CONFERENCE BOOK

ANADOLU
19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES

AUGUST 14 – 16, 2026
MARDIN

ISBN : 978-625-8795-41-7

Academy Global Publishing House

www.anadolukongresi.org

ANADOLU 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES
AUGUST 14 – 16, 2026
MARDIN

Edited By
PROF. DR. ALİ BİLGİLİ

Issued: 20. 09.2026
ISBN: 978-625-8795-41-7

ASSOCIATION & ACADEMIC INCENTIVES :
In the conference 39 papers have been presented by Turkish participants and 55 papers by international participants.
Members of the organizing committees of the conference perform their duties with an "official assignment letter"

The Contents Of This Book Are Solely Those Of The Authors.
Bu Kitabın içeriğinin tüm sorumluluğu yazarlarına aittir.

Web: www.anadolukngresi.org Contact: anadolukongresi@gmail.com

CONFERENCE ID

ANADOLU 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES

DATE – PLACE
AUGUST 14 – 16, 2026
MARDIN

ORGANIIZATION
ACADEMY GLOBAL CONFERENCES & JOURNALS

EVALUATION PROCESS
All applications have undergone a double-blind peer review process.

PARTICIPATING COUNTRIES
Turkey – Spain – Kazakhstan- Tanzania- Morocco – Taiwan – France- Iraq- Kosovo- Saudi Arabia- Albania - Chile- Libya- Nigeria- Tunisia-

PRESENTATION
Oral presentation

No part of this book may be reprinted or reproduced or utilized in any form or by any electronic, mechanical or any other means, now known or hereafter invented, including photocopying and recording, or in any form of information storage or retrieval systems, without permission from the publishers.
Academy Global–2026©

CONGRESS ORGANIZING BOARD

Head of Conference: Prof. Dr. Naile Bilgili

Prof. Dr. Hülya Çiçek - Gaziantep Universitesi

Prof. Dr. Ali Bilgili - Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Naile Bilgili - Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Başak Hanedan - Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Hajar Huseynova - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Prof. Dr. Dwi Sulisworo - Ahmad Dahlan University

Prof. Zain Musa - Royal Academy of Cambodia

Prof. Dr. Sameer Jain - NICMAR University

Prof Yakup Babayev - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Prof. Dr. Suyatno - Ahmad Dahlan University

Prof. Dr. Al-Rashiff H. Mastul -Mindanao State University

Prof. Dr. Alhisan U. Jemsy - Mindanao State University

Prof. Dr. Elif Akpınar Külekçi - Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Mehtap Kavurmacı - Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Belkıs Özkara - Afyon Kocatepe Üniversitesi

Prof. Dr. Mavlonova Ugiloy Khamdamovna - Zarmed University

Assoc. Prof. Dr. Aysel Arslan - Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Yeliz Çakır Sahilli - Munzur Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Sıddık BAKIR - Ataturk Universitesi

Assoc. Prof. Dr. Berna Koçak - Munzur Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Irade Kerimova - Azerbaycan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Dhesi Ari Astuti - Ahmad Dahlan University

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Fırat Baran - Batman Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Aydın - Dicle Üniversitesi

Assoc. Prof. Dody Hartanto - Ahmad Dahlan University

Assoc. Prof. Dr. Rungchacadaporn - Ahmad Dahlan University

Assoc. Prof. Nazile Abdullazade - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assoc Prof. Dr. Feran Aşur - Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Assoc Prof. Dr. Erkan EFİLTİ - Kırgızistan-Türkiye Manas University

Assoc. Prof. Dr. Dini Yuniarti - Ahmad Dahlan University

Assoc. Prof. Ivaylo Staykov - New Bulgarian Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Abbas Ghaffari - Tebriz Universitesi

Assoc. Prof. Dr. Yasemin Taş - Gazi Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Yeganə Qəhrəmanova - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Bülent Işık - Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Nurkan Yılmaz - İnönü Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Həmzə Əliyev- Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Sevra Fırıncıoğulları

Assist. Prof. Ihwan Ghazali - Technic University of Malaysia

Assist. Prof. Dr. Abışov Elşad Şərəfxan oğlu- Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assist. Prof. Dr. Mahrukh Dovlatzade - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assist. Prof. Dr. Naci Büyükkaracığan- Selçuk Üniversitesi

