying patients at elevated risk, reviewing potentially hazardous combinations, recommending monitoring strategies, and educating patients regarding warning signs. The integration of clinical pharmacy with pharmacovigilance can therefore transform medication safety from a passive reporting system into a more proactive clinical surveillance process.

Drug Toxicity and Risk Management
Drug toxicity constitutes a major challenge in complex pharmacotherapy, particularly when medicines have narrow therapeutic indices or substantial potential for organ toxicity. The results of the literature synthesis indicate that clinical pharmacists can contribute to toxicity prevention through dose individualization, interaction assessment, therapeutic drug monitoring, laboratory surveillance, and recognition of patient-specific susceptibility.
Renal and hepatic impairment are particularly important because alterations in drug elimination can produce accumulation and excessive systemic exposure. Clinical pharmacists can assess whether medication regimens remain appropriate as organ function changes and recommend dose adjustment, interval modification, therapeutic substitution, or enhanced monitoring where appropriate.
Drug toxicity may also result from cumulative exposure or combinations of medicines with overlapping adverse-effect profiles. Therefore, reviewing medicines individually is insufficient in many complex patients. The pharmacist must evaluate the **aggregate toxicity burden** of the therapeutic regimen.
This represents a significant conceptual contribution of clinical pharmacy: toxicity prevention should be based on integrated assessment of medicines, patients, interactions, exposure, and monitoring rather than isolated evaluation of individual prescriptions.

Medication Safety and Medication-Error Prevention
The synthesis further demonstrates that clinical pharmacists can contribute substantially to medication-error prevention throughout the medication-use pathway. Errors may originate during prescribing, transcription, dispensing, administration, monitoring, or communication between healthcare settings.
Clinical pharmacy interventions can identify inappropriate doses, incorrect frequencies, duplicate therapy, allergies, contraindications, interactions, unclear prescriptions, and discrepancies between intended and documented therapy. Such interventions are particularly important for high-alert medicines, where relatively small errors may result in severe consequences.

The results support a **systems-based interpretation of medication safety.** Medication errors should not be attributed exclusively to individual healthcare professionals or patients. They frequently emerge from deficiencies in communication, information availability, workflow design, electronic systems, workload, or institutional processes.
Clinical pharmacists can therefore participate in institutional medication-safety programs, develop standardized protocols, review medication incidents, contribute to root-cause analysis, and establish safeguards for high-risk medicines.

Medication Reconciliation and Transitions of Care
Medication reconciliation emerged as a particularly important clinical pharmacy intervention. Transitions between healthcare settings create opportunities for unintended medication discrepancies because treatment regimens may be modified, discontinued, temporarily withheld, or replaced.
At hospital admission, patients may provide incomplete medication histories. During hospitalization, medicines may be changed in response to acute clinical conditions. At discharge, these changes must be accurately communicated to patients and subsequent healthcare professionals.
Clinical pharmacists can compare medication histories with current prescriptions and identify discrepancies that require clarification. They can also educate patients about medication changes and provide information concerning dosage, duration, administration, and monitoring.
The broader implication is that medication safety must be considered **longitudinally**. A pharmacotherapy regimen cannot be regarded as safe solely because it was correct at the moment of prescribing. Continuity of information and reassessment across transitions are essential components of safe medication use.

Therapeutic Optimization and Treatment Effectiveness
The evidence indicates that clinical pharmacy services contribute not only to safety but also to therapeutic effectiveness. Pharmacists can assess whether treatment is achieving its intended clinical objective and identify reasons for therapeutic failure.
Therapeutic failure may arise from inappropriate drug selection, insufficient dosage, drug interactions, nonadherence, inadequate treatment duration, altered pharmacokinetics, disease progression, or incorrect administration. Clinical pharmacy assessment allows these factors to be evaluated systematically.
Therapeutic optimization therefore requires balancing several dimensions simultaneously:

- Therapeutic Efficacy;
- Safety And Tolerability;
- Appropriate Dosage;
- Adherence;
- Drug Interactions;
- Patient-Specific Characteristics;
- Monitoring Requirements;
- Treatment Goals; And
- Patient Preferences.

This multidimensional approach distinguishes clinical pharmacy from a narrow focus on medication supply.

Therapeutic Drug Monitoring
Therapeutic drug monitoring represents a specialized area in which clinical pharmacists can translate pharmacokinetic information into individualized treatment decisions. Concentration measurements can be particularly valuable for medicines in which exposure is strongly associated with therapeutic response or toxicity.
However, the results indicate that therapeutic drug monitoring is effective only when interpreted within an appropriate clinical context. A concentration value cannot be evaluated independently of dosage history, sampling time, pharmacokinetic characteristics, organ function, concomitant medicines, disease state, and therapeutic objectives.
Clinical pharmacists can therefore contribute to the complete monitoring process: determining when monitoring is appropriate, ensuring correct sampling, interpreting results, assessing potential causes of abnormal concentrations, and recommending dosage modifications.

This reinforces the principle that therapeutic drug monitoring is fundamentally a **clinical decision-support process rather than merely a laboratory procedure.**

Prescribing Quality and Rational Pharmacotherapy

Another major finding concerns the contribution of clinical pharmacists to prescribing quality. Rational prescribing requires more than selecting a pharmacologically active medicine. It requires establishing an appropriate indication, selecting an evidence-supported treatment, determining an individualized dose, defining an appropriate duration, considering contraindications and interactions, and establishing a monitoring plan.

Clinical pharmacists provide an additional layer of pharmacotherapeutic review within multidisciplinary teams. Their recommendations can identify inappropriate medication selection, excessive dosing, inadequate treatment, therapeutic duplication, unnecessary continuation, and potentially inappropriate combinations.

Importantly, pharmacist involvement should not be understood as competition with physicians. Optimal prescribing is fundamentally interdisciplinary. Physicians contribute diagnostic and therapeutic expertise, while pharmacists provide specialized expertise concerning medication selection, pharmacology, interactions, dosing, monitoring, and medication-related risk.

Deprescribing and Reduction of Medication Burden

The results also support the importance of deprescribing as a component of therapeutic optimization. Long-term medication exposure can become inappropriate when the original indication changes, when the expected benefit diminishes, or when treatment burden and adverse-event risk increase.

Clinical pharmacists can systematically evaluate whether each medicine remains necessary and whether its benefits continue to outweigh potential harms. Where discontinuation is appropriate, pharmacists can support structured tapering or withdrawal strategies and monitor for recurrence of symptoms or withdrawal effects.

The objective of deprescribing is therefore not indiscriminate reduction in medication use but **optimization of medication burden according to current clinical goals.**

Antimicrobial Stewardship

Clinical pharmacy services demonstrate particular relevance to antimicrobial stewardship. Antimicrobial prescribing must simultaneously address immediate therapeutic efficacy, patient safety, microbiological evidence, resistance selection, treatment duration, and resource utilization.

Clinical pharmacists can review antimicrobial indications, microbiological results, dosage, renal function, drug interactions, duration, and opportunities for de-escalation or intravenous-to-oral conversion.

This creates a direct connection between clinical pharmacy and global medication-related risk management. Appropriate antimicrobial use can improve individual treatment outcomes while reducing unnecessary exposure and contributing to antimicrobial-resistance control.

Patient-Centered Pharmacotherapy and Adherence

The analysis indicates that medication optimization cannot be achieved solely through pharmacological assessment. Patient behavior, understanding, preferences, and practical circumstances significantly influence therapeutic outcomes.

Clinical pharmacists can identify barriers to adherence, including complex dosing schedules, adverse effects, inadequate understanding, forgetfulness, and difficulty integrating medication administration into daily routines. Regimen simplification and individualized counseling may improve the feasibility of therapy. Patient-centered pharmacy practice therefore requires movement from the question **“Which medicine should be prescribed?”** toward the broader question **“Which therapeutic strategy can this patient safely and effectively implement?”**

Pharmacogenomics and Precision Pharmacotherapy

The integration of pharmacogenomic information represents an emerging dimension of clinical pharmacy. Genetic variability can influence drug metabolism, transport, receptor activity, immune responses, and susceptibility to adverse drug reactions.

The results suggest that clinical pharmacists may have an important role in translating pharmacogenomic information into medication decisions. However, pharmacogenomics should not replace conventional clinical

assessment. Drug response is determined by the interaction of genetic, physiological, pathological, environmental, and behavioral factors.
Precision pharmacotherapy should therefore be regarded as an integrated model in which pharmacogenomic data are combined with pharmacokinetic, pharmacodynamic, clinical, and patient-reported information.

Digital Clinical Pharmacy and Pharmacovigilance
Electronic health records, computerized prescribing, clinical decision-support systems, electronic medication administration records, and digital pharmacovigilance platforms provide increasingly powerful mechanisms for identifying medication-related risks.
However, automated systems can generate excessive alerts. Excessive non-specific alerts may produce alert fatigue and reduce attention to clinically meaningful warnings. Clinical pharmacists can provide an essential interpretive function by evaluating the clinical significance of computerized alerts and prioritizing those requiring intervention.
Artificial intelligence and predictive analytics may further strengthen pharmacovigilance by identifying patterns associated with adverse events, treatment failure, or high-risk prescribing. Nevertheless, these technologies should remain complementary to professional clinical judgment.

Interprofessional Collaboration
A consistent finding across the scientific discourse is that clinical pharmacy produces its greatest value when integrated into multidisciplinary healthcare teams. Complex medication-related problems frequently involve diagnostic, pharmacological, physiological, behavioral, and organizational dimensions.
Participation in clinical rounds, medication-safety committees, therapeutic guideline development, antimicrobial stewardship programs, and quality-improvement initiatives enables pharmacists to contribute their specialized medication expertise directly to clinical decision-making.
Effective collaboration also improves communication regarding medication-related recommendations. The pharmacist's role is consequently not merely to identify problems but to participate in the **collective resolution of pharmacotherapeutic problems.**

Clinical Outcomes and Healthcare-System Implications
The synthesized evidence indicates that the potential benefits of clinical pharmacy extend across multiple outcome domains. These include reduction of medication discrepancies, improved medication appropriateness, prevention of adverse drug events, optimization of dosing, improved adherence, enhanced therapeutic monitoring, and more rational prescribing.
At the healthcare-system level, prevention of medication-related harm may reduce avoidable emergency visits, hospitalization, prolonged hospital stays, and additional treatment requirements. Consequently, clinical pharmacy may generate both clinical and economic value.
However, evaluation of clinical pharmacy services should not rely exclusively on the number of pharmacist interventions. A high intervention rate does not necessarily indicate superior clinical performance. Meaningful evaluation should consider whether interventions produce measurable improvements in patient safety, therapeutic effectiveness, quality of life, medication appropriateness, and healthcare-resource utilization.

Integrated Risk-Reduction Framework
The combined findings support an integrated model in which **pharmacovigilance, medication safety, toxicity prevention, therapeutic optimization, prescribing quality, and effectiveness are interconnected rather than independent domains.**
For example, a clinically significant drug interaction can simultaneously represent a pharmacovigilance concern, a medication-safety problem, a potential cause of toxicity, a prescribing-quality issue, and a threat to therapeutic effectiveness. Similarly, inadequate adherence can produce apparent therapeutic failure and lead to unnecessary dose escalation, potentially exposing the patient to toxicity once adherence improves.
Clinical pharmacists are uniquely positioned to identify these interactions because their assessment encompasses the complete medication regimen rather than a single prescription.
A practical integrated model can therefore be represented as: **Medication assessment → risk identification → pharmacotherapeutic intervention → monitoring → outcome evaluation → reassessment → continuous optimization.**

This cyclical process is particularly appropriate for chronic and complex pharmacotherapy because patient characteristics and therapeutic requirements change continuously.

Results and Broader Scientific Significance

The results indicate that the future of clinical pharmacy is increasingly characterized by **proactive, predictive, individualized, and outcome-oriented medication management.** The traditional distinction between dispensing pharmacy and clinical pharmacy is becoming less relevant as healthcare systems increasingly recognize medication use as a complex clinical process.

The clinical pharmacist's contribution is particularly important in environments characterized by polypharmacy, multimorbidity, high-risk medicines, frequent transitions of care, complex pharmacokinetics, and substantial adverse-event potential. In these settings, medication optimization requires a level of pharmacotherapeutic analysis that may not be achievable through routine prescribing review alone.

The findings additionally support the development of standardized clinical pharmacy protocols and measurable quality indicators. Institutions should establish clearly defined responsibilities for medication reconciliation, pharmacovigilance, high-risk medication monitoring, therapeutic drug monitoring, antimicrobial stewardship, deprescribing, and medication-safety reporting.

At the same time, implementation must account for differences among healthcare systems. Clinical pharmacy models cannot necessarily be transferred directly from one setting to another without adaptation. Workforce capacity, education, regulation, digital infrastructure, reimbursement, prescribing authority, and interdisciplinary culture all influence service effectiveness.

Evidence from randomized controlled trials and systematic reviews demonstrated inconsistent effects on reducing the total number of prescribed medications. The majority of studies showed no statistically significant reduction, although some indicated a stabilizing effect. In contrast, pharmacist-led interventions consistently improved prescribing appropriateness, with significant reductions in PIM use reported in most studies. The magnitude of PIM reduction varied widely (3.5%–87%), reflecting methodological heterogeneity and variability in assessment tools such as STOPP/START and Beers criteria.

The quantitative synthesis of randomized controlled trials indicates that pharmacist-led interventions do not consistently reduce the absolute number of medications. The predominance of neutral outcomes suggests that deprescribing is complex and context-dependent, while occasional reductions highlight effectiveness under optimized clinical conditions. Notably, slight increases observed in some studies may reflect improved prescribing appropriateness rather than treatment burden escalation. See Table-1.

Table 1. Quantitative Effects of Pharmacist Interventions on Total Medication Count (Polypharmacy Reduction)

Category	Number of RCTs	Reported Outcome	Nature of Effect	Interpretation for Polypharmacy Management
No significant effect	5	No statistically significant change vs control	Neutral	Limited effectiveness in reducing absolute medication count
Significant reduction	1	Marked decrease in number of medications	Positive	Effective under specific optimized intervention conditions
Slight increase vs control	2	Small increase in medication count compared to control	Protective/Stabilizing	Indicates slowing of natural progression of polypharmacy

In contrast to numerical medication counts, strong and consistent evidence demonstrates that pharmacist interventions significantly reduce potentially inappropriate medications (PIMs). The high success rate across diverse settings underscores the clinical value of pharmacist integration in medication review processes, although variability in reduction magnitude suggests methodological heterogeneity. See Table-2.

Table 2. Effectiveness of Pharmacist Interventions in Reducing Potentially Inappropriate Medications (PIMs)

Outcome Measure	Findings
Studies showing PIM reduction	12 out of 14 studies
Systematic reviews confirming reduction	6 reviews
Success rate with pharmacist involvement	72.7%
Success rate without pharmacist	62.5%
Medicare MTM studies showing reduction	5 out of 7 studies
Range of PIM reduction magnitude	3.5% – 87%
Most targeted drug classes	Benzodiazepines, Antipsychotics

The effectiveness of pharmacist-led interventions is strongly influenced by the selection of validated screening tools. Instruments such as STOPP/START demonstrate superior sensitivity compared to traditional criteria, enabling more precise identification of inappropriate prescribing and therapeutic omissions, thereby enhancing intervention outcomes. See Table-3.

Table 3. Comparative Utility of Explicit Screening Tools for PIM Identification

Tool	Focus Area	Sensitivity / Utility	Key Features	Typical Settings
STOPP	Identification of PIMs (what to stop)	Higher sensitivity than Beers Criteria; detects drugs linked to 85% increased ADE risk	Strong predictor of adverse drug events	Community, hospital, long-term care
START	Identification of omissions (what to start)	Complementary to STOPP	Identifies necessary but omitted therapies	Community, hospital, long-term care
Beers Criteria	PIM identification (what to avoid)	Widely used but less sensitive than STOPP	Standard reference, especially in USA	Outpatient, long-term care
MAI (Medication Appropriateness Index)	Overall prescribing quality	Improves prescribing appropriateness (~35% studies)	Detailed implicit assessment tool	Hospitals, clinical settings

Clinical outcome analysis demonstrates that pharmacist interventions contribute significantly to improving patient safety by reducing adverse drug reactions and medication burden. Improvements in patient-reported outcomes further support the clinical relevance of these interventions, although psychological outcomes remain largely unaffected. See Table-4.

Table 4. Clinical and Safety Outcomes of Pharmacist-Led Interventions

Outcome Category	Observed Effect
Adverse Drug Reactions (ADRs)	Reduced
Medication burden	Reduced
Risk of falls	Reduced
Patient satisfaction	Improved (in multiple RCTs)
Pain management outcomes	Improved (e.g., knee pain response)
Depression/anxiety outcomes	No significant change

Despite improvements in prescribing quality and safety, current evidence does not demonstrate consistent benefits at the healthcare system level. The absence of significant reductions in hospitalization or mortality highlights a translational gap between clinical optimization and large-scale system outcomes. See Table-5.

Table 5. Impact on Healthcare System Metrics and Resource Utilization

System-Level Outcome	Findings
Hospitalization rates	No consistent reduction
Mortality	No significant impact
Length of hospital stay (LOS)	No consistent change
Economic outcomes	Mixed/heterogeneous results
Cost savings	Observed in some older studies, but inconclusive

The implementation of pharmacist recommendations is constrained by multiple systemic and clinical barriers. These include limited interprofessional collaboration, knowledge gaps among prescribers, and infrastructural limitations, all of which hinder the full realization of intervention benefits. See

Table-6.

Table 6. Key Barriers to Implementation of Pharmacist Recommendations

Barrier Category	Specific Challenge
Systemic/organizational	Low acceptance of pharmacist recommendations
Clinician-related	Lack of knowledge and confidence in deprescribing
Clinical complexity	Multimorbidity and drug interaction concerns
Time constraints	Limited consultation time
Information access	Incomplete medical records and poor data sharing
Technological limitations	Lack of integrated decision-support systems

Addressing implementation barriers requires integrated, evidence-based strategies. Policy reforms, technological advancements, and multidisciplinary collaboration are essential to enhance the uptake and sustainability of pharmacist-led interventions in clinical practice. See Table-7.

Table 7. Evidence-Based Strategies to Improve Implementation

Strategy Category	Intervention Approach
Policy reform	Expansion of pharmacist roles; collaborative practice agreements
Educational strategies	Multifaceted training focused on prescribing behavior change
Technological solutions	Implementation of CDSS (Clinical Decision Support Systems)
Organizational strategies	Integration of pharmacists into multidisciplinary teams
Care transition focus	Targeting high-risk periods (e.g., hospital discharge)
Standardization	Use of validated tools (STOPP/START, MAI)

Discussion

Overview of Included Evidence

The synthesis of the included studies reveals a complex and heterogeneous evidence base regarding the effectiveness of pharmacist-led interventions in the management of polypharmacy. The reviewed literature encompasses randomized controlled trials, quasi-experimental studies, and systematic reviews conducted across diverse healthcare settings, including primary care, hospital environments, long-term care facilities, and community pharmacy practice. Collectively, these studies evaluate a spectrum of pharmacist-led interventions, ranging from structured comprehensive medication reviews (CMRs) and deprescribing protocols to integrated multidisciplinary care models and clinical decision-support strategies.

In accordance with PRISMA 2020 principles, the analysis demonstrates that while methodological diversity limits direct quantitative comparability, consistent thematic patterns emerge across outcomes related to prescribing quality, medication appropriateness, and patient safety. Notably, the evidence indicates that pharmacist-led interventions exert a more pronounced effect on the qualitative aspects of pharmacotherapy—

particularly the reduction of potentially inappropriate medications (PIMs)—than on the quantitative reduction of total medication burden.

Impact on Total Medication Burden

One of the most frequently assessed outcomes across the included studies is the effect of pharmacist-led interventions on the total number of prescribed medications. However, the findings in this domain are notably inconsistent and, in many cases, counterintuitive. A substantial proportion of randomized controlled trials report no statistically significant reduction in medication count following pharmacist intervention. In some studies, the number of medications remained stable, while in others, a slight increase was observed.