Assist. Prof. Dr. Songül Atak - Dicle Üniversitesi

Lecturer Mehmet Nuri Ödük - Selçuk Üniversitesi

Dr. Fatih İ. Kurşunmaden - Selçuk Üniversitesi

Assist. Prof. Dr. Mehdi Meskini Heydarlou –

Dr. Dadash Mehravari - Tebriz Universitesi

Dr. Aynurə Əliyeva - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Dr. Gültekin Gürçay

Dr. Amaneh Manafidizajı

Scientific & Review Committee

Prof. Dr. Hülya Çiçek – Turkiye

Prof. Dr. Emine Koca – Turkiye

Prof. Dr. Fatma Koç – Turkiye

Prof. Dr. Valide Paşayeva - Türkiye

Prof. Dr. Ali Bilgili - Turkiye

Prof. Dr. Naile Bilgili - Turkiye

Prof. Dr. Başak Hanedan – Turkiye

Prof. Dr. Aysel Güven - Turkiye

Prof Dr. Bülent Kurtişoğlu – Turkiye

Prof. Dr. Hajar Huseynova – Azerbaijan

Prof. Dr. Dwi Sulisworo – Indonesia

Prof. Dr. Natalia Latygina – Ukraina

Prof. Dr. Yunir Abdrahimov – Russia

Prof. Muntazir Mehdi – Pakistan

Prof. Dr. T.Venkat Narayana Rao – India

Prof. Dr. İzzet Gümüş – Turkiye

Prof. Dr. Mustafa Bayram – Turkiye

Prof. Dr. Saim Zeki Bostan – Turkiye

Prof. Dr. Hyeonjin Lee – China

Prof. Yakup Babayev - Azerbaijan

Prof. Dr. Suyatno – Indonesia

Prof. Dr. Zain Musa – Cambodia

Prof. Dr. Sameer Jain – India

Prof. Mehdi Mohammadzade – Iran

Prof. Dr. Ika Maryani – Indonesia

Prof. Dr. Guler Yenice – Turkiye

Prof. Dr. Elif Akpınar Külekçi – Turkiye

Prof. Dr. Mavlonova Ugiloy Khamdamovna – Uzbekistan

Prof. Dr. Mehtap Kavurmacı – Türkiye

Prof. Dr. Belkıs Özkara – Türkiye

Prof. Dr. Al-Rashiff Hamjilani Mastul – Philipinnes

Prof. Dr. Alhisan U. Jemsy – Philippines

Assoc. Prof. Dr. Aysel Arslan - Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Sıddık Bakır – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Meryem Öztürk - Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Yeliz Çakır Sahilli - Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Berna Koçak - Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Dhesi Ari Astuti – Indonesia

Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Aydın - Turkiye

Assoc Prof. Dr. Feran Aşur – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Yasemin Taş – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Bülent Işık - Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Nurkan Yılmaz - Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Sevra Fırıncıoğulları - Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Abdulsemet Aydın – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Fırat Baran - Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Dilorom Hamroeva - Ozbekistan

Assoc. Prof. Dr. Abbas Ghaffari – Iran

Assoc. Prof. Ivaylo Staykov - Bulgaria

Assoc. Prof. Dr. Dini Yuniarti – Indonesia

Assoc. Prof. Dr. Ümit Ayata – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Həmzə Əliyev - Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Okan Sarıgöz – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Eda Bozkurt – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Ahmet Topal – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Kırbaş – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Mesut Bulut – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Fahriye Emgili – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Sandeep Gupta – India

Assoc. Prof. Dr. Veysel Parlak – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Mahmut İslamoğlu – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Nazile Abdullazade – Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Irade Kerimova - Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Yeganə Qəhrəmanova – Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Ali Vandshoari – İran

Assoc. Prof. Dr. Dinara Fardeeva – Rusya

Assoc. Prof. Dr. Göksel Ulay – Turkiye

Assoc. Prof. Dr. Erkan Efilti - Kirgizhstan

Assist. Prof. K. R. Padma – India

Assist. Prof. Dr. Omid Afghan - Afghanistan

Assist. Prof. Dr. Maha Hamdan Alanazi - Saudi Arabia

Assist. Prof. Dr. Dzhakipbek Altaevich Altayev - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Amina Salihi Bayero – Nigeria

Assist. Prof. Dr. Ahmad Sharif Fakheer - Jordania

Assist. Prof. Dr. Dody Hartanto - Indonesia

Assist. Prof. Dr. Ihwan Ghazali - Malaysia

Assist. Prof. Dr. Mehdi Meskini Heyladou – Iran

Assist. Prof. Dr. Bazarhan İmangalieva - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Keles Nurmaşulı Jaylıbay - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Mamatkuli Juraev – Ozbekistan