This apparent paradox can be explained by the distinction between *medication quantity* and *medication appropriateness*. Pharmacist-led interventions are not inherently designed to reduce the number of medications per se but rather to ensure that each prescribed medication is clinically justified, evidence-based, and aligned with patient-specific therapeutic goals. In certain cases, this may necessitate the initiation of additional medications to address previously untreated conditions or to optimize disease management, thereby increasing the total medication count while simultaneously improving clinical appropriateness.

Furthermore, reliance on medication count as a primary outcome measure may oversimplify the complexity of polypharmacy. Numerical thresholds, such as the commonly used definition of five or more medications, fail to account for the heterogeneity of patient conditions, treatment indications, and risk–benefit profiles. Consequently, the lack of consistent reduction in medication count should not be interpreted as a failure of pharmacist-led interventions but rather as evidence supporting a paradigm shift toward *appropriate polypharmacy.*

Reduction of Potentially Inappropriate Medications (PIMs)

In contrast to the variability observed in medication count outcomes, the evidence consistently demonstrates that pharmacist-led interventions are highly effective in reducing the prevalence of PIMs. Across the included studies, significant reductions in PIM use were reported, with the magnitude of effect ranging from modest decreases (approximately 3.5%) to substantial reductions exceeding 80%.

This wide range reflects differences in study populations, baseline prescribing practices, intervention intensity, and the criteria used to define PIMs. Commonly employed assessment tools include STOPP/START criteria and Beers criteria, both of which provide structured frameworks for identifying medications associated with increased risk in specific populations, particularly older adults.

The effectiveness of pharmacist-led interventions in reducing PIMs can be attributed to several factors. First, pharmacists possess specialized expertise in pharmacotherapy, enabling them to identify subtle drug-related problems that may not be immediately apparent to other healthcare providers. Second, structured medication review processes facilitate systematic evaluation of each medication in relation to patient-specific factors, including comorbidities, renal function, and potential drug–drug interactions. Third, pharmacists often serve as intermediaries in multidisciplinary teams, enhancing communication and promoting evidence-based decision-making.

Importantly, reductions in PIMs are closely associated with improved patient safety outcomes. Numerous studies have linked inappropriate prescribing to adverse drug events, hospital admissions, and increased mortality risk. Therefore, the consistent reduction of PIMs observed in pharmacist-led interventions represents a clinically meaningful outcome, even in the absence of changes in medication count.

Improvement in Prescribing Appropriateness

Beyond the reduction of PIMs, pharmacist-led interventions have been shown to significantly improve overall prescribing appropriateness. This outcome is typically assessed using validated scoring systems or composite indices that evaluate the extent to which prescribed medications align with clinical guidelines and patient-specific needs.

The reviewed studies consistently report improvements in prescribing quality following pharmacist involvement, with higher rates of appropriate medication use and reduced incidence of prescribing errors. These improvements are particularly evident in settings where pharmacists are actively integrated into clinical teams, such as hospital wards and multidisciplinary primary care practices.

The mechanisms underlying these improvements are multifaceted. Pharmacists contribute to medication optimization through activities such as dose adjustment, therapeutic substitution, identification of drug

interactions, and discontinuation of unnecessary or harmful medications. Additionally, pharmacist-led interventions often include patient education and counseling, which can enhance medication adherence and empower patients to participate in shared decision-making.

The observed improvements in prescribing appropriateness underscore the importance of shifting the focus of polypharmacy management from reduction to optimization. This approach recognizes that the goal of pharmacotherapy is not merely to minimize medication use but to maximize therapeutic benefit while minimizing harm.

Effectiveness of Deprescribing Interventions

Deprescribing represents a central component of many pharmacist-led interventions and has gained increasing attention as a strategy for addressing problematic polypharmacy. The reviewed studies indicate that structured deprescribing protocols can be effective in reducing medication burden and eliminating inappropriate therapies, particularly in elderly populations.

However, the success of deprescribing interventions is influenced by several factors, including patient characteristics, clinical context, and the level of interprofessional collaboration. For example, deprescribing is more likely to be successful in stable patients with well-controlled conditions, whereas it may be more challenging in individuals with complex or unstable clinical profiles.

Patient acceptance also plays a critical role. Resistance to medication discontinuation may arise from concerns about disease progression, withdrawal effects, or loss of therapeutic benefit. Therefore, effective communication and shared decision-making are essential components of successful deprescribing initiatives.

Moreover, the process of deprescribing is not without risks. Abrupt discontinuation of certain medications can lead to adverse outcomes, including symptom recurrence or withdrawal syndromes. As such, deprescribing must be conducted in a controlled and monitored manner, with careful consideration of the potential risks and benefits.

Role of Multidisciplinary Collaboration

A recurring theme across the reviewed studies is the importance of multidisciplinary collaboration in enhancing the effectiveness of pharmacist-led interventions. Interprofessional care models that integrate pharmacists, physicians, nurses, and other healthcare professionals are consistently associated with improved outcomes in polypharmacy management.

Pharmacists contribute specialized knowledge in pharmacotherapy, while physicians provide clinical oversight and decision-making authority. Nurses play a critical role in patient monitoring and education, ensuring continuity of care and adherence to treatment plans. The integration of these roles facilitates a holistic approach to patient care, addressing both clinical and behavioral aspects of medication management.

The effectiveness of multidisciplinary collaboration is further enhanced by the use of shared electronic health records and clinical decision-support systems, which enable real-time access to patient information and support evidence-based prescribing decisions. These technological tools can help identify potential drug interactions, flag inappropriate medications, and provide guidance on dosing and monitoring.

Variability in Intervention Design and Outcomes

One of the major challenges identified in this review is the substantial heterogeneity in intervention design, study populations, and outcome measures. Pharmacist-led interventions vary widely in terms of scope, intensity, duration, and setting, making it difficult to establish standardized benchmarks for effectiveness.

Similarly, outcomes are assessed using a diverse range of metrics, including medication count, PIM prevalence, clinical endpoints, and patient-reported outcomes. This variability complicates the synthesis of findings and limits the ability to perform quantitative meta-analysis.

The lack of standardized outcome measures also raises questions about the clinical significance of observed improvements. For example, while reductions in PIMs are generally considered beneficial, the extent to which these reductions translate into improved clinical outcomes—such as reduced hospitalizations or mortality—remains unclear in many studies.

To address these challenges, future research should prioritize the development of standardized methodologies and reporting frameworks. Adherence to established guidelines such as PRISMA 2020 is essential for improving the quality and comparability of evidence in this field.

Clinical and Public Health Implications

The findings of this review have significant implications for clinical practice and health policy. The consistent evidence supporting the effectiveness of pharmacist-led interventions in improving prescribing appropriateness and reducing PIMs highlights the critical role of pharmacists in modern healthcare systems.

From a clinical perspective, the integration of pharmacists into patient care teams can enhance medication safety, improve therapeutic outcomes, and reduce the burden of medication-related harm. This is particularly important in the context of aging populations and increasing prevalence of chronic diseases.

From a public health perspective, optimizing polypharmacy has the potential to reduce healthcare utilization and associated costs. Adverse drug events and medication-related hospitalizations represent a significant burden on healthcare systems, and interventions that improve medication safety can contribute to more efficient resource utilization.

Furthermore, the findings support the implementation of policy initiatives aimed at promoting interprofessional collaboration and expanding the role of pharmacists in patient care. This may include the development of reimbursement models for pharmacist-led services, integration of pharmacists into primary care settings, and investment in training and education programs.

Limitations of the Evidence Base

Despite the strengths of the reviewed studies, several limitations must be acknowledged. First, the heterogeneity of study designs and outcome measures limits the ability to draw definitive conclusions and precludes formal meta-analysis. Second, many studies are characterized by small sample sizes, short follow-up periods, and potential selection bias.

Third, the lack of standardized definitions for polypharmacy and PIMs introduces variability in outcome assessment. Fourth, the majority of studies focus on surrogate outcomes, such as prescribing appropriateness, rather than hard clinical endpoints. Finally, publication bias may influence the available evidence, with studies reporting positive outcomes more likely to be published.

Synthesis and Interpretation

Taken together, the findings of this systematic review support the conclusion that pharmacist-led interventions are effective in improving the quality of pharmacotherapy in patients with polypharmacy. While their impact on reducing medication count is inconsistent, their ability to enhance prescribing appropriateness and reduce PIMs is well established.

This underscores a fundamental shift in the conceptualization of polypharmacy management—from a focus on reduction to a focus on optimization. Pharmacists play a central role in this paradigm, contributing to safer, more effective, and patient-centered medication use.

Future research should aim to address existing gaps in the evidence base, including the need for standardized outcome measures, long-term follow-up data, and evaluation of clinical endpoints. Such efforts will be essential for advancing the field and informing evidence-based practice and policy.

Subgroup Analyses and Context-Specific Effects

A more granular examination of the included studies reveals that the effectiveness of pharmacist-led interventions varies significantly across patient subgroups and healthcare settings. In geriatric populations, particularly those aged ≥65 years with multimorbidity, interventions tend to yield the most pronounced improvements in prescribing appropriateness and reduction of potentially inappropriate medications (PIMs). This observation is clinically plausible, as older patients are more likely to experience pharmacokinetic alterations, increased drug sensitivity, and a higher baseline prevalence of inappropriate prescribing.

In contrast, studies involving younger adult populations demonstrate comparatively modest effects, likely reflecting lower baseline levels of polypharmacy and reduced complexity of pharmacotherapeutic regimens. Nevertheless, even in these populations, pharmacist-led interventions contribute to improved medication reconciliation, identification of drug–drug interactions, and optimization of dosing strategies.

Setting-specific differences are also evident. Hospital-based interventions, particularly those implemented during admission and discharge transitions, are associated with substantial improvements in medication safety. Pharmacists involved in inpatient care are well-positioned to perform medication reconciliation, identify discrepancies, and prevent prescribing errors during critical transition points. Similarly, interventions in long-

term care facilities demonstrate significant reductions in PIMs, likely due to the high prevalence of polypharmacy and the structured nature of care delivery in these settings.
Community pharmacy interventions, while valuable, exhibit more variable outcomes. The effectiveness of these interventions often depends on the level of integration with primary care providers, access to patient medical records, and the extent of collaboration with physicians. In settings where pharmacists operate in isolation, the implementation of recommendations may be limited, reducing overall impact.

Role of Clinical Decision Support Systems and Digital Integration

An emerging dimension in polypharmacy management is the integration of clinical decision support systems (CDSS) and digital health technologies. Several studies included in this review highlight the synergistic effect of combining pharmacist expertise with electronic prescribing tools and algorithm-based screening systems.
CDSS platforms can automatically flag potentially inappropriate medications, suggest dose adjustments, and identify drug–drug or drug–disease interactions in real time. When used in conjunction with pharmacist-led reviews, these systems enhance the accuracy and efficiency of medication optimization processes. Pharmacists can interpret system-generated alerts within the broader clinical context, thereby reducing the risk of alert fatigue and improving the clinical relevance of interventions.
Moreover, electronic health records (EHRs) facilitate comprehensive access to patient data, enabling pharmacists to make more informed recommendations. The integration of laboratory results, diagnostic information, and medication histories supports a holistic approach to pharmacotherapy management. However, the effectiveness of digital tools is contingent upon proper implementation, user training, and interoperability across healthcare systems.
Despite their potential, the adoption of CDSS remains inconsistent across regions and healthcare institutions. Barriers include financial constraints, technical limitations, and resistance to workflow changes. Future research should explore the cost-effectiveness and scalability of these technologies in enhancing pharmacist-led interventions.

Patient-Centered Outcomes and Quality of Life

While many studies focus on prescribing metrics, an equally important dimension is the impact of pharmacist-led interventions on patient-centered outcomes, including quality of life, treatment satisfaction, and functional status. Evidence in this domain is comparatively limited but suggests that medication optimization may lead to meaningful improvements in patient well-being.
Reduction of inappropriate medications is often associated with decreased incidence of adverse drug reactions, improved cognitive and physical function, and enhanced overall quality of life. For example, deprescribing sedative or anticholinergic medications has been linked to improvements in cognitive performance and reduced fall risk in elderly patients.
Additionally, pharmacist-led counseling and education contribute to improved medication adherence, which is a critical determinant of therapeutic success. By addressing patient concerns, clarifying treatment goals, and simplifying medication regimens, pharmacists can empower patients to actively participate in their care.
However, the measurement of patient-reported outcomes remains inconsistent across studies. Standardized instruments and validated scales are needed to better capture the subjective benefits of pharmacist interventions. Incorporating these measures into future research will provide a more comprehensive understanding of intervention effectiveness.

Summary

- Overall, the results and discussion demonstrate that clinical pharmacy services represent a critical component of modern medication management. Their contribution is multidimensional, encompassing **prevention of medication-related harm, detection of adverse reactions, toxicity surveillance, medication reconciliation, therapeutic optimization, prescribing-quality improvement, adherence support, antimicrobial stewardship, deprescribing, individualized dosing, and continuous outcome monitoring.**
- The strongest conceptual finding is that these functions should not operate as isolated services. Their effectiveness is maximized when integrated into a continuous clinical pathway in which every medication is evaluated according to its indication, expected benefit, potential harm, interaction profile, patient-specific characteristics, monitoring requirements, and therapeutic objectives.

- Thus, clinical pharmacy can be understood as an essential **risk-management and therapeutic-optimization discipline within contemporary healthcare.** Its integration into multidisciplinary care provides an opportunity to transform medication use from a predominantly prescription-centered process into a continuously monitored, evidence-based, individualized, and patient-centered system.
- The scientific discourse ultimately supports a model in which the clinical pharmacist serves as a specialized medication-therapy professional who contributes throughout the pharmacotherapeutic continuum—from initial medication selection and prescribing assessment through administration, monitoring, pharmacovigilance, toxicity prevention, adherence support, therapeutic adjustment, deprescribing, and final evaluation of outcomes. Such integration has substantial potential to improve medication safety, strengthen prescribing quality, reduce preventable medication-related risks, and maximize the clinical effectiveness of complex pharmacotherapy.
- Polypharmacy presents a growing clinical challenge that directly affects patient safety, therapeutic efficacy, and healthcare costs. The available evidence demonstrates that pharmacist-led interventions—particularly comprehensive medication reviews and structured deprescribing initiatives—consistently reduce the use of potentially inappropriate medications (PIMs) across various care settings. When integrated into multidisciplinary teams and supported by validated explicit criteria (such as STOPP/START or Beers), pharmacists contribute meaningfully to improving prescribing quality.
- However, the ability of these interventions to reduce the absolute number of medications remains inconsistent in high-quality randomised controlled trials. Moreover, while PIM reduction is reliably achieved, this does not yet translate into measurable improvements in distal outcomes such as hospitalisation rates or mortality. A critical gap lies in the low acceptance of pharmacist recommendations by prescribers, often due to systemic barriers including limited access to clinical records, time constraints, and insufficient collaborative infrastructure.
- Therefore, realizing the full potential of pharmaceutical care in polypharmacy management requires a paradigm shift. Policymakers and healthcare leaders must move beyond isolated interventions toward institutionalizing interprofessional collaboration, embedding clinical pharmacists into care teams, and mandating the use of standardized, evidence-based tools. Only through such systemic integration can the demonstrable improvements in medication appropriateness be sustained and ultimately translated into better clinical outcomes, reduced healthcare burden, and enhanced quality of life for patients with complex medication regimens.
- Pharmacist-led interventions play a critical role in improving medication appropriateness rather than reducing medication quantity. Integration of pharmacists into multidisciplinary care models enhances patient safety and prescribing quality. Future research should prioritise standardisation of outcome measures and robust clinical endpoints.

Economic Implications and Cost-Effectiveness

The economic impact of pharmacist-led interventions in polypharmacy management represents a critical consideration for healthcare systems. Although not uniformly assessed across all studies, available evidence suggests that these interventions have the potential to generate cost savings by reducing medication-related complications and healthcare utilization.

Adverse drug events (ADEs) are a major driver of hospital admissions and healthcare expenditures. By reducing the prevalence of PIMs and improving medication safety, pharmacist-led interventions can decrease the incidence of ADEs and associated costs. Additionally, optimized pharmacotherapy may lead to better disease control, thereby reducing the need for emergency care and hospital readmissions.

Cost-effectiveness analyses included in some studies indicate that the initial investment in pharmacist services is offset by downstream savings. However, the magnitude of these savings varies depending on the healthcare setting, intervention intensity, and patient population. In resource-limited settings, the implementation of pharmacist-led programs may require careful prioritization and allocation of resources.

Policy-level support is essential for sustaining these interventions. Reimbursement models that recognize the value of clinical pharmacy services can facilitate broader implementation and integration into routine care. Health economic evaluations should be incorporated into future research to provide robust evidence for decision-makers.

Barriers to Implementation

Despite the demonstrated benefits of pharmacist-led interventions, several barriers hinder their widespread adoption. One of the primary challenges is the lack of integration of pharmacists into multidisciplinary

healthcare teams. In many healthcare systems, pharmacists are not fully utilized in clinical roles, limiting their ability to contribute to medication management.

Communication gaps between healthcare providers also represent a significant barrier. Effective implementation of pharmacist recommendations depends on collaboration with physicians and other clinicians. Resistance to change, differences in clinical perspectives, and hierarchical structures may impede interprofessional collaboration.

Another challenge is the variability in training and competencies among pharmacists. While clinical pharmacy education has advanced significantly, disparities in training programs and professional standards may affect the quality and consistency of interventions. Continuous professional development and standardization of competencies are necessary to ensure high-quality care.

Patient-related factors, such as reluctance to change established medication regimens and limited health literacy, can also affect the success of interventions. Addressing these barriers requires targeted education and engagement strategies.

Future Research Directions

The findings of this review highlight several key areas for future research. First, there is a need for high-quality randomized controlled trials with standardized methodologies and clearly defined outcome measures. Consistency in reporting will facilitate comparison across studies and enable more robust evidence synthesis.

Second, future studies should prioritize the evaluation of clinically meaningful endpoints, such as mortality, hospitalization rates, and quality of life, rather than relying solely on surrogate measures like medication count or PIM prevalence. Long-term follow-up is essential to assess the sustainability of intervention effects.

Third, research should explore the integration of emerging technologies, including artificial intelligence and machine learning, in supporting pharmacist-led interventions. These tools have the potential to enhance decision-making and personalize pharmacotherapy.

Fourth, greater attention should be given to underrepresented populations, including pediatric patients and individuals in low- and middle-income countries. Expanding the evidence base to diverse settings will improve the generalizability of findings.

Finally, implementation science approaches should be employed to identify effective strategies for integrating pharmacist-led interventions into routine clinical practice. Understanding the contextual factors that influence success will be critical for scaling up these interventions.

Future Perspectives

Future development should emphasize integration of clinical pharmacy with digital health, precision medicine, pharmacogenomics, therapeutic drug monitoring, real-world evidence, and advanced pharmacovigilance. Electronic systems may increasingly allow pharmacists to identify patients at elevated risk before adverse events occur.

Predictive approaches could potentially identify combinations of patient characteristics, medicines, laboratory abnormalities, and clinical circumstances associated with increased risk. Such models could facilitate targeted pharmacist intervention and more efficient allocation of clinical pharmacy resources.

Education will also require continued evolution. Clinical pharmacists increasingly require advanced competency in pharmacotherapy, evidence appraisal, pharmacokinetics, pharmacodynamics, pharmacovigilance, medication-safety science, informatics, communication, and interdisciplinary practice.

Final Integrative Interpretation

The extended synthesis of available evidence reinforces the central conclusion that pharmacist-led interventions represent a cornerstone of effective polypharmacy management. Their impact is most consistently observed in the improvement of prescribing appropriateness and the reduction of potentially inappropriate medications, rather than in the simplistic reduction of medication count.

This distinction is of fundamental importance. It reflects a shift from a reductionist view of polypharmacy toward a more sophisticated, patient-centered model of pharmacotherapy optimization. Within this model, the goal is not merely to minimize the number of medications but to ensure that each medication contributes meaningfully to patient health outcomes.

Pharmacists, through their specialized expertise and collaborative role within healthcare teams, are uniquely positioned to drive this transformation. Their contributions extend beyond technical medication review to

encompass patient education, interprofessional communication, and system-level improvements in medication safety.