Assist. Prof. Dr. Kalemkas Kalibaeva – Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Bouaraour Kamel – Algeria

Assist. Prof. Dr. Alia R. Masalimova - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Amanbay Moldibaev - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Ayslu B. Sarsekenova - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Bhumika Sharma - India

Assist. Prof. Dr. Gulşat Şugaeva – Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. K.A. Tleubergenova - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Cholpon Toktosunova – Kirgizia

Assist. Prof. Dr. Hoang Anh Tuan – Vietnam

Assist. Prof. Dr. Songül Atak - Türkiye

Assist. Prof. Dr. Botagul Turgunbaeva - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Dinarakhan Tursunalieva - Kirgizia

Assist. Prof. Dr. Yang Zitong – China

Assist. Prof. Dr. Gulmira Abndirasulova – Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Imran Latif Saifi – South Africa

Assist. Prof. Dr. Murat Genç – Turkiye

Assist. Prof. Dr. Monisa Qadiri – India

Assist. Prof. Dr. Vaiva Balciuniene – Lithuania

Assist. Prof. Dr. Meltem Avan – Turkiye

Assist. Prof. Dr. Abışov Elşad Şərəfxan oğlu - Azerbaijan

Assist. Prof. Dr. Mahrukh Dovlatzade – Azerbaijan

Assist. Prof. Dr. Naci Büyükkaracığan – Turkiye

Assist. Prof. Dr. Raihan Yusoph – Philippines

Dr. Que-Nhu Duong - Vietnam

Dr. Fatih İ. Kurşunmaden – Turkiye

Dr. Mehmet Nuri Ödük – Turkiye

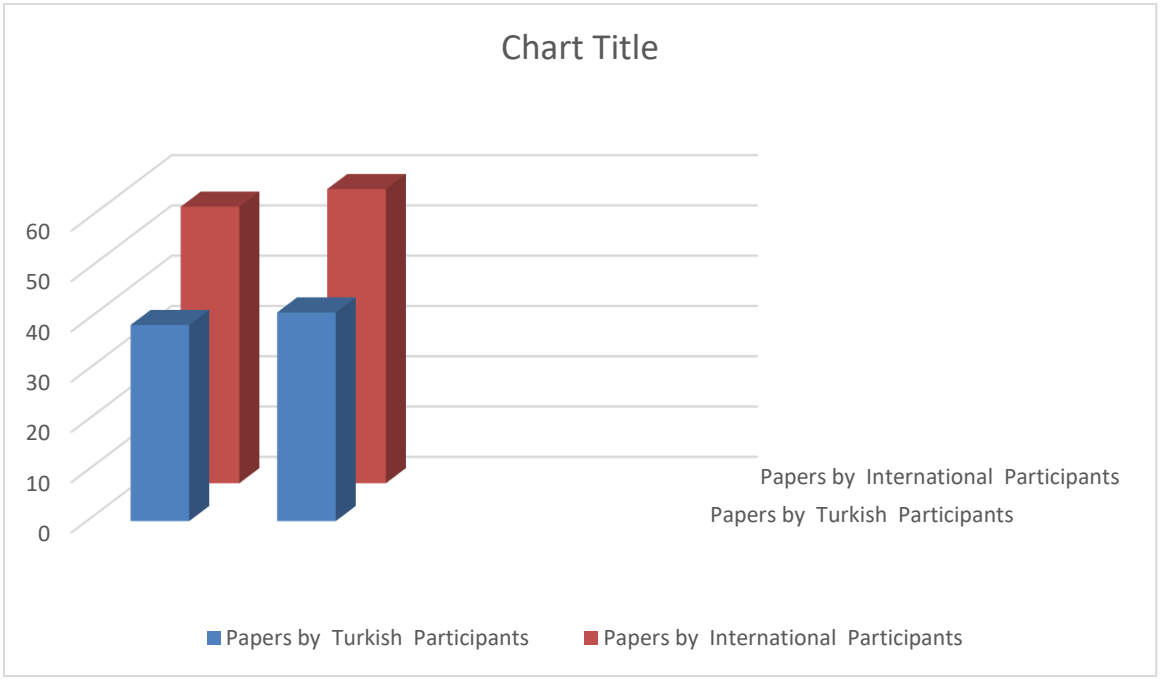
Dr. Ayşe Baran - Turkiye

Dr. Aynurə Əliyeva - Azerbaijan

Dr. Sonali Malhotra – India

Dr. Amaneh Manafidizaji – Iran

	Number of paper	*%*
Papers by Turkish Participants	39	41.49
Papers by International Participants (14 Countries)	55	58.51