The evidence supports the integration of pharmacist-led interventions as a standard component of care for patients with polypharmacy. Continued research, policy support, and investment in clinical pharmacy services will be essential for realizing the full potential of these interventions in improving patient outcomes and advancing healthcare quality.

Suggestions

The contemporary transformation of healthcare toward increasingly complex, individualized, technology-enabled, and multidisciplinary models of patient management necessitates a substantial strengthening of clinical pharmacy services. Complex pharmacotherapy is characterized by polypharmacy, multimorbidity, narrow therapeutic indices, frequent transitions of care, potential drug–drug and drug–disease interactions, variable adherence, pharmacokinetic and pharmacodynamic alterations, and substantial risks associated with medication errors and adverse drug reactions. In this context, clinical pharmacists should be positioned as integral members of multidisciplinary healthcare teams with clearly defined responsibilities for pharmacotherapeutic assessment, medication safety, pharmacovigilance, therapeutic optimization, drug toxicity prevention, and improvement of treatment outcomes.

A first major recommendation is the **systematic integration of clinical pharmacists into multidisciplinary clinical decision-making**. Clinical pharmacy should not be restricted to medication supply or retrospective review of prescriptions. Pharmacists should participate proactively in ward rounds, clinical consultations, medication reconciliation, therapeutic planning, discharge preparation, and follow-up care. Their pharmacological expertise can complement the diagnostic and therapeutic responsibilities of physicians and other healthcare professionals by providing structured assessments of medication appropriateness, dose selection, contraindications, interactions, monitoring requirements, and potential adverse effects. Institutional policies should therefore establish formal mechanisms through which clinical pharmacists can contribute to medication-related decisions while maintaining appropriate professional accountability and collaborative prescribing arrangements.

A second priority should be the **institutionalization of comprehensive medication reconciliation** across all major transitions of care. Admission to hospital, transfer between departments and movement from intensive care to general wards, hospital discharge, and transition between primary and secondary care are periods of particularly high medication-related risk. Clinical pharmacists should systematically compare patients' medication histories with current prescriptions, identify discrepancies, clarify intentional versus unintentional changes, and communicate accurate medication information to patients and healthcare professionals. Particular attention should be given to high-risk medicines, anticoagulants, insulin, opioids, immunosuppressants, antiepileptic agents, antiarrhythmics, cytotoxic medicines, and drugs with narrow therapeutic indices.

Third, clinical pharmacy services should expand their contribution to **pharmacovigilance and active adverse drug reaction surveillance**. Pharmacovigilance should move beyond passive reporting toward proactive identification, assessment, documentation, prevention, and management of medication-related harm. Clinical pharmacists are well positioned to recognize suspected adverse drug reactions because of their detailed knowledge of pharmacological mechanisms, dose–response relationships, drug interactions, and clinically significant toxicity patterns. Hospitals and healthcare institutions should develop pharmacist-led pharmacovigilance programs incorporating adverse-event screening, signal detection, causality assessment, reporting systems, medication-use evaluation, and feedback to prescribers. Integration of electronic health records and clinical decision-support systems could further facilitate identification of emerging medication-safety signals.

A fourth recommendation concerns the **prevention and management of drug toxicity**. Pharmacotherapy should be continuously evaluated in relation to renal and hepatic function, age, body composition, genetic characteristics, concomitant illnesses, nutritional status, and interacting medications. Clinical pharmacists should contribute to individualized dose adjustment and therapeutic drug monitoring, particularly for medicines with narrow therapeutic windows. Regular assessment of serum concentrations, renal clearance, hepatic function, electrocardiographic parameters, hematological indices, and other relevant biomarkers can support safer and more effective treatment. Special protocols should be developed for patients at increased risk of nephrotoxicity, hepatotoxicity, cardiotoxicity, neurotoxicity, hematological toxicity, and other serious medication-related complications.

Another important suggestion is the development of **structured pharmacotherapy review programs for patients receiving multiple medicines**. Polypharmacy should not automatically be interpreted as inappropriate prescribing because many patients with multimorbidity require multiple evidence-based therapies. Nevertheless, increasing medication burden substantially increases the possibility of drug interactions, duplication, inappropriate prescribing, adherence difficulties, and treatment-related harm. Clinical pharmacists should therefore perform systematic medication reviews that assess indication, effectiveness, safety, dose, duration, monitoring requirements, adherence, therapeutic duplication, and opportunities for deprescribing. Deprescribing should be undertaken through shared decision-making and should particularly address medicines for which the expected clinical benefit no longer outweighs the potential risk.

Clinical pharmacy services should also become more deeply involved in **prescribing-quality improvement**. Prescription review should incorporate not only technical correctness but also evidence-based therapeutic appropriateness. Clinical pharmacists can identify excessive doses, insufficient doses, inappropriate durations, therapeutic duplication, unnecessary medicines, potentially inappropriate combinations, contraindications, and deviations from institutional or evidence-based guidelines. Regular audit-and-feedback programs can provide clinicians with objective information regarding prescribing patterns and opportunities for improvement. Such programs should be educational and collaborative rather than punitive, thereby encouraging continuous professional development and a culture of medication safety.

A further priority should be the expansion of **antimicrobial stewardship activities**. Clinical pharmacists with expertise in infectious diseases and antimicrobial pharmacotherapy can contribute to appropriate antimicrobial selection, dosing, route, duration, de-escalation, therapeutic monitoring, and prevention of unnecessary exposure. Pharmacist participation in antimicrobial stewardship programs may support reduction of inappropriate antibiotic use, minimize adverse drug reactions, reduce selection pressure for antimicrobial resistance, and improve clinical outcomes. Stewardship programs should incorporate local resistance patterns, microbiological findings, patient-specific characteristics, pharmacokinetic considerations, and principles of antimicrobial optimization.

The increasing availability of pharmacogenomic information also suggests a need to strengthen **precision pharmacotherapy**. Where clinically validated and appropriately implemented, pharmacogenetic information can assist in predicting differences in drug metabolism, efficacy, and toxicity. Clinical pharmacists should develop competencies in interpreting pharmacogenomic results and translating relevant findings into practical medication recommendations. However, implementation should remain evidence-based, ethically responsible, clinically justified, and supported by appropriate laboratory infrastructure and professional education. Pharmacogenomics should complement rather than replace comprehensive clinical assessment.

Another important recommendation is the expansion of **patient-centered clinical pharmacy interventions**. Medication safety cannot be achieved exclusively through professional monitoring because patients and caregivers directly influence medication-taking behavior. Clinical pharmacists should provide individualized medication counseling, explain therapeutic objectives, discuss potential adverse effects, identify adherence barriers, simplify medication regimens when possible, and promote shared decision-making. Health-literacy-sensitive communication should be used to ensure that patients understand how, when, and why medicines should be used. Special attention should be directed toward older adults, individuals receiving multiple medicines, patients with cognitive limitations, and those managing complex long-term therapies.

Clinical pharmacy services should increasingly employ **digital health technologies and artificial intelligence-supported medication management**. Electronic prescribing, computerized clinical decision support, automated interaction checking, medication-risk algorithms, electronic pharmacovigilance systems, and integrated laboratory monitoring can strengthen the capacity of pharmacists to identify medication-related problems. Nevertheless, digital systems should support rather than replace professional judgment. Excessive alerts may produce alert fatigue, while poorly designed algorithms can generate clinically irrelevant recommendations. Therefore, clinical pharmacists should participate in the design, validation, implementation, and continuous evaluation of medication-related digital technologies.

Healthcare organizations should also establish **standardized clinical pharmacy performance indicators**. Evaluation should extend beyond traditional activity measures such as the number of reviewed prescriptions or consultations. Meaningful indicators should include prevention of medication errors, clinically significant interventions, avoided adverse drug events, optimization of dosing, improved adherence, reduced inappropriate prescribing, antimicrobial-use optimization, successful deprescribing, reduced readmissions, and patient-

centered outcomes. Economic indicators, including avoidance of preventable medication-related costs and optimization of resource utilization, should also be incorporated.

Professional education represents another fundamental priority. **Clinical pharmacists require advanced competencies in clinical pharmacology, pharmacotherapy, pharmacokinetics, pharmacodynamics, pharmacovigilance, toxicology, therapeutics, communication, evidence-based medicine, and clinical decision-making.** Continuing professional development should therefore be linked to emerging therapeutic areas, precision medicine, biologics, oncology, antimicrobial resistance, geriatric pharmacotherapy, critical care, and digital health. Interprofessional education involving medical, pharmacy, nursing, and allied-health students may further improve understanding of professional roles and facilitate effective team-based care.

At the health-system level, policymakers should promote **appropriate regulatory and organizational frameworks for clinical pharmacy practice**. Clear definitions of pharmacists' responsibilities, collaborative practice arrangements, and documentation standards, access to clinical information, professional recognition, and reimbursement mechanisms can facilitate sustainable implementation. Clinical pharmacy services should be incorporated into hospital accreditation and medication-safety frameworks where appropriate. Adequate staffing is also essential because high clinical workload without sufficient pharmacist capacity can limit the quality and continuity of pharmaceutical care.

Research should additionally move toward **multicenter, longitudinal, outcomes-based evaluation of clinical pharmacy interventions**. Future investigations should examine not only whether pharmacists identify medication-related problems but whether interventions produce measurable improvements in morbidity, mortality, treatment effectiveness, patient safety, quality of life, healthcare utilization, and cost-effectiveness. Standardized outcome definitions and robust study designs would improve comparability between clinical pharmacy programs and strengthen the evidence base supporting their integration into healthcare systems.

Finally, clinical pharmacy should be understood as a **strategic component of modern healthcare quality and public health rather than an isolated professional service**. Medication-related harm represents a multidimensional challenge involving prescribing, dispensing, administration, monitoring, adherence, communication, and health-system organization. Clinical pharmacists possess specialized expertise capable of connecting these components through systematic medication assessment and pharmacotherapeutic management. Future models should therefore move toward proactive, patient-centered, data-informed, multidisciplinary clinical pharmacy services capable of identifying risk before harm occurs.

The overarching suggestion is to establish an integrated clinical pharmacy framework in which **pharmacovigilance, medication reconciliation, therapeutic drug monitoring, toxicity management, medication review, antimicrobial stewardship, pharmacogenomics, deprescribing, prescribing-quality improvement, patient education, and digital medication surveillance** operate as interconnected components of a unified medication-safety strategy. Such an approach has the potential to improve therapeutic effectiveness while simultaneously reducing preventable medication-related harm. The future development of clinical pharmacy should consequently be guided by measurable competencies, evidence-based practice, interdisciplinary collaboration, technological innovation, patient engagement, and continuous quality improvement. By strengthening these dimensions, healthcare systems can more effectively transform pharmacotherapy from a predominantly prescription-centered process into a comprehensive, continuously monitored, individualized, and outcomes-oriented therapeutic discipline.

The future development of clinical pharmacy services should be guided by a broader conceptual shift from medication-centered activities toward comprehensive pharmacotherapy management and measurable patient outcomes. As therapeutic regimens become increasingly sophisticated, the clinical pharmacist should function as a pharmacotherapy specialist capable of continuously evaluating the relationship between medication exposure, therapeutic response, adverse effects, patient characteristics, and clinical outcomes. This transformation requires healthcare institutions to establish clinical pharmacy models that are proactive, integrated, patient-centered, and sufficiently resourced to address the complexity of contemporary pharmacotherapy.

An important area for development is the establishment of risk-stratified clinical pharmacy services. Not every patient requires the same intensity of pharmaceutical care. Healthcare systems should therefore develop standardized criteria for identifying patients at particularly high risk of medication-related harm. Such criteria may include advanced age, multimorbidity, extensive polypharmacy, renal or hepatic impairment, previous adverse drug reactions, use of high-alert medicines, frequent hospitalization, complex antimicrobial therapy, anticoagulation, immunosuppressive treatment, chemotherapy, and multiple transitions between healthcare

settings. Patients meeting predefined risk criteria should receive prioritized pharmacist assessment and follow-up. Risk stratification would allow limited clinical pharmacy resources to be directed toward individuals most likely to benefit from intensive intervention.

A complementary recommendation is the development of specialized clinical pharmacy pathways for high-risk therapeutic areas. Oncology, cardiology, infectious diseases, intensive care, neurology, psychiatry, transplantation, pediatrics, geriatrics, and critical care frequently involve complicated pharmacotherapeutic decisions. Specialized pharmacists should therefore participate in disease-specific multidisciplinary teams where their expertise can contribute to dose optimization, interaction management, toxicity prevention, therapeutic monitoring, and evidence-based treatment selection. Such specialization can improve the depth of pharmaceutical decision-making while strengthening collaboration between pharmacists and physicians.

Particular emphasis should be placed on geriatric pharmacotherapy and multimorbidity management. Older adults frequently experience altered pharmacokinetics, pharmacodynamic sensitivity, multiple chronic diseases, and extensive medication exposure. Clinical pharmacists should systematically evaluate potentially inappropriate medications, anticholinergic burden, sedative burden, drug duplication, renal dose requirements, adherence challenges, and competing therapeutic priorities. Treatment plans should be individualized according to life expectancy, functional status, patient preferences, therapeutic goals, and risk–benefit considerations. Pharmacotherapy optimization in older adults should prioritize clinically meaningful outcomes rather than simply increasing the number of guideline-recommended medicines.

The development of transitional clinical pharmacy services should also become a major healthcare priority. Medication-related problems frequently emerge after discharge because patients may receive new medicines, discontinue previous medicines, misunderstand instructions, encounter affordability barriers, or experience inadequate communication between healthcare providers. Pharmacists should therefore participate in post-discharge medication reconciliation and follow-up. Telephone, telepharmacy, electronic messaging, or outpatient consultations can be used to identify emerging adverse reactions, adherence problems, therapeutic failures, and medication discrepancies. Continuity of pharmaceutical care should extend beyond hospital discharge and connect inpatient, outpatient, primary-care, and community pharmacy services.

Another important direction is the systematic incorporation of medication-use evaluation and quality-improvement methodology into clinical pharmacy practice. Hospitals should periodically examine how medicines are selected, prescribed, administered, monitored, and discontinued. Pharmacists can lead medication-use evaluations targeting high-risk or high-cost medicines, prescribing variability, unnecessary treatment duration, inappropriate intravenous administration, therapeutic duplication, and deviations from evidence-based protocols. Findings should be translated into interventions such as clinical guidelines, prescribing protocols, educational initiatives, electronic alerts, and audit-feedback mechanisms. This creates a continuous improvement cycle in which clinical pharmacy contributes directly to institutional quality governance.

The human factors and systems approach to medication safety should receive greater attention. Medication errors rarely result exclusively from individual negligence; they can emerge from communication failures, poorly designed workflows, inadequate staffing, confusing labeling, electronic-system limitations, interruptions, insufficient training, or fragmented responsibility. Clinical pharmacists should therefore participate in medication-safety committees and root-cause analyses of serious medication incidents. The objective should be to identify system vulnerabilities and implement preventive interventions rather than relying solely on individual vigilance. A mature medication-safety culture should encourage transparent reporting, learning from errors, and continuous redesign of unsafe processes.

Clinical pharmacy services should additionally strengthen high-alert medication management. Institutional protocols should define standardized prescribing, preparation, administration, monitoring, and documentation requirements for medicines associated with substantial patient harm when used incorrectly. Pharmacists should review dosing, indications, contraindications, infusion parameters, laboratory requirements, and potential interactions before administration where appropriate. Particular attention should be given to anticoagulants, insulin, opioids, concentrated electrolytes, sedatives, chemotherapy, and other medicines identified locally as high risk. Standardization can reduce variability and create multiple protective barriers against medication-related harm.

The future of clinical pharmacy should also incorporate therapeutic drug monitoring as a precision-oriented clinical service rather than simply a laboratory measurement. Drug concentrations should be interpreted in relation to dose history, sampling time, pharmacokinetic parameters, disease state, renal and hepatic function, interacting medicines, and clinical response. Pharmacists trained in pharmacokinetic analysis can assist

clinicians in achieving appropriate exposure while minimizing toxicity. Advanced population pharmacokinetic and Bayesian dosing approaches may further support individualized dosing for selected medicines, particularly in critically ill patients and those with substantial pharmacokinetic variability.

There is also a need to strengthen clinical pharmacy involvement in medication adherence and persistence. Treatment effectiveness depends not only on selecting an appropriate medicine but also on whether patients can and will use it correctly over time. Pharmacists should identify intentional and unintentional non-adherence, assess regimen complexity, explore adverse effects, consider socioeconomic barriers, and collaborate with patients to develop feasible therapeutic plans. Simplification of dosage schedules, synchronization of medicines, appropriate education, and shared decision-making may improve long-term medication use. Adherence interventions should avoid blaming patients and instead address structural, therapeutic, behavioral, and communication barriers.

Another emerging priority is the integration of real-world evidence into pharmacotherapeutic decision-making. Clinical pharmacists should develop competencies in evaluating observational studies, registries, electronic health-record data, medication-use databases, and post-marketing safety information. Such evidence can complement randomized clinical trials by demonstrating how medicines perform in populations that may be underrepresented in controlled studies. Pharmacists can contribute to translating real-world evidence into individualized therapeutic decisions while recognizing potential confounding, selection bias, and other methodological limitations.

Clinical pharmacy should also play a stronger role in health technology assessment and pharmacoeconomic optimization. Therapeutic optimization does not necessarily mean selecting the most expensive or newest medicine. Decisions should consider comparative effectiveness, safety, patient preferences, treatment burden, availability, affordability, and overall healthcare-resource utilization. Pharmacists with pharmacoeconomic expertise can assist institutions in evaluating therapeutic alternatives, formulary decisions, medicine-use policies, and cost-effective treatment pathways. Economic optimization should, however, remain subordinate to clinical appropriateness and patient safety.

The expansion of telepharmacy and digitally enabled pharmaceutical care offers additional opportunities, particularly for geographically dispersed populations and healthcare systems with limited specialist resources. Remote pharmacist consultations can support medication review, chronic disease management, patient counseling, adverse-event monitoring, and follow-up. Digital platforms may facilitate communication among pharmacists, physicians, nurses, and patients. However, telepharmacy should be implemented with appropriate standards for confidentiality, documentation, clinical accountability, interoperability, and continuity of care. Digital access should complement rather than worsen existing healthcare inequalities.

A further recommendation is the creation of integrated clinical pharmacy databases and medication-safety dashboards. Healthcare organizations should collect standardized information regarding pharmacist interventions, medication errors, adverse drug reactions, high-risk prescribing, therapeutic monitoring, antimicrobial use, and clinically relevant outcomes. Such data can provide institutions with real-time or longitudinal information about medication-related risks. Dashboards should be designed not merely for administrative reporting but to support clinical decision-making, quality improvement, resource allocation, and strategic planning.

Clinical pharmacy education should correspondingly undergo curricular modernization. Undergraduate and postgraduate pharmacy education should place greater emphasis on clinical reasoning, evidence-based pharmacotherapy, patient assessment, pharmacovigilance, and communication, interpretation of laboratory data, clinical pharmacokinetics, therapeutics, toxicology, and interprofessional teamwork. Simulation-based education, case-based learning, objective structured clinical examinations, clinical placements, and problem-based learning can provide opportunities to develop practical competencies. Continuing professional education should ensure that practicing pharmacists remain capable of responding to rapidly evolving therapeutic technologies.

Interprofessional education should extend beyond academic institutions into workplace-based collaborative learning. Pharmacists, physicians, nurses, and other healthcare professionals should participate in joint case conferences, medication-safety reviews, antimicrobial stewardship meetings, and multidisciplinary clinical rounds. Such collaboration can improve understanding of professional competencies and reduce communication barriers. Effective teamwork should be supported by clearly defined roles, respectful communication, standardized documentation, and shared accountability for medication-related outcomes.

Research priorities should increasingly include implementation science. Evidence that a clinical pharmacy intervention is effective under controlled research conditions does not automatically demonstrate that it can be implemented successfully across different healthcare environments. Future research should investigate organizational readiness, workforce requirements, training models, workflow integration, sustainability, cost-effectiveness, patient acceptance, and contextual barriers. Hybrid effectiveness–implementation studies may be particularly valuable because they can evaluate both clinical impact and practical implementation simultaneously.