ANADOLU 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PPLIED SCIENCES
AUGUST 14 – 16, 2026
MARDIN

NO : **AC- 19A - 2026. 362U– 7255**
Konu : Akademik Teşvik Uygunluk Belgesi 08/09/2026

İLGİLİ MAKAMA

Academy Global Conferences tarafından düzenlenen **ANADOLU 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES** kongresi 14-16 Ağustos 2026 tarihlerinde Mardin'de 15 farklı ülkeden akademisyenin katılımıyla gerçekleştirilmiştir. Kongre kapsamında sunulan 94 bildirinin 39'u Türkiye'den, 55'i ise farklı 14 ülkeden katılan akademisyenler 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 olarak düzenlenmiştir.

Bilgilerinize arz ederiz

Saygılarımızla

Prof. Dr. Ali BİLGİLİ

T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Veteriner Fakültesi Dekanlığı
Fakülte Sekreterliği

Sayı : E-21304664-051-1705704 12.02.2025

Konu : 31-14279 Prof. Dr. Ali Bilgili'nin
Uluslararası Kongrelerde Düzenleme ve
Bilim kurullarında yer alması hk

FARMAKOLOJİ VE TOKSİKOLOJİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞINA

İlgi : Farmakoloji ve Toksikoloji Anabilim Dalı Başkanlığı'nın11.02.2025 tarihli ve E-41298163-051-1704750 sayılı yazısı.

İlgi yazınız uyarınca, Anabilim Dalınız öğretim üyesi Prof.Dr.Ali BİLGİLİ'nin, Yükseköğretim Kurulu'nun 15.06.2023 tarihli oturumunda doçentlik başvuruları şartları ile ilgili değişiklik önerileri kapsamında, "Academy Global Conferences & Publishing (https://www.akademikongre.org/registration)" tarafından önümüzdeki tarihlerde düzenlenecek olan uluslararası kongrelerde; kongre başkanı, kongre düzenleme ve bilim kurulu üyesi olarak görev yapması Dekanlığımızca da uygun görülmüştür.

Bilgilerinizi ve gereğini saygılarımla rica ederim.

Prof. Dr. Necmettin ÜNAL
Dekan V.

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.
Doğrulama Kodu: 8E77B04B-BD26-449E-A3C8-D44477307021 Doğrulama Adresi: https://www.turkiye.gov.tr/ankara-universitesi-ebys

Zübeyde Hanım Mahallesi Şehit Ömer Halisdemir Bulvarı No: 9/C 06070 Altındağ / ANKARA
Telefon No: (0312) 317 03 15 Belge Geçer No: (0312) 316 44 72
e-posta: vetmed@veterinary.ankara.edu.tr
KEP Adresi : ankunvrek@ankuni.hs01.kep.tr

Bilgi için:Gülay ŞAFAK
Bilgisayar İşletmeni
Telefon No:(312) 317 03 15-4510
E-Posta: gsafak@ankara.edu.tr

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES

August 14 – 16, 2026

MARDIN

Kongre Bağlantı Linki :

Join Zoom Meeting

https://us06web.zoom.us/j/88571518350?pwd=fOYazCWBmbAiWrHygjKSjkbbSvotfd.1

Meeting ID: 885 7151 8350

Passcode: 202224

ÖNEMLİ AÇIKLAMA (Lütfen okuyunuz)

- ZOOM bağlantısı için yukarıda verilen bağlantıyı veya yine yukarıda verilen giriş bilgilerini kullanabilirsiniz.
- **Oturum içerisinde en KIDEMLİ olan moderator olarak seçilir. Moderatörün oturum düzenini gözetmesi, akademisyen adaylarını yönlendirmesi beklenmektedir.**
- Oturuma bağlanmadan önce Salon numaranızı adınızın önüne aşağıdaki gibi ekleyiniz. Bu sayede kongre açılışında beklemeden oturumlarınıza gönderilebileceksiniz. Ör. 5 Ahmet Ahmetoglu
- **Sunum süresi 10 dakikadır. Bu sürenin aşılmamasını moderatörler temin edecektir.**
- Sunum sonrası 5 dakikayı geçmeyen soru-cevap, tartışma süresi verilmektedir.
- **Sunumlar TÜRKÇE veya İNGİLİZCE yapılabilmektedir.**
- Kameralar, oturum süresince toplam % 70 oranında açık olmak zorundadır.
- **Sunum yapan katılımcının kamerası açık olmak zorundadır.**
- Sunum yapmak zorunludur. **Herhangi bir nedenle sunum yapmamış olan katılımcıya sertifika verilmesi ve çalışmasının yayınlanması sözkonusu olamaz.**
- Katılımcı, kendi oturumda, oturum bitene kadar bulunmak zorundadır.
- Katılımcıların kendi oturumları dışındaki oturumlara katılma zorunluluğu yoktur.
- ZOOM platformunun kapasite sınırı nedeniyle, DİNLEYİCİ, sadece kapasite izin verdiği sürece kabul edilebilmektedir.
- **SADECE ÇALIŞMADA YAZAR OLARAK GEÇEN KİŞİLER SUNUM YAPABİLİR !**