Healthcare policymakers should establish national or institutional strategic frameworks for clinical pharmacy development. These frameworks should define minimum service standards, competency requirements, documentation procedures, quality indicators, workforce models, continuing education expectations, and mechanisms for evaluating patient outcomes. Where appropriate, professional regulations should facilitate collaborative medication-management practices while preserving clear professional responsibilities. Sustainable implementation requires recognition that high-quality clinical pharmacy services represent an investment in medication safety, treatment effectiveness, healthcare efficiency, and public health.

Finally, future clinical pharmacy development should adopt a patient-outcome-centered philosophy. The ultimate value of clinical pharmacy should not be measured solely by the number of recommendations made, prescriptions reviewed, or interventions documented. The central question should be whether pharmaceutical care improves outcomes that matter to patients and healthcare systems. These outcomes may include reduced preventable adverse drug events, improved therapeutic control, fewer medication-related hospitalizations, improved adherence, reduced antimicrobial resistance, better quality of life, lower treatment burden, and more rational use of healthcare resources.

The future clinical pharmacy model should integrate clinical expertise, pharmacological science, pharmacovigilance, medication-safety engineering, precision medicine, digital health, patient engagement, interdisciplinary collaboration, and outcomes research. Such integration would reposition the clinical pharmacist from a predominantly medicine-focused professional toward an advanced pharmacotherapy specialist embedded within the broader healthcare system. The resulting model can provide continuous assessment of medication appropriateness from treatment initiation through monitoring, modification, discontinuation, and long-term follow-up.

The optimization of complex pharmacotherapy requires a coordinated system in which clinical pharmacists are empowered to identify medication-related risks, prevent toxicity, improve prescribing quality, support individualized treatment, monitor therapeutic response, and contribute to measurable patient and public health outcomes. Future investment should therefore focus not only on expanding the number of clinical pharmacy services but also on improving their quality, integration, specialization, technological capacity, research foundation, and outcome orientation. A clinically integrated pharmacy workforce can become an essential component of modern medication-safety infrastructure and a significant contributor to safer, more effective, equitable, and sustainable healthcare.

An additional priority should be the promotion of equitable access to high-quality clinical pharmacy services across different healthcare environments. Clinical pharmacy should not remain concentrated within highly specialized tertiary hospitals. Appropriate models should also be developed for primary care, community healthcare, outpatient clinics, long-term care institutions, rehabilitation facilities, and rural healthcare settings. Expanding pharmacist-led medication management across these settings could improve continuity of care and reduce disparities in access to professional pharmacotherapeutic expertise.

Healthcare institutions should further establish formal medication-safety governance structures in which clinical pharmacists have clearly defined responsibilities for identifying, reporting, analyzing, and preventing medication-related incidents. Pharmacists should contribute to institutional medication-safety committees, formulary governance, antimicrobial stewardship groups, adverse-event review processes, and quality-improvement programs. Their participation should be supported by direct access to relevant clinical information, laboratory results, medication histories, and prescribing systems.

Greater attention should also be given to equity-sensitive pharmacotherapy optimization. Treatment decisions may be influenced by socioeconomic circumstances, health literacy, availability of medicines, treatment affordability, geographic accessibility, and patients' ability to maintain complex regimens. Clinical pharmacists should therefore consider practical barriers alongside pharmacological appropriateness. Where clinically acceptable, treatment regimens should be simplified, affordable alternatives considered, and communication adapted to individual patient needs.

Future clinical pharmacy models should additionally incorporate predictive medication-risk assessment. Advanced analytical systems may enable identification of patients at increased risk of adverse drug events, non-adherence, therapeutic failure, or clinically significant interactions before complications occur. Pharmacists should participate in validating such predictive models and determining how their outputs can be translated into clinically meaningful interventions. Predictive technologies should remain transparent, clinically interpretable, and subject to continuous evaluation.

Finally, clinical pharmacy development should be accompanied by a long-term sustainability strategy. Sustainable services require appropriate workforce planning, professional recognition, institutional leadership, continuing education, technological infrastructure, and reliable financing. Expansion should therefore be based on demonstrated clinical value rather than service volume alone. Healthcare organizations should continuously evaluate whether clinical pharmacy interventions produce measurable improvements in safety, effectiveness, patient experience, quality of care, and resource utilization.

The future direction should consequently be toward a proactive, integrated, evidence-based, patient-centered, and outcomes-driven clinical pharmacy model. Such a model can transform medication management from a fragmented process into a coordinated system of risk identification, therapeutic optimization, monitoring, education, and continuous improvement. By strengthening clinical pharmacists' integration within healthcare teams, health systems can enhance the safety and effectiveness of complex pharmacotherapy while contributing to broader objectives of quality improvement, healthcare sustainability, and public health protection.

Conclusions

- The present research demonstrates that clinical pharmacy services represent an essential component of contemporary healthcare systems and provide substantial opportunities to improve the safety, effectiveness, quality, and rationality of complex pharmacotherapy. The evidence indicates that clinical pharmacists have progressed beyond traditional dispensing-oriented responsibilities and now function as integral members of multidisciplinary healthcare teams, contributing directly to medication reconciliation, therapeutic assessment, pharmacovigilance, medication-error prevention, adverse drug reaction management, therapeutic drug monitoring, patient counseling, antimicrobial stewardship, and individualized pharmacotherapy.
- The findings establish that the complexity of modern medication regimens requires systematic professional evaluation because polypharmacy, multimorbidity, physiological changes, organ dysfunction, pharmacokinetic variability, drug-drug interactions, drug-disease interactions, and adherence barriers can substantially influence therapeutic outcomes. Comprehensive clinical pharmacy interventions can identify inappropriate medicines, dosing errors, therapeutic duplication, contraindications, interactions, inadequate monitoring, unnecessary treatment, and emerging toxicity, thereby creating important preventive barriers against medication-related harm.
- Clinical pharmacists also make an important contribution to pharmacovigilance by improving recognition, assessment, documentation, prevention, and reporting of adverse drug reactions. Their direct involvement in medication review and patient monitoring enables earlier identification of clinically significant toxicity and facilitates appropriate therapeutic modification. Consequently, pharmacovigilance should be integrated into routine clinical pharmacy practice rather than considered an isolated reporting activity.
- The research further concludes that therapeutic optimization requires continuous reassessment rather than one-time evaluation of prescriptions. Renal and hepatic function, laboratory findings, treatment response, adverse effects, medication adherence, and changing clinical circumstances should be incorporated into ongoing pharmacotherapeutic decision-making. Therapeutic drug monitoring and, where clinically justified, pharmacogenomic information can further strengthen individualized treatment and improve the benefit-risk balance.
- Medication safety is best achieved through a systems-based approach encompassing prescribing, dispensing, administration, monitoring, transitions of care, and follow-up. Clinical pharmacists can reduce risks at each stage by combining pharmacological expertise with clinical judgment, electronic decision-support tools, patient-specific information, and interdisciplinary communication. Their participation is particularly valuable for high-risk medicines, narrow-therapeutic-index drugs, anticoagulants, antineoplastic agents, antimicrobials, immunosuppressants, and other therapies associated with substantial potential toxicity.
- The findings support the integration and expansion of clinical pharmacy services as a strategic component of evidence-based, patient-centered healthcare. Their value extends beyond individual medication interventions to improvement of prescribing quality, prevention of avoidable harm, enhancement of therapeutic

effectiveness, reduction of medication-related risks, and promotion of rational medicine use. Future clinical pharmacy development should emphasize proactive rather than reactive practice, standardized outcome assessment, digital integration, risk stratification, pharmacovigilance, precision medicine, and longitudinal patient follow-up. A fully integrated clinical pharmacy model can therefore contribute significantly to safer, more effective, economically responsible, and individualized pharmacotherapy while strengthening the overall quality and sustainability of modern healthcare delivery.

Recommendation

- Clinical pharmacy services should be systematically integrated into healthcare institutions as an essential component of medication management, particularly in settings characterized by polypharmacy, multimorbidity, high-risk medicines, complex therapeutic regimens, and substantial medication-related risks. Healthcare organizations should establish clearly defined clinical pharmacy roles that enable pharmacists to participate proactively in prescribing review, medication reconciliation, therapeutic optimization, pharmacovigilance, medication-error prevention, adverse drug reaction assessment, and treatment monitoring. Clinical pharmacists should be incorporated into multidisciplinary clinical teams and participate in therapeutic decision-making rather than being limited to traditional dispensing functions.
- Medication reconciliation should be implemented systematically at admission, transfer, and discharge, with particular attention to discrepancies involving omitted medicines, duplications, incorrect doses, contraindications, interactions, and unintended treatment changes. Comprehensive medication reviews should be conducted for patients with multiple medicines or clinically significant risk factors. These reviews should evaluate indications, therapeutic effectiveness, dosage appropriateness, duration, adherence, interactions, organ-function status, monitoring requirements, and opportunities for deprescribing or regimen simplification.
- Pharmacovigilance should be strengthened through active clinical surveillance and structured adverse drug reaction reporting. Clinical pharmacists should be empowered to identify suspected adverse reactions, assess their severity and preventability, document relevant clinical information, recommend appropriate therapeutic modifications, and contribute to institutional and national pharmacovigilance systems. Particular attention should be given to medicines associated with serious or potentially life-threatening toxicity.
- Healthcare institutions should establish risk-stratified medication-management models that prioritize patients receiving high-alert medicines, narrow-therapeutic-index drugs, anticoagulants, antineoplastic agents, immunosuppressants, complex antimicrobials, and medicines requiring renal or hepatic dose adjustment. Therapeutic drug monitoring should be applied when clinically indicated, with pharmacists interpreting concentrations in relation to dosing history, sampling time, pharmacokinetic characteristics, organ function, and therapeutic targets.
- Clinical pharmacy practice should increasingly incorporate evidence-based precision medicine. Where clinically validated, pharmacogenomic information should be integrated into medication selection and dosing decisions. Electronic health records and clinical decision-support systems should be used to facilitate interaction screening, laboratory monitoring, medication reconciliation, and identification of potential safety problems. However, automated alerts should remain subject to professional interpretation to minimize alert fatigue and inappropriate interventions.
- Patient-centered counseling should be strengthened to improve medication literacy, adherence, and safe medicine use. Pharmacists should provide individualized education concerning administration, expected therapeutic effects, adverse reactions, interactions, missed doses, and circumstances requiring medical attention. Communication between hospital pharmacists, clinical pharmacists, community pharmacists, physicians, nurses, and primary care professionals should also be improved to ensure continuity of pharmacotherapy across transitions of care.
- The healthcare organizations and academic institutions should support continuous professional development in clinical pharmacology, pharmacotherapy, pharmacovigilance, pharmacokinetics, pharmacogenomics, medication safety, evidence-based medicine, and digital health. Future research should evaluate clinical, economic, and patient-centered outcomes of pharmacy interventions using standardized indicators. Such an integrated strategy would strengthen prescribing quality, reduce preventable medication-related harm, improve therapeutic effectiveness, and establish clinical pharmacy as a central component of safe, rational, individualized, and evidence-based pharmacotherapy.

References

1. Lavan AH, Gallagher P, O'Mahony D. Methods to reduce prescribing errors in elderly patients with multimorbidity. *Clin Interv Aging*. 2016;11:857–66. doi:10.2147/CIA.S100581
2. Dills H, Shah K, Messinger-Rapport B, et al. Deprescribing medications for older adults in the primary care context: a mixed-studies review. *Health Sci Rep*. 2018;1(7):e45. doi:10.1002/hsr2.45
3. Page AT, Clifford RM, Potter K, et al. The feasibility and effect of deprescribing in older adults on mortality and health outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Br J Clin Pharmacol*. 2016;82(3):583–623. doi:10.1111/bcp.12975
4. Mekonnen AB, McLachlan AJ, Brien JA. Effectiveness of pharmacist-led medication review programs on the quality of medication prescribing and use: a systematic review. *J Pharm Policy Pract*. 2016;9:27.
5. Huiskes VJ, Burger DM, van den Ende CH, van den Bemt BJ. Effectiveness of medication review: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Fam Pract*. 2017;18(1):5. doi:10.1186/s12875-016-0577-x
6. Jokanovic N, Tan EC, Sudhakaran S, et al. Pharmacist-led medication review in community settings: an overview of systematic reviews. *Res Social Adm Pharm*. 2017;13(4):661–85.
7. Steinman MA, Fick DM. Using explicit criteria to improve medication safety in older adults. *JAMA Intern Med*. 2021;181(5):639–40. doi:10.1001/jamainternmed.2021.0073
8. O'Mahony D, O'Sullivan D, Byrne S, et al. STOPP/START criteria for potentially inappropriate prescribing in older people: version 2. *Age Ageing*. 2015;44(2):213–8.
9. Curtin D, Gallagher P, O'Mahony D. Deprescribing in older people approaching end of life: a randomized controlled trial using STOPPFrail criteria. *J Am Geriatr Soc*. 2020;68(4):762–69. doi:10.1111/jgs.16278
10. Scott IA, Hilmer SN, Reeve E, et al. Reducing inappropriate polypharmacy: the process of deprescribing. *JAMA Intern Med*. 2015;175(5):827–34.
11. Grijidic D, Le Couteur DG, Abernethy DR, et al. Deprescribing in older people: a framework for clinical practice. *Med J Aust*. 2020;212(2):88–90. doi:10.5694/mja2.50462
12. Sönnichsen A, Trampisch US, Rieckert A, et al. Polypharmacy in primary care: a systematic review of interventions to optimise prescribing in older patients. *Dtsch Arztebl Int*. 2016;113(7):109–16. doi:10.3238/arztebl.2016.0109
13. Kaur S, Mitchell G, Vitetta L, Roberts MS. Interventions that can reduce inappropriate prescribing in the elderly: a systematic review. *Drugs Aging*. 2009;26(12):1013–28.
14. Clyne B, Cooper JA, Hughes CM, et al. A process evaluation of a cluster randomised trial to reduce potentially inappropriate prescribing in older people in primary care. *Trials*. 2016;17(1):402. doi:10.1186/s13063-016-1528-9
15. Hill-Taylor B, Walsh KA, Stewart S, et al. Effectiveness of the STOPP/START criteria in reducing inappropriate prescribing in older patients: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Clin Pharmacol*. 2016;72(5):509–19. doi:10.1007/s00228-016-2029-6
16. Houlind MB, Andersen AL, Treldal C, et al. A collaborative pharmacist-physician intervention to reduce inappropriate prescribing in older patients admitted to a geriatric ward: a randomised controlled trial. *Eur Geriatr Med*. 2021;12(4):755–64. doi:10.1007/s41999-021-00465-9
17. Marcum ZA, Gellad WF. Deprescribing in older adults: a new concept for a new age. *J Am Geriatr Soc*. 2017;65(6):1128–30. doi:10.1111/jgs.14899
18. Reeve E, Jordan V, Thompson W, et al. Withdrawal of antihypertensive drugs in older people. *Cochrane Database Syst Rev*. 2020;6(6):CD012572.
19. Cullinan S, O'Mahony D, O'Sullivan D, Byrne S. Use of a deprescribing tool to reduce inappropriate prescribing in older people: a feasibility study. *Int J Pharm Pract*. 2015;23(2):140–4.
20. Thillainadesan J, Gnjidic D, Green S, Hilmer SN. Impact of deprescribing interventions in older hospitalised patients on prescribing and clinical outcomes: a systematic review of randomised trials. *Drugs Aging*. 2018;35(4):303–19. doi:10.1007/s40266-018-0536-4
21. Hanlon JT, Semla TP, Schmader KE. Alternative medications for medications to avoid in older adults. *JAMA*. 2015;314(23):2545–46. doi:10.1001/jama.2015.15978
22. Ibrahim K, Cox NJ, Stevenson JM, et al. A systematic review of the evidence for deprescribing interventions in older patients with polypharmacy and multimorbidity. *Age Ageing*. 2021;50(5):1500–1514. doi:10.1093/ageing/afab094

23. Al-Rashed SA, Wright DJ, Roebuck C, et al. The value of inpatient pharmacist interventions on discharge prescribing in older patients with polypharmacy: a systematic review and meta-analysis. *Br J Clin Pharmacol*. 2022;88(4):1522–1543. doi:10.1111/bcp.15101
24. Mair A, Fernandez-Llimos F, Silva D, et al. Polypharmacy management programmes: a European perspective. *Eur J Hosp Pharm*. 2022;29(3):126–130. doi:10.1136/ejhpharm-2020-002396
25. McKean M, Pillai P, Young L, et al. Pharmacist-led medication reviews in primary care: a systematic review of economic evaluations. *Res Social Adm Pharm*. 2023;19(1):1–11.
26. Omuya H, Nickel C, Wilson P, Chew-Graham C. A systematic review of the effectiveness of interventions to reduce polypharmacy in older people with multimorbidity. *BMJ Open*. 2021;11(9):e048932. doi:10.1136/bmjopen-2021-048932
27. Sawan M, Reeve E, Turner J, et al. A systematic review of the barriers and facilitators to deprescribing in older adults. *Res Social Adm Pharm*. 2021;17(1):1793–1806. doi:10.1016/j.sapharm.2020.06.019
28. Dahm AR, Rauh C, Gruber W, et al. Impact of a pharmacist-led medication review on hospital readmission in older adults: a systematic review and meta-analysis. *J Am Geriatr Soc*. 2022;70(4):1247–1258.
29. Paoletti L, Jokanovic N, Page AT, et al. Deprescribing in older people living with frailty: a systematic review and meta-analysis. *Drugs Aging*. 2022;39(9):685–700. doi:10.1007/s40266-022-00965-2
30. Walsh EK, Cussen L, O'Mahony D, et al. STOPP/START criteria for potentially inappropriate prescribing in older people: a systematic review of their application in randomised controlled trials. *Eur Geriatr Med*. 2022;13(4):787–800. doi:10.1007/s41999-022-00628-2
31. Cross AJ, Elliott RA, George J, et al. Interventions to improve the quality of medication use in older people with multimorbidity: a systematic review and meta-analysis. *JAMA Netw Open*. 2023;6(5):e2311661. doi:10.1001/jamanetworkopen.2023.11661
32. Mangin D, Risdon C, Lamarche L, et al. Deprescribing in primary care: a qualitative study of patients' and clinicians' experiences. *Can Fam Physician*. 2021;67(5):e121–e129.
33. Curkovic M, Tomlinson J, Smith A, et al. Pharmacist-led medication optimisation in care homes: a systematic review of outcomes and implementation factors. *Int J Clin Pharm*. 2023;45(2):314–327. doi:10.1007/s11096-022-01527-1
34. Sulashvili N, Kvizhinadze N, Beglaryan M, Sulashvili M. Vocational training and activity of Pharmacists in Georgia. Georgian Med News. 2018 May; (278):199-206.
35. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Chichoyan N, Gabunia L. The disclosure of features, characteristics, possibilities and specialties of clinical pharmacists as mediator among doctors and patients for enhancement public health sector in a global world. Exp Clin Med. 2023; (4):57-61.
36. Sulashvili N, Kvizhinadze N, Beglaryan M, Sulashvili M. The peculiarities of pharmacotherapeutical treatment of Parkinson's disease. In: Materials of scientific and practical conference with international participation «Topical issues of experimental and clinical biochemistry». Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 43-49.
37. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M, Abuladze N, Alavidze N, Gabunia K, et al. The features of pharmacists' professional issue approaches, ensuring, aspirations and requirements according the mind of patients in Georgia. In: Materials of the international scientific and practical conference "Current issues of pharmacology, clinical pharmacology and clinical pharmacy". Kharkiv: National Pharmaceutical University of Ukraine; 2022. p. 20-36.
38. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Kvizhinadze N, Alavidze N, Okropiridze T. The features of pharmacists' professional issue approaches, ensuring, aspirations and requirements according the mind of patients in Georgia. In: Current Issues of Pharmacology, Clinical Pharmacology and Clinical Pharmacy. Kharkiv: National Pharmaceutical University of Ukraine; 2022. p. 20-36.
39. Sulashvili N, Beglaryan M, Alavidze N, et al. Scientific discussion on normative issues of occupational health, sanitary and hygienic epidemiological demands in pharmacy establishments during COVID diseases in the Republic of Georgia. Sci Rev. 2021; (3(38)):15-26.
40. Sulashvili N, Kvizhinadze N, Beglaryan M, et al. Pharmacoeconomical analysis methods in the healthcare system in Georgia. In: Materials of 12th Scientific and Practical Internet Conferences "Pharmacoeconomics in Ukraine, Condition and Development Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2020. p. 136-137.
41. Kvizhinadze N, Sulashvili N, Tophuria D, Matoshvili M. Pharmacoeconomical analysis of Enoxaparin and Heparin in Georgia. In: Materials of 12th Scientific and Practical Internet Conferences "Pharmacoeconomics

in Ukraine, Condition and Development Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2020. p. 149-150.
42. Sulashvili N, Alavidze N, Abuladze N, Kvizhinadze N, Gogashvili M, Beglaryan M. Pharmaceutical professional and organizational issue aspects in Georgia. In: Materials of 12th Scientific and Practical Internet Conferences "Pharmacoeconomics in Ukraine, Condition and Development Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2020. p. 11-20.
43. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Lobjanidze T, et al. The scientific discussion of invocation of features of clinical pharmacist profession, clinical pharmacy science and pharmaceutical organizational regulations vista globally, according new challenges in modern pharmacy practice of health care divisions. In: The III International Scientific and Practical Conference "Modern Pharmacy -- Science and Practice". Kutaisi: Akaki Tsereteli State University; 2023. p. 125-150.
44. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N. The impact factors, which have influenced of pharmacists' job gratification and vocational activity. In: International scientific and methodological conference "Chemistry-Achievements and Prospects" Dedicated to the 85th Anniversary of Academician Givi Vasilyevich Tsintsadze. Tbilisi: Georgian Technical University; 2019. p. 171-179.
45. Sulashvili N, Beglaryan M. Pharmacist's Mission gratification and profession improvement strategy. Black Sea Sci J Acad Res. 2015 Nov; 26(08):10-12.
46. Sulashvili N, Beglaryan M, Grigolia L. Vocational characteristics of employed pharmacy faculty students. Caucasus Int Univ Her. 2017; (12):89-102.
47. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Gabunia L, Beglaryan M, Chichoyan N. The scientific discussion of the key issue aspects of features of pharmacists' profession in general locally and globally. In: Materials of the All-Ukrainian international scientific and practical conference "Clinical Pharmacy in Ukraine and the World". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2023. p. 204-205.
48. Sulashvili N, Beglaryan M, Kvizhinadze N, et al. Common characteristics and scope of young pharmacist professionals in Georgia. In: Materials of 12th Scientific and Practical Internet Conferences "Pharmacoeconomics in Ukraine, Condition and Development Prospects". Kharkiv: National University of Pharmacy; 2020. p. 21-30.
49. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Alavidze N. Adverse drug reaction. Caucasus J Health Sci Public Health. 2018 Jun; 2(Suppl 3):42-44.
50. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Kvizhinadze N, Beglaryan M. The scientific study of new characteristics for pharmacological treatment of osteoporosis disease. In: Materials of scientific and practical conference with international participation «Topical issues of experimental and clinical biochemistry». Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 36-43.
51. Sulashvili N, Beglaryan M. Vocational peculiarities of young pharmacist professionals. Int Sci J Intellect. 2018; (35):96-104.
52. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M. The scientific discussion of the features of pharmaceutical occupational principles adjustment, challenges, perspectives and innovations in pharmaceutics. In: Conference Book of the First International Conference "Future of Health Care in the 21 Century". Tbilisi: Tbilisi State Medical University; 2021. p. 184-211.
53. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Gabunia L, Alavidze M, Sulashvili M. The manifestation of features of some side effects of antifungal drugs in general. In: Materials of the III Scientific and Practical International Conference "Microbiological and Immunological Research in Modern Medicine". Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2024. p. 52-56.
54. Olawale OO, Kezeli T, Nikoleishvili E, Sulashvili N. Adverse drug reaction. Caucasus J Health Sci Public Health. 2018 Jun; 2(Suppl 3):42-44.
55. Sulashvili N, Beglaryan M, Gogashvili M, Matoshvili M. Occupational particularities and strategy of Pharmacy faculty students. Exp Clin Med. 2018; (3):15-25.
56. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M, et al. The features of general prevention achievements and universal pharmaco therapy treatment for fighting to the COVID-19 diseases in 2020. In: Material of IX International Scientific-Practical Conference «Modern achievements of pharmaceutical technology and biotechnology». Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2021. p. 27-34.
57. Sulashvili N, Beglaryan M. Vocational features and facilities of young pharmacist specialists. Exp Clin Med. 2018; (1):62-68.

58. Sulashvili N, Beglaryan M. Features for occupational choice of young pharmacist specialists. Caucasus Int Univ Her. 2018; (13):118-126.
59. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M, Sulashvili M. The features of general prevention achievements and universal pharmaco therapy treatment for fighting to the COVID-19 diseases in 2020. In: Modern achievements of pharmaceutical technology and biotechnology. Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2021. p. 27-34.
60. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Gabunia L, Alavidze N, Sulashvili M. The manifestation of features of some side effects of antifungal drugs in general. In: Microbiological and Immunological Research in Modern Medicine. Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2024. p. 52-56.
61. Sulashvili N, Kvizhinadze N, Beglaryan M, Sulashvili M. The peculiarities of pharmacotherapeutical treatment of Parkinson's disease. In: Topical issues of experimental and clinical biochemistry. Kharkiv: National University of Pharmacy; 2021. p. 43-49.
62. Sulashvili N. PECULIARITIES OF PROFESSIONAL AND CAREER IMPROVEMENT STRATEGY FOR PHARMACISTS. [dissertation]. Yerevan: Yerevan State Medical University; 2019.
63. Gabunia L, Khetsuriani S, Gamkrelidze N, Ratiani L, Filipets N, Tsagkari C, et al. Cytokine Storm in COVID-19 infection and its Pharmacologic Modulation. Int J Formal Sci. In Press.
64. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N. Pharmacist's professional features and work gratification. Black Sea Sci J Acad Res. 2016 Mar-Apr; 29(03):62-68.
65. Sulashvili N, Beglaryan M. Pharmacist work satisfaction and career enhancement strategy. Georgian Chem J. 2015; 15(2):151-157.
66. Sulashvili N. The Features of Professional Career Improvement Strategy and Job Satisfaction among Pharmacists. Bus Eng J. 2014; (2):195-199.
67. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Lobjanidze T, et al. The manifestation of the scientific discussion of pharmaceutical education opportunities and specific professional features of the junior pharmacists in Georgia. In: The Book of Full Texts of VII. International Halich Congress on Multidisciplinary Scientific Research. Istanbul: IKSAD Publishing House; 2024. p. 365-380.
68. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Gabunia L, Kvizhinadze N. The specificities of pharmacist occupation and pharmacy arrangement characteristics considered by the patients in Georgia. In: Materials of scientific and practical conference with international participation «Modern aspects of the achievements of fundamental and applied biomedical areas». Kharkiv: Kharkiv National Medical University; 2022. p. 402-405.
69. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Chichoyan N, Gabunia L. The features of pharmacists' professional challenges and regulation trait issues thought-out by the patients. In: The II International Scientific-Practical Internet Conference "Modern Pharmacy -- Science and Practice". Kutaisi: Akaki Tsereteli State University; 2020. p. 147-154.
70. Sulashvili N, Beglaryan M. Pharmacist's professional features, viewed by the customer's eyes in Georgia. Exp Clin Med. 2017; (4):22-25.
71. Sulashvili N. Peculiarities of professional for pharmacists, viewed by the health-care specialists in Georgia. Exp Clin Med. 2017; (4):47-51.
72. Sulashvili N, Beglaryan M. Vocational specifications for junior pharmacists. Caucasus J Health Sci Public Health. 2018 Jun; 2(2):62-73.
73. Sulashvili N, Beglaryan M, Kvizhinadze N. The features of pharmacists' employment adjustment mode and pharmaceutical practice glanced by the manager pharmacists in Georgia. In: Materials of scientific and practical conference with international participation «Modern aspects of the achievements of fundamental and applied biomedical areas». Kharkiv: Kharkiv National Medical University; 2022. p. 297-311.
74. Sulashvili N, Beglaryan M. Drugs dispensers' job adaptation process and pharmaceutical activities viewed by the chief pharmacists. Tbilisi Open Univ Sci J. 2018; (9):196-205.
75. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M, Gabunia L. The manifestation of characteristics of period ontology to general treatment and pharmacotherapy management challenges. In: The III International Scientific and Practical Conference "Modern Pharmacy -- Science and Practice". Kutaisi: Akaki Tsereteli State University; 2023. p. 204-220.
76. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M, Sulashvili M. The manifestation of overall medication of chronic periodontitis diseases by using of plasma flow. In: The Eighth International Scientific-Practical Conference "In Modern Medicine and Health: Prognosis, Achievement and Challenges". Tallinn: Baltic Scientific Journals; 2022. p. 22-23.

77. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M. The scientific discussion of the features of pharmaceutical occupational principles adjustment, challenges, perspectives and innovations in pharmaceutics. In: Conference Book of the First International Conference "Future of Health Care in the 21 Century". Tbilisi: Tbilisi State Medical University; 2021. p. 184-211.
78. Sulashvili N, Beglaryan M. The manifestation of features of the key issue aspects of the role of the pharmacist in ensuring the rational use of medicines. In: Materials of the III Scientific and Practical International Conference "Microbiological and Immunological Research in Modern Medicine". Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2024. p. 48-52.
79. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Gabunia L. The manifestation of features of modern problems of pharmacotherapy of human diseases in general. In: Materials of the VII International Scientific and Practical Conference «Medicines for Humans». Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2024. p. 30-36.
80. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Alavidze N, et al. The manifestations of features of modern pharmacotherapy achievements, problems and improvement of use monoclonal antibodies in medicine. In: Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference "Modern Antimicrobial Therapy: Problems and Ways of Improvement". Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2023. p. 33-38.
81. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M, Gabunia L. The manifestation of features of the key issue aspects of the role of the pharmacist in ensuring the rational use of medicines. In: Microbiological and Immunological Research in Modern Medicine. Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2024. p. 48-52.
82. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Gabunia L. The manifestation of features of modern problems of pharmacotherapy of human diseases in general. In: Medicines for Humans. Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2024. p. 30-36.
83. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Alavidze N, et al. The manifestations of features of modern pharmacotherapy achievements, problems and improvement of use monoclonal antibodies in medicine. In: Modern Antimicrobial Therapy: Problems and Ways of Improvement. Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2023. p. 33-38.
84. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Gabunia L. The manifestation of features of the key issue aspects of the role of the pharmacist in ensuring the rational use of medicines. In: Microbiological and Immunological Research in Modern Medicine. Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2024. p. 48-52.
85. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N. Modern scientific research development issues of higher pharmacy education, science, innovation and perspectives towards on universal pharmacist' profession in medicine and pharmaceutics. Millennium Univ. In Press.
86. Sulashvili N, Beglaryan M, Kvizhinadze N. Occupational particularities and strategy of Pharmacy faculty students. Exp Clin Med. 2018; (3):15-25.
87. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N, Kvizhinadze N. Vocational training and activity of Pharmacists in Georgia. Georgian Med News. 2018; (5(278)):199-206.
88. Sulashvili N, Beglaryan M. The study of factors affecting on population's health improvement. Caucasus J Health Sci Public Health. 2020; 4(Suppl 8):42-45.
89. Sulashvili N, Beglaryan M, Gorgaslidze N. Pharmacist's professional features and work gratification. Black Sea Sci J Acad Res. 2016; 29(03):62-68.
90. Sulashvili N, Gorgaslidze N, Beglaryan M. The scientific discussion of features of clinical pharmacists' and pharmaceutical administration challenges in Georgia in general. In: Modern Antimicrobial Therapy: Problems and Ways of Improvement. Kharkiv: National University of Pharmacy of Ukraine; 2023. p. 20-27.
91. Reeve E, Low LF, Hilmer SN. Deprescribing in older people: a conceptual framework and research agenda. *Maturitas*. 2021;147:36–41. doi:10.1016/j.maturitas.2021.02.005
92. Moriarty F, Bennett K, Fahey T. Deprescribing in older adults with polypharmacy: a systematic review of the association with health outcomes. *J Clin Epidemiol*. 2022;144:56–65. doi:10.1016/j.jclinepi.2021.12.016
93. Rochon PA, Petrovic M, Cherubini A, et al. Polypharmacy, inappropriate prescribing, and deprescribing in older people: a narrative review. *J Intern Med*. 2023;293(1):18–32.
94. Vandenberg AE, Hwang U, Das A, et al. Barriers and facilitators to deprescribing in the acute care setting: a systematic review. *J Am Geriatr Soc*. 2022;70(10):3005–3016. doi:10.1111/jgs.17935
95. Kouladjian O'Donnell L, Gnjidic D, Hilmer SN. Deprescribing in frail older people: a systematic review of the evidence. *Ther Adv Drug Saf*. 2021;12:20420986211043310. doi:10.1177/20420986211043310
96. Seidu S, Kunutsor SK, Topsever P, et al. Polypharmacy in type 2 diabetes: a systematic review of the literature. *Prim Care Diabetes*. 2022;16(4):527–537. doi:10.1016/j.pcd.2022.04.002

97. Lavan AH, O'Mahony D, Gallagher P. STOPP/START criteria for older adults in the emergency department: a systematic review. *Eur J Emerg Med*. 2022;29(2):94–101.
98. McCarthy C, Clyne B, Boland F, et al. GP and pharmacist perspectives on a pharmacist-led medication review service in primary care: a qualitative study. *BJGP Open*. 2021;5(2):BJGP.2020.0169. doi:10.3399/BJGPO.2020.0169
99. Pazan F, Wehling M. Polypharmacy in older adults: a narrative review of definitions, epidemiology and consequences. *Eur Geriatr Med*. 2021;12(3):443–452. doi:10.1007/s41999-021-00479-3
100. Villar-Fernández I, López-López C, Calvo-González A, et al. Pharmacist-led interventions to reduce inappropriate prescribing in older adults: a systematic review of randomized controlled trials. *J Clin Med*. 2021;10(9):1880. doi:10.3390/jcm10091880
101. Briesacher BA, Tjia J, Field T, et al. A randomized trial of a pharmacist-led intervention to reduce potentially inappropriate prescribing in older adults. *J Am Geriatr Soc*. 2021;69(8):2183–2192. doi:10.1111/jgs.17168
102. Jansen J, Naganathan V, Carter SM, et al. A randomized controlled trial of a shared decision-making intervention to reduce polypharmacy in older people. *Br J Clin Pharmacol*. 2022;88(6):2803–2814.
103. Masnoon N, Shakib S, Kalisch-Ellett L, Caughey GE. Tools for assessment of the appropriateness of prescribing and association with patient-related outcomes: a systematic review. *Drugs Aging*. 2018;35(1):43–60. doi:10.1007/s40266-017-0503-5.
104. Dills H, Shah K, Messinger-Rapport B, et al. Deprescribing medications in older adults: a narrative review of the evidence and practical implementation. *Cleve Clin J Med*. 2021;88(3):167–176. doi:10.3949/ccjm.88a.20069.
105. Dreischulte T, van den Bemt B, Steurbaut S, et al. European Society of Clinical Pharmacy definition of the term "clinical pharmacy" and its relationship to pharmaceutical care: a position paper. *Int J Clin Pharm*. 2022;44(4):837–842. doi:10.1007/s11096-022-01422-9
106. Dalton K, Curtin D, O'Mahony D, et al. STOPPFrail: a tool to identify potentially inappropriate prescribing in frail older adults with limited life expectancy. *Eur Geriatr Med*. 2020;11(3):455–462.
107. Ailabouni NJ, Nishtala PS, Mangin D, Tordoff JM. Challenges and enablers of deprescribing: a general practitioner perspective. *PLoS One*. 2016;11(4):e0151066.
108. Reeve E, To J, Hendrix I, et al. Patient barriers to and enablers of deprescribing: a systematic review. *Drugs Aging*. 2013;30(10):793–807. doi:10.1007/s40266-013-0106-8
109. Doherty AJ, Boland P, Reed J, et al. Barriers and facilitators to deprescribing in primary care: a systematic review and meta-ethnography. *BJGP Open*. 2021;5(3):BJGP.2020.0189.
110. Linsky A, Gellad WF, Linder JA, Friedberg MW. Advancing the science of deprescribing: a novel comprehensive shared decision-making framework. *J Am Geriatr Soc*. 2021;69(5):1152–1157. doi:10.1111/jgs.17084.
111. Wright DJ, Hill J, Blacklock J, et al. A systematic review of the effectiveness of pharmacist-led interventions to reduce polypharmacy in older patients in primary care. *Int J Pharm Pract*. 2022;30(6):497–507. doi:10.1093/ijpp/riac068.

INFLUENCE OF STUDENTS' POOR CLINICAL PERFORMANCE ON PATIENT MORTALITY IN HOSPITALS: THE WAY FORWARD – A CASE STUDY OF NIGER STATE SCHOOL OF NURSING, BIDA

BY

KOLO SHESHI AND GANA MOHAMMED

NIGER STATE COLLEGE OF NURSING SCIECE SCHOOL OF NURSING AND MIDWIFERY BIDA.

Abstract

Clinical education remains a fundamental component of nursing education because it equips students with practical competencies required for effective healthcare delivery. However, poor clinical performance among nursing students has increasingly become a concern due to its potential implications for patient safety and quality of care. This study examined the influence of students' poor clinical performance on patient mortality in hospitals, using Niger State School of Nursing, Bida as a case study. The objectives of the study were to identify factors responsible for poor clinical performance among nursing students, examine the extent to which clinical performance influences patient outcomes, determine institutional and supervisory challenges affecting students' competence, and propose strategies for improving clinical education and reducing preventable mortality. The study adopted a descriptive survey research design. The target population comprised nursing students, clinical instructors, and healthcare professionals involved in students' clinical training. Data were expected to be collected using structured questionnaires and interviews and analysed using descriptive and inferential statistics. Findings from previous empirical evidence indicate that inadequate supervision, insufficient practical exposure, limited access to clinical facilities, poor student preparedness, and ineffective instructional strategies contribute significantly to weak clinical performance. These deficiencies may indirectly influence adverse patient outcomes through increased medical errors, delayed interventions, and compromised quality of care. The study recommends strengthening clinical supervision, improving simulation-based training, increasing practical learning opportunities, and enhancing collaboration between nursing schools and healthcare institutions.

Keywords: Clinical performance, Nursing students, Patient mortality, Clinical education, Healthcare quality.

Introduction

Healthcare systems across the world depend significantly on competent healthcare professionals to ensure quality patient outcomes and reduction in preventable mortality. Nursing education occupies a strategic position in preparing students with both theoretical understanding and practical clinical competence required to deliver safe and effective healthcare services. Clinical performance serves as one of the major indicators of nursing students' readiness to participate in patient care activities within healthcare facilities.

Clinical training enables nursing students to translate classroom knowledge into real-life healthcare practice. Through supervised clinical experiences, students acquire skills in patient assessment, diagnosis support, communication, medication administration, documentation, and professional ethics. Effective clinical performance therefore contributes to improved healthcare delivery and positive patient outcomes. Despite advances in nursing education, concerns continue to emerge regarding the preparedness of students entering clinical environments. Reports from healthcare institutions indicate that deficiencies in clinical competence may result in procedural mistakes, delayed decision-making, inadequate patient monitoring, and reduced quality of healthcare services. Such weaknesses may indirectly contribute to adverse patient outcomes when appropriate supervision and institutional support mechanisms are lacking.

Patient mortality remains an important healthcare quality indicator used globally to evaluate the

effectiveness and safety of healthcare delivery systems. Although mortality in hospitals is influenced by multiple factors including disease severity, availability of medical equipment, staffing patterns, institutional policies, and broader health system conditions, clinical competence of healthcare personnel and trainees constitutes one important component of safe patient care. Within nursing education, student clinical performance may be affected by numerous factors including inadequate clinical exposure, poor learning environments, insufficient supervision, shortage of training materials, anxiety during clinical posting, ineffective instructional approaches, and weak collaboration between educational institutions and healthcare facilities. These challenges may limit students' confidence and competence during patient interactions.

In Nigeria, nursing institutions continue to experience challenges associated with increasing enrolment, pressure on available teaching hospitals, limited practical resources, and variations in clinical mentoring practices. These conditions may affect the quality of students' practical experiences and ultimately influence competence development. Consequently, understanding the relationship between students' clinical performance and patient outcomes becomes necessary for educational improvement and healthcare policy development.

Niger State School of Nursing, Bida serves as an appropriate setting for examining these concerns because students undergo extensive practical placement within healthcare centres where theoretical learning is expected to translate into competent patient care. Investigating factors associated with poor clinical performance may provide evidence for strengthening training processes and improving healthcare delivery.

Statement of the Problem

Clinical competence among nursing students remains an important determinant of effective healthcare delivery. However, observations across clinical settings suggest that some students encounter difficulties in applying theoretical knowledge to patient care activities. Challenges such as inadequate supervision, limited exposure to practical procedures, insufficient learning facilities, and poor preparation may affect students' performance during clinical placement.

Where clinical weaknesses are not identified and addressed early, healthcare systems may experience increased clinical errors, compromised patient safety, and poor patient outcomes. While patient mortality cannot be attributed solely to students' performance, understanding how educational and clinical training factors contribute to healthcare quality remains necessary.

This study therefore seeks to examine the influence of students' poor clinical performance on patient mortality in hospitals and identify strategies for strengthening nursing education and reducing adverse patient outcomes.

Purpose of Study

The purpose of this study is to:

i. Identify factors responsible for poor clinical performance among nursing students.

ii. Examine the influence of students' clinical performance on patient outcomes.

iii. Determine challenges affecting effective clinical training.

iv. Assess the role of supervision in improving students' competence.

v. Propose strategies for reducing preventable patient mortality.

Research Questions

The following research questions were formulated to guide the study:

i. What factors contribute to poor clinical performance among nursing students?

ii. To what extent does students' clinical performance influence patient outcomes?

iii. What challenges affect clinical training effectiveness?

iv. How does supervision improve students' clinical competence?

v. What measures can reduce preventable patient mortality?

RESEARCH HYPOTHESES

The following null Hypothesis were tested at .05 level of Significance

H_{01}: There is no significant relationship between students' clinical performance and patient outcomes.

H_{02}: Clinical supervision has no significant influence on students' clinical competence.

H_{03}: Availability of clinical resources does not significantly influence students' performance.

Relationship between Students' Clinical Performance and Patient Outcomes

Patient outcomes are influenced by multiple interacting variables including staffing levels, clinical infrastructure, institutional support, disease severity, and competence of healthcare providers. Studies have shown that clinical competence among nursing personnel contributes positively to patient safety indicators and overall quality of care (Aiken et al., 2018). Clinical education therefore represents an important preventive strategy.

Poor clinical performance may manifest through:

- Inaccurate patient assessment
- Medication administration errors
- Delayed response to patient deterioration
- Poor infection prevention practices
- Incomplete clinical documentation
- Weak communication with healthcare teams

Factors Responsible for Poor Clinical Performance among Nursing Students

Several factors have been identified in literature as contributors to poor clinical performance.

Inadequate Clinical Supervision

Clinical supervision provides guidance, monitoring, feedback, and corrective instruction during practical learning.

Oermann and Gaberson (2021) explained that inadequate supervision limits opportunities for competency development and increases uncertainty during patient care activities.

Limited Practical Exposure

Exposure to real healthcare environments allows students to develop procedural confidence and clinical judgment.

Papastavrou et al. (2016) observed that students who experience limited patient interaction demonstrate lower practical competence.

Anxiety and Psychological Pressure

Clinical learning environments may create stress due to fear of mistakes and evaluation. Labrague et al. (2018) reported that anxiety negatively influences concentration, communication, and clinical decision-making.

Inadequate Learning Resources

Availability of simulation laboratories, modern equipment, instructional materials, and clinical tools contributes significantly to competence development.

Insufficient educational resources reduce opportunities for repeated practice and mastery.

Weak School–Hospital Collaboration

Effective partnerships between educational institutions and hospitals strengthen student mentoring and practical learning experiences.

Poor coordination may lead to inconsistencies in training expectations and reduced educational outcomes.

Research Design

This study adopted a descriptive survey research design of the correlational type.

The descriptive survey design was considered appropriate because it enables the researcher to obtain data from a relatively large population and describe existing conditions without manipulating variables. The correlational approach was selected to examine relationships between students' clinical performance and patient-related outcomes within hospital settings. The design also permits collection of perceptions from nursing students, clinical instructors, and healthcare personnel regarding factors associated with poor clinical performance and implications for healthcare delivery.

Area of the Study

The study was conducted at Niger State School of Nursing, Bida, Niger State, Nigeria.

The institution serves as one of the nursing training centres responsible for preparing students for professional nursing practice through classroom instruction and supervised clinical placements in affiliated hospitals and healthcare facilities.

The study area was selected because of the institution's active involvement in clinical training and its relevance to examining nursing students' practical competence and healthcare outcomes.

Population of the Study

The population of the study comprised all nursing students undergoing clinical training at Niger State School of Nursing, Bida, clinical instructors, and selected healthcare professionals directly involved in supervising students during clinical practice.

The target population included:

i. Student nurses in clinical levels

ii. Clinical instructors

iii. Nurse supervisors and healthcare professionals

The exact population figures should be obtained from official institutional records at the time of data collection.

Sample Size and Sampling Technique

A representative sample shall be selected from the target population.

The sample size may be determined using an appropriate sampling formula such as Taro Yamane's formula where applicable:

$n = N / (1 + N(e^2))$ Where:

n = Sample size

N = Population size

e = Level of significance (0.05)

A multistage sampling technique shall be adopted.

Stage 1: Stratified sampling to classify participants into students, instructors, and healthcare professionals.

Stage 2: Simple random sampling to select respondents proportionately from each category. This approach ensures fair representation and improves generalizability of findings.

Procedure for Data Collection

An introductory letter shall be obtained from the relevant institutional authority before data collection.

Permission shall be sought from management of the institution and participating hospitals. Questionnaires shall be administered directly to respondents by the researcher and trained research assistants.

Participants shall be informed of the purpose of the study and allowed sufficient time to complete the instrument.

Completed questionnaires shall be collected immediately to improve response rate.

Method of Data Analysis

Data collected shall be coded and analysed using Statistical Package for Social Sciences (SPSS).

Research Questions:

Mean and standard deviation shall be used to answer the research questions. Decision Rule:

Mean score ≥ 3.00 = Accepted Mean score < 3.00 = Rejected Research Hypotheses:

Inferential statistics shall be employed at 0.05 level of significance. The following tests shall be applied:

H_{01} – Pearson Product Moment Correlation H_{02} – Multiple Regression Analysis

H_{03} – Independent Samples t-test

Results shall be presented using tables and interpretations.

Ethical Considerations

Ethical approval shall be obtained from the appropriate ethics review authority before commencement of the study.

Participants shall provide informed consent before participation.

Confidentiality and anonymity shall be maintained throughout the research process. Participation shall remain voluntary and respondents shall have the right to withdraw at any stage without consequences.

No identifying information shall be disclosed.

Summary of Methodology

This chapter presented the research methodology adopted for the study. The study employed a descriptive survey design of the correlational type involving nursing students, instructors, and healthcare personnel. Data collection procedures, validity and reliability measures, analytical techniques, and ethical safeguards were outlined to ensure scientific credibility and trustworthy findings.

Empirical Review

Several studies have investigated determinants of nursing students' clinical competence. Labrague et al. (2019) examined predictors of clinical competence among nursing students and found that confidence, mentoring quality, and institutional support significantly improved performance.

Papastavrou et al. (2016) investigated learning environments and reported that supportive clinical environments positively influenced students' satisfaction and practical competence.

Sulosaari et al. (2015) found significant associations between medication competence and patient safety outcomes among nursing trainees.

Aiken et al. (2018) demonstrated that improved nursing competence and staffing structures contributed to lower adverse patient outcomes.

Although previous studies explored competence and patient safety, limited evidence exists focusing specifically on nursing students within Niger State healthcare training environments. **NOTE:** The tables below are journal templates and should be replaced with actual field data after data collection.

4.2 Demographic Characteristics of Respondents Table 4.1 Distribution of Respondents by Category

Variable	Frequency	Percentage
Student Nurses	XX	XX
Clinical Instructors	XX	XX
Healthcare Personnel	XX	XX
Total	XXX	100

Interpretation

The demographic distribution provides information regarding categories of respondents involved in the study and supports representativeness of findings.

Research Question One

What factors contribute to poor clinical performance among nursing students?

Table 4.2 Mean Responses on Factors Responsible for Poor Clinical Performance

Items	Mean	SD	Decision
Inadequate supervision	X.XX	X.XX	Accept/Reject
Limited practical exposure	X.XX	X.XX	Accept/Reject
Anxiety during clinical placement	X.XX	X.XX	Accept/Reject
Inadequate learning facilities	X.XX	X.XX	Accept/Reject
Weak hospital–school collaboration	X.XX	X.XX	Accept/Reject

Grand Mean = X.XX Interpretation

Items with mean values equal to or greater than 3.00 shall be accepted as contributing factors to poor clinical performance.

Research Question Two

To what extent does students' clinical performance influence patient outcomes?

Table 4.3 Clinical Performance and Patient Outcome Indicators

Variable	Mean	SD	Decision
Accuracy in patient care	X.XX	X.XX	Accept
Timeliness of intervention	X.XX	X.XX	Accept
Medication administration practices	X.XX	X.XX	Accept
Communication effectiveness	X.XX	X.XX	Accept

Interpretation

Results are expected to indicate whether deficiencies in clinical competence are associated with lower healthcare quality indicators.

Research Question Three

What challenges affect effective clinical training?

Table 4.4 Challenges Affecting Clinical Training

Variable	Mean	SD	Decision
Insufficient clinical equipment	X.XX	X.XX	Accept
Limited patient interaction	X.XX	X.XX	Accept
Inadequate instructor support	X.XX	X.XX	Accept
High student population	X.XX	X.XX	Accept

Interpretation

Responses will determine the major barriers affecting nursing students' practical competence.

Hypotheses Testing Hypothesis One

H_{01}: There is no significant relationship between students' clinical performance and patient outcomes.

Table 4.5 Pearson Correlation Analysis

Variable	r-value	p-value	Decision
Clinical Performance vs patient outcome	X.XX	X.XX	Accept/Reject

Decision Rule

Reject H_{01} if $p < 0.05$

Interpretation:

Where the null hypothesis is rejected, findings suggest a statistically significant relationship between students' clinical competence and healthcare outcomes.

Hypothesis Two

H_{02}: Clinical supervision has no significant influence on students' clinical competence.

Table 4.6 Regression Analysis

Variable	Beta	r-value	p-value
Clinical Supervision	X.XX	X.XX	X.XX

Decision:

Reject H02 if $p < 0.05$.

Interpretation

Significant outcomes imply that effective supervision improves competence development.

Hypothesis Three

H_{03}: Availability of clinical resources does not significantly influence students' performance.

Table 4.7 Independent Sample t-test

Variable	t-value	p-value	Decision
Clinical Resources	X.XX	X.XX	Accept/Reject

Interpretation:

Results determine whether availability of educational resources significantly affects clinical performance.

Discussion of Findings

The findings of this study are expected to show that multiple factors influence students' poor clinical performance and may indirectly affect healthcare quality and patient outcomes.

Findings relating to inadequate supervision support previous studies which emphasized that close mentoring and guided practice improve nursing competence and reduce clinical errors. Results concerning practical exposure align with earlier evidence that repeated engagement in patient care activities strengthens clinical confidence and professional decision-making.

The study further supports literature suggesting that poor clinical performance should not be interpreted as a direct independent cause of patient mortality. Rather, patient outcomes emerge from interactions among institutional systems, staffing conditions, supervision quality, patient complexity, and healthcare infrastructure.

The findings are also expected to reveal that improved collaboration between nursing schools and hospitals contributes positively to clinical learning outcomes.

Conclusion

The study concludes that students' clinical performance remains an important component of healthcare quality and patient safety.

Poor performance among nursing students may emerge from inadequate supervision, insufficient practical exposure, weak institutional support, and limited learning resources.

Although patient mortality cannot be attributed solely to students' competence, strengthening nursing education and clinical training may contribute to improved healthcare outcomes and reduction in preventable adverse events.

Recommendations

Based on the findings, the study recommends:

- Nursing institutions should strengthen supervision during clinical placement.
- Hospitals should provide structured mentorship programmes for student nurses.
- Simulation laboratories and practical learning facilities should be improved.
- Student–instructor ratios should be reviewed to improve monitoring.
- Continuous clinical competency assessment should be introduced.
- Collaboration between nursing schools and healthcare institutions should be strengthened.
- Regular professional development programmes should be organized for clinical instructors.

References

Aiken, L. H., Sloane, D., Griffiths, P., Rafferty, A. M., Bruyneel, L., McHugh, M., & Sermeus, W. (2018). Nursing skill mix in European hospitals and associations with mortality, patient ratings, and quality of care. International Journal of Nursing Studies, 63, 12–24.

Benner, P. (1984). From novice to expert: Excellence and power in clinical nursing practice.

Addison-Wesley.

Labrague, L. J., McEnroe-Petitte, D., Papathanasiou, I., Edet, O., Arulappan, J., Tsaras, K., & Leocadio, M. (2018). Stress and coping strategies among nursing students. Journal of Mental Health, 27(5), 471–477.

Labrague, L. J., McEnroe-Petitte, D., Tsaras, K., Cruz, J. P., Colet, P., & Gloe, D. (2019). Predictors of nursing students' clinical competence. Nursing Forum, 54(4), 521–527.

Oermann, M. H., & Gaberson, K. B. (2021). Evaluation and testing in nursing education (6th ed.). Springer Publishing.

Papastavrou, E., Dimitriadou, M., Tsangari, H., & Andreou, C. (2016). Nursing students' satisfaction with the clinical learning environment. BMC Nursing, 15(44), 1–10. Springer Publishing

Sulosaari, V., Kajander, S., Hupli, M., Huupponen, R., Leino-Kilpi, H., & Puukka, P. (2015). Medication competence and patient safety among nursing students. Nurse Education Today, 35(3), 421–427.

World Health Organization Publications Page

World Health Organization. (2021). Global patient safety action plan 2021–2030: Towards

eliminating avoidable harm in health care. World Health Organization. World Health Organization. (2023). Patient safety. World Health Organization.

FOREIGN RURAL LAND ACQUISITION IN BRAZIL: CONSTITUTIONAL SOVEREIGNTY, FOOD SECURITY, AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Deilton RIBEIRO BRASIL[1]
University of Itaúna (UIT)

ABSTRACT:

The general objective of this paper is to analyze how the Brazilian Supreme Federal Court reconciled constitutional sovereignty with property rights and freedom of enterprise when adjudicating the Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept (ADPF) No. 342/DF and Original Civil Action (ACO) No. 2,463/DF. Its specific objective is to examine whether Article 1, paragraph 1, of Law No. 5,709/1971, as applied to Brazilian companies controlled by foreign capital, constitutes a constitutionally legitimate mechanism for preventing indirect territorial control and addressing land grabbing, food security, and environmental protection. The research problem asks whether restrictions based on foreign corporate control are compatible with equality, legal certainty, economic freedom, and the right to property under the 1988 Federal Constitution. The research hypothesis holds that this differentiation is constitutionally admissible because Articles 1, 170, 172, and 190 authorize proportionate limitations protecting national sovereignty, the social and environmental functions of rural property, and strategic national interests. The study adopts the hypothetical-deductive method. Its methodological procedures comprise bibliographic and documentary research, qualitative legislative analysis, and critical jurisprudential examination of the opinions issued in both cases. Preliminary results indicate that the Supreme Federal Court treated the repeal of Article 171 as a deconstitutionalization of the subject rather than a prohibition against distinctions based on foreign corporate control. The judgment upheld Law No. 5,709/1971, invalidated the São Paulo administrative opinion that disregarded its restrictions, and reaffirmed the authorization powers of the Federal Government and the National Institute for Colonization and Agrarian Reform (INCRA). It also reveals the need to modernize the statutory framework to address contemporary indirect forms of land control while ensuring administrative efficiency and legal predictability.

KEYWORDS: Foreign acquisition of rural land; Constitutional sovereignty; Land grabbing; Food security; Environmental protection.

TABLE OF CONTENTS: 1. Introduction. 2. The Agrarian and Constitutional Framework Governing Foreign Acquisition of Rural Land in Brazil. 3. Constitutional Sovereignty and Foreign Corporate Control of Rural Land: The Brazilian Supreme Federal Court's Ruling in ADPF No. 342/DF and ACO No. 2,463/DF. 4. Concluding remarks. 5. Bibliography.

1. INTRODUCTION.

Rural land cannot be understood exclusively as an object of private ownership or economic exchange. It constitutes a strategic resource directly connected to food production, biodiversity protection, water availability, climate stability, territorial organization, and the living conditions of rural and traditional

1 Post Doctoral studies in Law at University of Coimbra (UC), Portugal and Università Degli Studi di Messina (UNIME), Italy. PhD in Law from Gama Filho University, Rio de Janeiro (RJ). Professor in the Bachelor's Law Course, Master's and Doctoral Programs in the Protection of Fundamental Rights at University of Itaúna (UIT), Brazil, South America. Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7268-8009.

communities. In a global context marked by environmental, food, energy, and financial crises, the acquisition of extensive rural areas by foreign investors has therefore assumed increasing economic, constitutional, and geopolitical relevance. This phenomenon becomes particularly complex when territorial control is exercised indirectly through corporate structures, long-term contracts, financial arrangements, or Brazilian companies controlled by foreign capital.

The expansion of these mechanisms is associated with the contemporary phenomenon known as land grabbing, understood as the large-scale acquisition or control of land capable of affecting local communities, agricultural production, access to natural resources, and national development policies. Although foreign investment may contribute to economic growth, technological development, employment, and agricultural modernization, its unregulated expansion may also intensify land concentration, speculative practices, environmental degradation, and the displacement of vulnerable populations. The regulation of foreign access to rural property must consequently reconcile economic openness with constitutional sovereignty, food security, environmental protection, and the social purposes assigned to rural land.

The Brazilian legal treatment of rural property is based on a normative tradition that predates the Federal Constitution of 1988. The Federal Law No. 4,504/1964, known as the Land Statute, established fundamental principles governing agrarian reform, agricultural policy, and the rights and obligations associated with rural property. The Article 2 guarantees the opportunity of access to land ownership but expressly conditions its exercise on compliance with the social function of property. Under this provision, rural property fully performs its social function only when it simultaneously promotes the well-being of owners and workers, maintains satisfactory levels of productivity, ensures the conservation of natural resources, and observes the legal rules governing fair labor relations (Brazil, 1964).

By connecting productivity with social justice, labor protection, collective well-being, and the conservation of natural resources, the Land Statute rejected an exclusively individualistic and patrimonial conception of rural ownership. It established that the legitimacy of rural property depends not only on the formal existence of title but also on the manner in which land is used and on the social, economic, and environmental consequences of that use. This normative foundation is relevant to the regulation of foreign land acquisition because Federal Law No. 5,709/1971 was enacted within an agrarian legal system in which public authorities were already responsible for supervising land use in accordance with broader national interests.

The Federal Constitution of 1988 expanded and constitutionalized this functional conception of property. While the Article 5, item XXII, guarantees the right to property, item XXIII provides that property must fulfill its social function. Enclosed by the economic order, the Article 170 protects private property while simultaneously establishing the social function of property and environmental protection as guiding principles. Article 184 authorizes expropriation for agrarian reform when rural property fails to fulfill its social function, whereas Article 186 determines that this function requires rational and adequate use, appropriate utilization of available natural resources, environmental preservation, compliance with labor regulations, and exploitation that promotes the well-being of owners and workers. Article 225 complements this framework by recognizing the right of present and future generations to an ecologically balanced environment (Brazil, 1988).

The constitutional regulation of rural property must also be interpreted in connection with national sovereignty and foreign investment. Sovereignty constitutes both a foundation of the Brazilian Federal Republic under Article 1 and a principle of the economic order under the Article 170. The Article 172 authorizes legislation to regulate foreign capital according to the national interest, while Article 190 expressly determines that the acquisition or lease of rural property by foreign individuals or legal entities must be regulated and limited by law. Accordingly, the Federal Constitution of 1988 does not treat rural land only as a marketable asset. It places its acquisition and use within an integrated normative framework composed of property rights, social justice, environmental protection, agrarian policy, economic development, and national sovereignty.

Bounded by this constitutional and agrarian framework, the Article 1, paragraph 1, of Federal Law No. 5,709/1971 subjects Brazilian companies whose capital is predominantly held by foreign individuals or legal entities residing or headquartered abroad to the legal regime applicable to foreign companies. The provision does not impose an absolute prohibition on the acquisition of rural property. Instead, it establishes conditions, territorial limits, registration requirements, and, in certain circumstances, prior authorization from the competent public authorities. Nevertheless, the repeal of Article 171 of the Federal Constitution of 1988 by Constitutional Amendment No. 6/1995 generated a prolonged controversy over whether Brazilian companies could continue to receive different legal treatment according to the foreign origin of their controlling capital.

This controversy was examined jointly by the Brazilian Supreme Federal Court in the Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept (ADPF) No. 342/DF and Original Civil Action (ACO) No. 2,463/DF. In ADPF No. 342/DF, the Brazilian Rural Society argued that Article 1, paragraph 1, of Federal Law No. 5,709/1971 had not been received by the Federal Constitution of 1988 and violated equality, legal certainty, freedom of association, freedom of enterprise, economic development, and the right to property. In ACO No. 2,463/DF, the Federal Government and the National Institute for Colonization and Agrarian Reform (INCRA) challenged an administrative opinion issued by the General Inspectorate of Justice of the State of São Paulo that exempted registry offices from applying those statutory restrictions to Brazilian companies controlled by foreign capital.

On April 23, 2026, the Brazilian Supreme Federal Court rejected ADPF No. 342/DF and recognized that the Article 1, paragraph 1, of Federal Law No. 5,709/1971 had been received by the Federal Constitution of 1988. In ACO No. 2,463/DF, the Supreme Federal Court invalidated the São Paulo administrative opinion and reaffirmed the authority of the Federal Government and INCRA to examine the acquisition of rural properties by foreign legal entities and equivalent Brazilian companies. The Supreme Federal Court interpreted the repeal of Article 171 as a deconstitutionalization of the subject that broadened the legislature's regulatory discretion rather than establishing a constitutional prohibition against distinctions based on foreign corporate control.

The relevance of the judgment extends beyond the formal nationality of companies and the technical requirements governing real estate transactions. It concerns the extent to which the State may supervise the economic and territorial control of rural land to protect agricultural production, natural resources, vulnerable communities, environmental integrity, and national decision-making autonomy. The decision also provides an opportunity to examine whether legislation enacted in 1971 remains capable of addressing contemporary forms of indirect control associated with land grabbing, financialization, complex corporate arrangements, and transnational investment structures.

Under these circumstances, the general objective of this paper is to analyze how the Brazilian Supreme Federal Court reconciled constitutional sovereignty with property rights and freedom of enterprise when adjudicating the foreign acquisition of rural land. Its specific objective is to determine whether the application of Federal Law No. 5,709/1971 to Brazilian companies controlled by foreign capital constitutes a constitutionally legitimate mechanism for preventing indirect territorial control and addressing the risks associated with land grabbing, food insecurity, and environmental degradation.

The research problem may be formulated as follows: to what extent are legal restrictions based on the foreign origin of corporate control compatible with equality, legal certainty, freedom of enterprise, and the right to property under the Federal Constitution of 1988, considering the social and environmental functions attributed to rural land by the Federal Law No. 4,504/1964 (Land Statute) and the constitutional order? The research hypothesis maintains that this differential treatment is constitutionally admissible because the Articles 1, 170, 172, 186, 190, and 225 authorize proportionate restrictions intended to protect national sovereignty, the social and environmental functions of rural property, food security, and other strategic national interests. This hypothesis does not imply that every restriction on foreign capital is automatically legitimate, but rather that differentiation may be constitutionally justified when it is suitable, necessary, and proportionate to the objectives pursued.

The research adopts the hypothetical-deductive method, beginning with the formulated hypothesis and testing its consistency against the agrarian and constitutional framework, the applicable legislation,

and the reasoning developed by the Brazilian Supreme Federal Court. The methodological procedures comprise bibliographic and documentary research, qualitative analysis of Federal Laws Nos. 4,504/1964 and 5,709/1971, systematic interpretation of the Federal Constitution of 1988, and critical jurisprudential examination of the opinions issued in ADPF No. 342/DF and ACO No. 2,463/DF. The analysis considers not only the formal ownership of rural land but also the contemporary mechanisms through which foreign investors may exercise substantial economic or territorial control.

The preliminary results achieved indicate that the Brazilian Supreme Federal Court regarded rural property as a constitutionally sensitive resource whose regulation extends beyond private economic interests. The judgment is consistent with the normative development initiated by the Federal Law No. 4,504/1964 (Land Statute) and reinforced by the Federal Constitution of 1988, according to which rural ownership is inseparable from social justice, productive use, labor protection, environmental conservation, and collective well-being. The Supreme Federal Court also recognized that the nationality of corporate control may constitute a legitimate criterion of differentiation when connected to sovereignty, food production, environmental protection, and the prevention of circumvention of statutory restrictions. At the same time, the decision demonstrates that the constitutional reception of Federal Law No. 5,709/1971 does not eliminate the need to modernize its regulatory framework to address indirect forms of land control while ensuring administrative efficiency, proportionality, and legal predictability.

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. THE AGRARIAN AND CONSTITUTIONAL FRAMEWORK GOVERNING FOREIGN ACQUISITION OF RURAL LAND IN BRAZIL.

The legal status of rural land in Brazil lies at the intersection of property rights, territorial organization, agricultural policy, environmental protection, and national sovereignty. Bercovici (2025, pp. 377-379) argues that a strong agricultural production chain is essential to food security and food sovereignty, economic sovereignty, and the development of the domestic market. From this perspective, agricultural regulation concerns portions of the national territory assigned to agrarian purposes and therefore possesses a public and spatial dimension. Although rural land remains susceptible to private ownership, its exploitation is subject to the State's constitutional authority to plan, regulate, and supervise the use of national territory. This approach is reflected in Original Civil Action (ACO) No. 2,463/DF, in which the Brazilian Supreme Federal Court (2026b, p. 52) emphasized that the Article 190 of the Federal Constitution of 1988 expressly authorizes the legislature to regulate and limit the acquisition and use of rural property by foreigners (Brazil, 1988).

The territorial interpretation proposed by Bercovici (2025, p. 378) must, however, be read together with Oliveira's (2010, p. 103) warning that the Brazilian agrarian problem cannot be reduced to the nationality of landowners. Federal Law No. 4,504/1964, known as the Land Statute, guarantees the opportunity of access to land ownership and conditions its exercise on compliance with the social function of property. This function is fulfilled when rural property simultaneously maintains satisfactory levels of productivity, promotes the well-being of owners and workers, observes fair labor relations, and ensures the conservation of natural resources (Brazil, 1964). Bercovici (2025, p. 378) connects the social function of property to a political dimension, insofar as property is subject to State action over space and to territorial control as a component of national sovereignty. Oliveira (2010, p. 103), in turn, contends that the debate over capitalist landownership - whether the land belongs to Brazilians or foreigners - must be conducted under the legal and constitutional principle of the social function of land. Read together, these perspectives prevent sovereignty from becoming an exclusively

nationality-based argument and redirect the analysis toward land concentration, the purposes for which rural property is used, and its consequences for agrarian reform, social justice, and the appropriation of public lands.

The Brazilian Federal Constitution of 1988 strengthened this functional conception of rural ownership. The Article 5, item XXII, guarantees the right to property, whereas item XXIII requires property to fulfill its social function. The Articles 170, 184, and 186 integrate rural property into the constitutional economic order and condition legitimate exploitation on rational and adequate use, environmental preservation, compliance with labor regulations, and the well-being of owners and workers. The Article 225 adds an autonomous environmental dimension by recognizing the right of present and future generations to an ecologically balanced environment (Brazil, 1988). Brasil (2023, pp. 14-15) maintains that the Article 225 provides an interpretive orientation for the entire infra-constitutional legal order and imposes protective duties on both public authorities and the community. Accordingly, rural property cannot be regulated exclusively through the categories of productivity, title, or nationality; its legal treatment must also consider biodiversity, water resources, ecological integrity, climate stability, and intergenerational justice.

Read together, these contributions reveal complementary dimensions of the same constitutional problem. Bercovici (2025, p. 378) stresses that State control over national territory constitutes an essential component of sovereignty. Oliveira (2010, pp. 43-44, 103) demonstrates that territorial control must also be examined in light of the large-scale concentration and appropriation of land and natural resources, as well as the social function of land, regardless of the nationality of its owners. Brasil (2023, pp. 12-15), in order, provides an environmental framework based on the principles of prevention and precaution and on the constitutional protection of present and future generations, enabling an assessment of the environmental consequences of rural land use. This theoretical convergence is visible in the judgment of the Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept (ADPF) No. 342/DF. In its summary of the grounds for the decision, the Brazilian Supreme Federal Court expressly recognized that foreign acquisition of rural property may produce political, social, economic, food-related, and environmental impacts, thereby justifying the conditions and limits established by Federal Law No. 5,709/1971 (Brazilian Supreme Federal Court, 2026a, p. 3; Brazil, 1971).

Foreign investment in rural land nevertheless presents an important normative ambivalence. Bercovici (2025, p. 380) acknowledges that large-scale acquisitions by foreign investors may contribute to the formation of a rural labor market, employment creation, the protection of workers' rights, and environmental sustainability, particularly when the objectives of land exploitation are directed by the State through its agricultural and extractive policies. At the same time, such acquisitions may produce the denationalization and disaggregation of territory when land occupation and exploitation become disconnected from national interests. This qualified position avoids both the unconditional liberalization of land markets and the assumption that every foreign investment necessarily threatens national sovereignty. Based on this analysis, the relevant constitutional question is whether the State possesses adequate institutions to direct foreign investment toward legitimate national objectives while preventing territorial disaggregation, large-scale appropriation, and land uses disconnected from the public interest Oliveira's (2010, pp. 43-44) analysis broadens this discussion by demonstrating that land grabbing cannot be reduced to the formal purchase of rural property. The phenomenon encompasses the large-scale appropriation and concentration of land and natural resources, thereby exceeding the conventional operation of a land market based solely on the purchase and sale of rural property. Bercovici (2025, pp. 380-381) reaches a compatible conclusion by defining land grabbing as the appropriation of extensive areas of land and observing that its spatial dimension, purposes, actors, and specific modes of appropriation remain contested in the specialized literature. He also highlights the paradox between restricting direct foreign acquisition and simultaneously encouraging indirect foreign control, as well as the absence of reliable data concerning the amount of Brazilian land effectively controlled by foreign investors. Taken together, the analyses of Oliveira (2010, pp. 43-44) and Bercovici (2025, p. 381) indicate that formal corporate nationality may be legally relevant but remains insufficient to reveal indirect foreign control and the actual territorial effects of an investment.

The Federal Law No. 5,709/1971 was enacted to regulate the acquisition of rural property by foreign individuals residing in Brazil and foreign legal entities authorized to operate in the country. Rather than imposing an absolute prohibition, the statute establishes area limits, public-deed and registration requirements, reporting obligations, and prior administrative authorization in specified circumstances (Brazil, 1971). Oliveira (2010, pp. 16-18) examines the historical origins of the statute and demonstrates that it combined restrictions with exceptions that permitted foreign acquisitions connected to projects considered relevant to national development. Bercovici (2025, p. 383) similarly explains that Federal Law No. 5,709/1971 was intended to prevent public authorities from losing control over the process of rural land acquisition and to organize territorial occupation, rather than completely exclude foreign capital. The restrictions applicable to acquisition were subsequently extended to rural leases by Article 23 of Federal Law No. 8,629/1993 (Brazil, 1993; Bercovici, 2025, p. 384). The authors therefore converge on the characterization of this legislation as a model of regulated and conditional access, although Oliveira (2010, pp. 16-18) adopts a more critical position regarding the historical effectiveness of its limits, exceptions, and possibilities of circumvention.

The most controversial provision is the Article 1, paragraph 1, of Federal Law No. 5,709/1971, which subjects Brazilian legal entities in which foreign individuals or legal entities residing or headquartered abroad hold the majority of the corporate capital to the regulatory regime established by the statute (Brazil, 1971). Bercovici (2025, p. 384) describes the scope of this statutory equivalence and argues that the reception of Federal Law No. 5,709/1971 by the constitutional order is further confirmed by post-1988 agrarian legislation, particularly Federal Law No. 8,629/1993. Oliveira (2010, p. 18), consecutively, examines the successive administrative interpretations adopted after Constitutional Amendment No. 6/1995. He explains that the interpretation based on the alleged inapplicability of Article 1, paragraph 1, exempted Brazilian companies with foreign participation from requesting authorization to acquire rural property. This position remained in effect until 2010, when a new federal administrative interpretation reestablished the supervision of such transactions by the National Institute for Colonization and Agrarian Reform (INCRA).

Bercovici's (2025, pp. 385-386) interpretation clarifies the constitutional effects of the repeal of Article 171 by Constitutional Amendment No. 6/1995. In his view, the amendment eliminated the constitutional obligation to distinguish between Brazilian companies and Brazilian companies with national capital, but it did not prevent ordinary legislation from establishing such distinctions, provided that they remain compatible with the Constitution. The Brazilian Supreme Federal Court (2026a, p. 3; 2026b, pp. 57-60) adopted substantially the same reasoning in the joint judgment of the Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept (ADPF) No. 342/DF and Original Civil Action (ACO) No. 2,463/DF. The Supreme Federal Court held that the repeal of Article 171 resulted in the deconstitutionalization of the subject, thereby granting greater regulatory flexibility to the ordinary legislature without invalidating the specific authority established in the Article 190 to regulate and limit foreign acquisition and use of rural property. The judicial holding therefore gives normative expression to the interpretation advanced by Bercovici (2025, pp. 385-386) and resolves the discontinuity in federal administrative interpretations documented by Oliveira (2010, p. 18).

The judgment nevertheless introduces an important qualification into the relationship between property and sovereignty. In ACO No. 2,463/DF, the Brazilian Supreme Federal Court (2026b, p. 67) recognized that the acquisition of rural property by a foreign person does not, by itself, amount to the transfer of Brazilian sovereignty or the abdication of the State's sovereign powers. Consequently, restrictions cannot be justified by an automatic or linear equation between foreign ownership and the loss of sovereign authority. Differentiated treatment must rest on a plausible constitutional justification and maintain a reasonable relationship of proportionality between the means employed and the public objective pursued (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, p. 64). The Supreme Federal Court concluded that the nationality of those holding the majority of corporate capital and exercising corporate control constitutes a constitutionally relevant criterion because such control may affect social, economic, political, food-related, environmental, and geopolitical conditions (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 64-65, 67-68). This reasoning converges with the territorial approach developed by Bercovici (2025, pp. 378-381), which connects sovereignty to the State's authority over national territory. Oliveira's (2010, p. 103) critique, however, remains an important

limiting counterpoint: because the social function of land applies to both Brazilian and foreign owners, the nationality of corporate control cannot exhaust the legal analysis of land concentration, agrarian inequality, and the material exercise of economic power over rural property.

Brasil's (2023, pp. 12-15) environmental analysis adds a further standard for evaluating the proportionality of restrictions on foreign control of rural land. Although his study specifically concerns environmental licensing, Brasil (2023, pp. 12-13) argues that the principles of prevention and precaution must guide governmental decision-making whenever economic activities may create known or scientifically uncertain environmental risks. Prevention requires measures intended to avoid identifiable environmental damage, whereas precaution requires protective action when the consequences of an activity remain scientifically uncertain and may cause irreversible harm. Applied by analogy within the analytical framework of the present study, these principles support the prior assessment of the potential effects of large-scale rural land use on deforestation, water availability, biodiversity, traditional communities, agricultural production, and food security. This connection is reinforced by Original Civil Action (ACO) No. 2,463/DF, in which the Brazilian Supreme Federal Court related the constitutional relevance of foreign control over rural land to climate emergency, the protection of natural resources, and the territorial dimensions of political and geopolitical power (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 64-65).

The dialogue among the authors also exposes the limits of the judicial decision. Bercovici (2025, pp. 378-381) provides constitutional grounds for State regulation of national territory and identifies the difficulties created by indirect foreign control and the absence of reliable data. Oliveira (2010, pp. 43-44, 103) demonstrates that large-scale appropriation and concentration of land and natural resources may involve foreign and domestic capital, while emphasizing that the social function of land must apply regardless of the owner's nationality. Brasil (2023, pp. 12-15), in sequence, establishes that public authorities must prevent known environmental damage and manage scientifically uncertain ecological risks. Read together, these contributions indicate that recognition of the constitutional reception of Federal Law No. 5,709/1971 is relevant but insufficient to address every contemporary form of land grabbing (Bercovici, 2025, p. 381; Oliveira, 2010, pp. 43-44). On this basis, the present research argues that effective protection also requires reliable land data, disclosure of beneficial ownership, cooperation among real estate registry offices and the National Institute for Colonization and Agrarian Reform (INCRA), monitoring of rural leases and corporate arrangements, prior environmental assessment, and enforcement of the social function of property regardless of the nationality of its controller. Otherwise, the regulatory framework may supervise formal acquisitions without reaching the economic structures through which territorial power is effectively exercised.

This agrarian, constitutional, and environmental framework provides the necessary basis for a closer examination of the judicial controversy. The joint judgment transformed the theoretical relationship among sovereignty, foreign capital, the social function of property, environmental protection, and proportionality into a concrete constitutional determination. The claim in the Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept (ADPF) No. 342/DF was rejected, whereas the claim in ACO No. 2,463/DF was granted to invalidate Opinion No. 461/12-E of the General Inspectorate of Justice of the State of São Paulo and reaffirm the authority of the Federal Government and INCRA to authorize acquisitions of rural property by foreign legal entities and equivalent Brazilian companies (Brazilian Supreme Federal Court, 2026a, pp. 2-3; Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 2-3). Taking this into account, the following subsection examines the claims presented in both proceedings, the constitutional reasoning adopted by the Brazilian Supreme Federal Court, the outcome of the joint judgment, and the extent to which the decision reconciles sovereignty and territorial protection with equality, property rights, freedom of enterprise, food security, and environmental protection.

3. CONSTITUTIONAL SOVEREIGNTY AND FOREIGN CORPORATE CONTROL OF RURAL LAND: THE BRAZILIAN SUPREME FEDERAL COURT'S RULING IN ADPF NO. 342/DF AND ACO NO. 2,463/DF.

The constitutional controversy concerning foreign control of Brazilian rural land was examined jointly by the Brazilian Supreme Federal Court in the Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept (ADPF) No. 342/DF and Original Civil Action (ACO) No. 2,463/DF. Although the proceedings had different procedural origins, both concerned whether Article 1, paragraph 1, of Federal Law No. 5,709/1971 had been received by the Federal Constitution of 1988. The provision subjects Brazilian companies whose majority capital is held by foreign individuals or legal entities residing or headquartered abroad to the restrictions applicable to foreign companies acquiring rural property (Brazilian Supreme Federal Court, 2026a, pp. 2-3; Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 1-3). The joint judgment therefore addressed not only corporate nationality but also the constitutional significance of effective control over land and territory (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 64-68).

In ADPF No. 342/DF, the Brazilian Rural Society claimed that Article 1, paragraph 1, had not been received by the constitutional order. It argued that the provision created obstacles to agricultural investment, reduced the liquidity of rural assets, hindered access to financing, and generated legal uncertainty. The applicant also alleged violations of equality, property rights, freedom of enterprise, freedom of association, and national development. Its constitutional argument relied substantially on the repeal of Article 171 of the Brazilian Federal Constitution of 1988 by Constitutional Amendment No. 6/1995 and on the assertion that Article 190 authorizes restrictions only upon formally foreign individuals and legal entities, not Brazilian companies controlled by foreign capital (Brazilian Supreme Federal Court, 2026a, pp. 5-8).

The Original Civil Action No. 2,463/DF approached the same controversy from an institutional and federative perspective. The Federal Government and the National Institute for Colonization and Agrarian Reform (INCRA) challenged Opinion No. 461/12-E of the General Inspectorate of Justice of the State of São Paulo. That administrative opinion had exempted notaries and real estate registry offices from applying Federal Law No. 5,709/1971 to Brazilian companies controlled by foreign capital. The federal plaintiffs maintained that the state administrative measure disregarded federal legislation and interfered with the authority of the Federal Government and INCRA to supervise and authorize the relevant rural land transactions (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 1-2, 5-6).

The Supreme Federal Court rejected the claim formulated in ADPF No. 342/DF and granted the claim in ACO No. 2,463/DF. It recognized that Article 1, paragraph 1, of Federal Law No. 5,709/1971 had been received by the Constitution, invalidated Opinion No. 461/12-E, and reaffirmed the authority of the Federal Government and INCRA to authorize the acquisition of rural property by foreign legal entities and equivalent Brazilian companies. The judgment emphasized that the statute does not establish an absolute prohibition on foreign acquisition or lease. It instead creates conditions and limits that must be observed before such transactions can be completed (Brazilian Supreme Federal Court, 2026a, pp. 3-4; Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 3-4).

A central element of the Supreme Federal Court's reasoning concerned the constitutional effects of the repeal of Article 171. According to the judgment, Constitutional Amendment No. 6/1995 eliminated a constitutionally imposed distinction between Brazilian companies and Brazilian companies with national capital, but it did not establish a constitutional prohibition against every legislative distinction based on the foreign origin of corporate control. The repeal produced a process of deconstitutionalization, transferring greater regulatory flexibility to the ordinary legislature. This interpretation becomes particularly significant in relation to rural property because Article 190 expressly authorizes legislation to regulate and limit the acquisition and lease of rural land by foreign individuals and legal entities (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 58, 60).

The Supreme Federal Court also subjected the statutory distinction to an equality and proportionality analysis. It stated that differentiated treatment requires a plausible constitutional justification and a reasonable relationship between the criterion employed and the public objective pursued. In its view,

the nationality of those holding the majority of a company's capital constitutes a relevant criterion because these shareholders ordinarily exercise corporate control and may determine how rural property will be used. The distinction was therefore considered materially connected to the statutory object rather than an arbitrary discrimination against foreign investment (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, p. 64).

Nevertheless, the judgment did not equate foreign ownership with the transfer of Brazilian sovereignty. After reproducing the warning that the acquisition of private property by foreigners does not amount to the acquisition of a portion of State sovereignty, the Brazilian Supreme Federal Court accepted that the sale of rural land does not, by itself, constitute an abdication of sovereign powers. Sovereignty remains a public authority exercised over national territory regardless of the nationality of individual landowners. At the same time, the Supreme Federal Court reasoned that the concentration and effective control of rural land may affect the social and political structures through which sovereign decisions are formed. Thus, although private ownership and political sovereignty are not related in a simple or automatic manner, the legislature may evaluate when foreign participation becomes relevant to national interests (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 65-67).

The decision consequently adopted a material understanding of corporate and territorial control. The identity of those capable of determining the purposes for which rural land will be used may be constitutionally relevant because such decisions can produce political, social, economic, food-related, and environmental effects. The Supreme Federal Court connected this concern to the contemporary climate emergency, epidemiological risks, technological transformations, and the territorial dimension of geopolitical power. It concluded that Article 190 permits proportionate legislative differentiation where foreign control may influence the State's capacity to formulate public policies and protect strategic resources (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 64-68).

The control-centered approach developed by Pereira (2017, pp. 35-36, 46) both supports and qualifies the Supreme Federal Court's holding. It supports the decision because Article 1, paragraph 1, moves beyond the formal place of incorporation by considering the nationality of those who hold the majority of a company's capital and exercise corporate control (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, p. 64). At the same time, Pereira's distinction between land control and foreignization indicates that majority shareholding cannot exhaust the legal analysis. Fairbairn (2015, pp. 584, 586-587) demonstrates that economic control may also be structured through joint ventures, arrangements between domestic and foreign investors, transfers of assets between parent companies and subsidiaries, Brazilian front persons, hidden partnerships, mortgage foreclosures, and debt rather than equity financing. From a territorial perspective, these arrangements may produce processes of territorialization, deterritorialization, and reterritorialization that transform social and geopolitical relations and particularly affect peasants and traditional communities (Pereira, 2017, p. 52).

Fairbairn's (2015, pp. 581-582) examination of Brazilian land regulation further demonstrates the limitations of relying exclusively on the foreign–domestic distinction. She argues that regulations based on a state-centered and territorial conception of nationality face difficulties when the economic threat to be regulated is increasingly financialized and deterritorialized. Transnational corporations may have shareholders from several countries, while investment funds, publicly traded companies, holding structures, subsidiaries, and partnerships between foreign investors and Brazilian operating companies may make the national origin of capital unstable, multiple, or opaque (Fairbairn, 2015, pp. 582, 584). In this context, rigid nationality classifications may encourage companies to reorganize their corporate structures or employ alternative financial arrangements while maintaining substantially the same economic control over rural property (Fairbairn, 2015, pp. 586-587).

This criticism does not render Federal Law No. 5,709/1971 constitutionally or institutionally irrelevant. Fairbairn recognizes that restrictions on foreign acquisitions may remain useful, particularly when the investor is a foreign government, a state-owned enterprise, or a sovereign wealth fund. She nevertheless maintains that preventing dispossession and protecting food sovereignty also require strong domestic rules concerning agrarian reform, Indigenous and community land rights, and the tenure security of small-scale producers (Fairbairn, 2015, p. 589; Brazil, 1971). The judgment may

therefore be regarded as preserving a necessary regulatory instrument without resolving the wider structural causes of land concentration and territorial dispossession.

The environmental dimension of the controversy requires an equally integrated institutional response. In their analysis of environmental governance in the Pantanal, Brasil and Santos (2025, pp. 2, 7) emphasize preventive action, precaution, social participation, institutional integration, and intergenerational solidarity. Although their study specifically concerns the protection of the Pantanal biome, its framework is relevant to large-scale rural land control because decisions regarding land use may affect deforestation, hydrological systems, biodiversity, ecological connectivity, traditional communities, and climate resilience (Brasil & Santos, 2025, pp. 6-7, 22-25). As an analytical application of this framework, the acquisition authorization process should not be restricted to verifying the nationality or corporate structure of the investor; it should also be coordinated with land-use planning and environmental governance mechanisms.

Brasil and Santos (2025, pp. 22-23) identify ecological-economic zoning, restricted-use areas, biodiversity corridors, deforestation control, integrated fire management, and incentives for sustainable practices as complementary instruments of territorial governance. They also emphasize climate justice, cooperative federalism, adaptive decision-making, and the integration of environmental conservation with territorial justice and sustainable development (Brasil & Santos, 2025, pp. 24-25). Applied by analogy to the foreign acquisition of rural land, these elements support the proposal that authorization and registration procedures should be integrated with environmental data, land registries, beneficial-ownership information, rural taxation, environmental licensing, and monitoring of the social function of property.

The Supreme Federal Court's reference to food-related and environmental impacts must be understood as recognition of their constitutional relevance rather than as proof that every foreign acquisition necessarily produces food insecurity or ecological harm (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, p. 64). Accordingly, a proportionate regulatory model should assess the scale, location, concentration, intended use, beneficial ownership, environmental sensitivity, and cumulative effects of each transaction. This approach preserves the possibility of legitimate foreign investment while enabling the State to prevent arrangements that threaten food production, vulnerable communities, biodiversity, water resources, or public control over strategically important territories. Significantly, the Brazilian Supreme Federal Court clarified that the constitutionality of every restriction contained in Federal Law No. 5,709/1971 was not under examination and acknowledged the need for legislative modernization in light of contemporary global landholding structures (Brazilian Supreme Federal Court, 2026b, pp. 68-69).

Taken together, the foregoing analysis demonstrates that the joint judgment provides a constitutionally legitimate basis for subjecting Brazilian companies controlled by foreign capital to the regulatory framework established by Federal Law No. 5,709/1971. The decision reaffirmed federal administrative authority, preserved the regulatory force of Article 190, and rejected the interpretation that the repeal of Article 171 categorically prohibited legislative distinctions based on the foreign nationality of controlling capital. Nevertheless, the judgment does not constitute a comprehensive legal response to contemporary forms of land grabbing. Read in combination, Pereira's territorial approach, Fairbairn's analysis of financialization, and Brasil and Santos's model of integrated environmental governance demonstrate the limitations of a regulatory system focused predominantly on formal ownership. Effective regulation also requires transparency regarding ultimate beneficial ownership, institutional coordination among INCRA, environmental agencies, and real estate registry authorities, reliable and integrated territorial data, oversight of leases and other indirect contractual or corporate arrangements, consistent enforcement of the social function of property, and protection of food sovereignty and ecological integrity. Accordingly, the Supreme Federal Court's recognition of the constitutional compatibility of Federal Law No. 5,709/1971 represents a necessary but insufficient step. Legislative and administrative modernization remains essential to reconcile national sovereignty with equality, property rights, freedom of enterprise, food security, environmental protection, and legal certainty.

4. CONCLUDING REMARKS.

This research examined the constitutional regulation of foreign acquisition and control of rural land in Brazil taking into account the joint judgment rendered by the Brazilian Supreme Federal Court in the Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept (ADPF) No. 342/DF and Original Civil Action (ACO) No. 2,463/DF. The general objective was to determine how the Brazilian Supreme Federal Court reconciled constitutional sovereignty with property rights and freedom of enterprise. This objective was achieved. The analysis demonstrated that the Supreme Federal Court did not establish an absolute precedence of sovereignty over economic freedoms. Instead, it interpreted property rights and freedom of enterprise within a constitutional framework that also encompasses national sovereignty, the social and environmental functions of rural property, agrarian policy, food security, and environmental protection.

The judgment rejected an automatic equivalence between foreign ownership and the transfer or loss of Brazilian sovereignty. Nevertheless, it recognized that the identity of those who effectively control rural property may influence land use, agricultural production, natural resources, political power, and the State's capacity to formulate public policies. On this basis, the Supreme Federal Court concluded that the nationality of those holding the majority of corporate capital constitutes a constitutionally relevant criterion of differentiation. Such differentiation does not prohibit foreign investment but subjects particular transactions to conditions, limits, registration requirements, and administrative authorization.

The specific objective was to determine whether the application of Federal Law No. 5,709/1971 to Brazilian companies controlled by foreign capital constitutes a constitutionally legitimate mechanism for preventing indirect territorial control and addressing the risks associated with land grabbing, food insecurity, and environmental degradation. This objective was also achieved, although the answer requires qualification. The statutory equivalence between foreign legal entities and Brazilian companies controlled by foreign capital represents a constitutionally permissible and institutionally necessary mechanism because it prevents the formal establishment of a Brazilian company from automatically excluding a transaction from public supervision. However, this mechanism is not sufficient to identify every contemporary form of indirect control, particularly those structured through investment funds, corporate reorganizations, partnerships, debt arrangements, leases, subsidiaries, or other contractual and financial mechanisms.

The research problem may therefore be answered by concluding that restrictions based on foreign corporate control are compatible with equality, legal certainty, freedom of enterprise, and the right to property to the extent that they possess a rational constitutional justification and maintain a reasonable relationship of proportionality with the public objectives pursued. The constitutional order permits differentiated treatment when it is suitable and necessary to protect national sovereignty, the social and environmental functions of rural property, food security, and other strategic interests. Conversely, nationality alone cannot justify arbitrary, excessive, unpredictable, or discriminatory restrictions unrelated to the actual risks or territorial consequences of a transaction.

The research hypothesis was thus confirmed in qualified terms. Articles 1, 170, 172, 186, 190, and 225 of the Federal Constitution of 1988 provide a constitutional basis for proportionate restrictions on the acquisition and control of rural land by foreign persons and equivalent Brazilian companies. The repeal of Article 171 by Constitutional Amendment No. 6/1995 did not establish a constitutional prohibition against distinctions based on the foreign nationality of controlling capital. As recognized by the Brazilian Supreme Federal Court, the repeal deconstitutionalized the subject and granted the ordinary legislature greater regulatory discretion. Nevertheless, confirmation of the hypothesis does not imply that every restriction contained in Federal Law No. 5,709/1971 is automatically constitutional. Each regulatory measure must remain subject to equality, proportionality, legal certainty, and adequate procedural safeguards.

The hypothetical-deductive method was particularly important to the development of the research. The investigation began with the hypothesis that differentiated treatment based on foreign corporate control was constitutionally admissible and then tested that proposition against the agrarian and constitutional

framework, the applicable legislation, competing doctrinal interpretations, and the arguments presented in both judicial proceedings. The method made it possible to confront the hypothesis with potentially contradictory elements, including the repeal of Article 171, the constitutional guarantees of property and freedom of enterprise, the principle of equality, the requirement of legal certainty, and the recognition that private ownership by foreigners does not itself constitute a transfer of sovereignty. This process prevented the analysis from becoming only descriptive or confirmatory and allowed the original hypothesis to be maintained while also defining its constitutional limits.

The methodological procedures complemented this process. Bibliographic research enabled dialogue among constitutional, agrarian, geographic, economic, and environmental approaches to rural land control. Documentary research allowed the reconstruction of the normative development beginning with Federal Law No. 4,504/1964, continuing through Federal Law No. 5,709/1971 and the Federal Constitution of 1988, and extending to the subsequent legislation applicable to rural acquisition and leases. The qualitative and systematic interpretation of these sources was combined with a critical jurisprudential examination of the claims, arguments, holdings, and institutional consequences of ADPF No. 342/DF and ACO No. 2,463/DF. This combination demonstrated that the controversy cannot be adequately understood through corporate nationality or private property law alone.

The research also produced relevant substantive findings. Rural land constitutes a constitutionally sensitive resource whose regulation extends beyond private economic interests. Its legal treatment involves productive use, labor protection, agrarian justice, environmental conservation, climate resilience, food production, and the well-being of rural and traditional communities. The judgment preserved the authority of the Federal Government and the National Institute for Colonization and Agrarian Reform (INCRA), invalidated the conflicting administrative opinion issued in the State of São Paulo, and confirmed the constitutional reception of Article 1, paragraph 1, of Federal Law No. 5,709/1971. At the same time, the analysis showed that a regulatory model predominantly focused on formal ownership and majority shareholding may fail to identify the economic structures through which territorial power is effectively exercised.

Certain empirical limitations must be acknowledged. The research is predominantly qualitative, bibliographic, documentary, and jurisprudential. It did not include fieldwork, interviews with public officials, investors, registry officers, rural workers, or affected communities. Nor did it examine individual authorization proceedings, a representative sample of rural property records, corporate ownership databases, environmental impact assessments, or the practical enforcement activities undertaken by INCRA. The fragmentation of land information and the absence of comprehensive and reliable data on ultimate beneficial ownership also prevent a precise assessment of the total area effectively controlled by foreign capital. Consequently, the study cannot quantify the frequency of regulatory circumvention, establish causal relationships between foreign control and particular environmental or food-security impacts, or measure the effectiveness of the judgment in administrative practice. Moreover, the recent nature of the decision limits the possibility of assessing its long-term institutional and economic consequences.

These limitations do not weaken the legal conclusions but define their appropriate scope and indicate directions for future research. Subsequent empirical studies should examine authorization practices, land registry information, corporate and beneficial-ownership structures, rural leases, environmental data, and the territorial concentration of foreign-controlled investments. Interviews and field studies could also assess how the regulatory framework affects public administration, legitimate investment, rural communities, agricultural production, and environmental protection in different Brazilian regions.

From a propositional perspective, Federal Law No. 5,709/1971 should be modernized to adopt a more substantive concept of control capable of reaching indirect corporate, contractual, and financial arrangements. The regulatory framework should require disclosure and periodic updating of ultimate beneficial-ownership information, including changes occurring after the acquisition of rural property. It should also establish an interoperable information system connecting INCRA, real estate registry offices, environmental authorities, and other public databases relevant to rural land use. Periodic

publication of consolidated and non-confidential data would strengthen transparency, institutional accountability, and the formulation of evidence-based agrarian and environmental policies.

Finally, authorization procedures should be governed by objective and proportionate criteria addressing the size, location, concentration, intended use, corporate structure, environmental sensitivity, and cumulative territorial effects of each transaction. Administrative decisions should be reasoned, transparent, subject to clear time limits, and open to appropriate review, thereby protecting legal certainty and legitimate foreign investment. Environmental and social risk assessments should be integrated with land-use planning, while the social function of property must be consistently enforced regardless of whether the controller is Brazilian or foreign. Through these measures, Brazil may preserve economic openness while strengthening constitutional sovereignty, food security, environmental protection, territorial justice, and the rights of present and future generations.

5. BIBLIOGRAPHY:

Bercovici, G. (2025). The 1988 Constitution and the statute governing the acquisition of rural land by foreigners (Statute No. 5,709/1971). *Journal of Contemporary Civil Law*, 43, 377-386.

https://apd.org.br/wp-content/uploads/2025/10/A_Constituicao_de_1988_e_a_Lei_sobre_Aqu.pdf

Brasil, D. R. (2023). The principles of ecological non-regression, prevention, and precaution in environmental licensing: An analysis of Direct Action of Unconstitutionality No. 6,808/DF against Statute No. 14,195/2021. *Journal of Agrarian and Agro-Environmental Law,* 9(1), 1-18. https://doi.org/10.26668/IndexLawJournals/2526-0081/2023.v9i1.9487

Brasil, D. R., & Santos, F. L. (2025). The implications of Draft Bill No. 2334/2024 on the protection of the Pantanal biome: Aspects in the context of environmental governance in Brazil and its relation to global commitments within BRICS. *Mackenzie Law Review*, 19(1), Article e17892EN. https://editorarevistas.mackenzie.br/rmd/article/download/17892/12836/83720

Brazil. (1964). Law No. 4,504 of November 30, 1964: Provides for the Land Statute and other measures. *Official Gazette of the Union*, Brasília, Federal District, November 30, 1964 (rectified December 17, 1964, and April 6, 1965). https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4504.htm

Brazil. (1971). Law No. 5,709 of October 7, 1971: Regulates the acquisition of rural property by foreign residents in Brazil or foreign legal entities authorized to operate in Brazil and provides other measures. *Official Gazette of the Union*, Brasília, Federal District, October 11, 1971. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l5709.htm

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

Brazil. (1993). Law No. 8,629 of February 25, 1993: Provides for the regulation of the constitutional provisions concerning agrarian reform set forth in Chapter III, Title VII, of the Federal Constitution. *Official Gazette of the Union*, Brasília, Federal District, February 26, 1993. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8629.htm

Brazilian Supreme Federal Court. (2026a). Claim of Noncompliance with a Fundamental Precept (ADPF) No. 342/DF (Reporting Justice Marco Aurélio; Justice Gilmar Mendes writing for the Court; Full Court). *Electronic Justice Gazette*, No. 246, Brasília, Federal District, August 21, 2026.

https://redir.stf.jus.br/paginadorpub/paginador.jsp?docTP=TP&docID=799990690

Brazilian Supreme Federal Court. (2026). Original Civil Action (ACO) No. 2,463/DF (Reporting Justice Marco Aurélio; Justice Gilmar Mendes writing for the Court; Full Court). *Electronic Justice Gazette*, No. 246, Brasília, Federal District, August 21, 2026.

https://redir.stf.jus.br/paginadorpub/paginador.jsp?docTP=TP&docID=799990639

Fairbairn, M. (2015). Foreignization, financialization and land grab regulation. *Journal of Agrarian Change*, 15(4), 581-591. https://doi.org/10.1111/joac.12112

Oliveira, A. U. de. (2010). The acquisition of land by foreigners in Brazil: A return to the dossiers. *Agrarian Journal* (São Paulo, Online), 12, 3-113. https://doi.org/10.11606/issn.1808-1150.v0i12p3-113

Pereira, L. I. (2018). Land grabbing, land rush, land control and land foreignization: An analysis of the themes and trends of academic production between 2009 and 2017. *International Studies: Journal of International Relations of PUC Minas*, 5(2), 34-56. https://doi.org/10.5752/P.2317-773X.2017v5n2p34