IMPORTANT, PLEASE READ CAREFULLY

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

TECHNICAL INFORMATION

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

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 1	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:00 – 13:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Öğr. Gör. Dr., Eda Öztürk Belet		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	TUBERCULUM ADDUCTORIUM'DA GÖRÜLEN YAPISAL VARYASYONLAR VE EDİNSEL DEFORMİTELER	**Dr.Öğr.Üyesi Ece BURU** **Doç.Dr. Necat KOYUN** **Dr.Öğr.Üyesi Veysel AKYOL**
2	KRONİK BÖBREK YETMEZLİĞİ OLAN ÇOCUĞA SAHİP EBEVEYNLERİN DENEYİMLERİ: NİTEL BİR ÇALIŞMA	**Arş. Gör. Dr. Melek Akgün Özbey** **Arş. Gör. Dr. Harun Özbey** **Doç. Dr. Yağmur Sezer Efe** **Prof. Dr. Meral Bayat** **Prof. Dr. İsmail Dursun** **Doç. Dr. Sibel Yel**
3	İLERİ PREMATÜRE DOĞUMDA ZİHİNSEL SENKRONİZASYON KAYBI ÜZERİNE	**Öğr. Gör. Dr., Eda Öztürk Belet**
4	Peganum harmala (Üzerlik) Bitkisinin Fenolik Bileşenlerinin Belirlenmesi	**Assist Prof. Dr. Muhammed GÜNGÖREN** **Assist. Prof. Dr. Mustafa Yunus EMRE** **Assist. Prof. Dr. Ümmügülsüm TÜKENMEZ EMRE**
5	DOES HUMAN DEVELOPMENT TRANSLATE INTO HEALTH SYSTEM EFFICIENCY? A TWO-STAGE DEA AND SIMAR–WILSON BOOTSTRAP ANALYSIS	**Assist. Prof. Yasin ARAS**
6	THE EFFECT OF THE FIFA 11+ WARM-UP PROGRAM APPLIED TO YOUNG SOCCER PLAYERS ON SELECTED MOTOR PARAMETERS	**Evren ÇELİK** **Dr. Öğr. Üyesi Ömer AKSOY**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 2	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:00 – 13:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Prof. Dr. Berat KARAAGAC		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	KARBON SALIMLARININ MATEMATİKSEL OPTİMİZASYONU: TÜRKİYE'NİN 2053 NET SIFIR HEDEFİ İÇİN BİR MODELLEME YAKLAŞIMI	**Öğr. Gör. Betül ÖZTEL** **Ahmet KIZKAPAN**
2	ÖDEME GECİKMESİ RİSKİ ALTINDA BÜTÇE KISITLI MÜDAHALE OPTİMİZASYONU	**Öğr. Gör. Betül ÖZTEL** **Öğr. Gör. Gülfer YILDIZ**
3	METRİKTEN GÖREVE: SU ALTI GÖRÜNTÜ İYİLEŞTİRME SİSTEMLERİ İÇİN ÇOK KATMANLI BİR DEĞERLENDİRME VE RAPORLAMA ÇERÇEVESİ	**Öğr. Gör. Kübra DEMİR**
4	HASTA BAKIM UYGULAMALARINDA MATEMATİK DESTEKLİ YAPAY ZEKA UYGULAMALARI: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLER	**Dr, Ahmet YILDIRIM** **Dr.Ogr.Uyesi, Nilufer YILDIRIM**
5	ASTRONOMİK GÖZLEMLERDE DERİN ÖĞRENME İLE HEDEF TANIMA	**Furkan Çağrı YILMAZ** **Doç. Dr. Burak ULAŞ**
6	AN APPLICATION OF THE MODIFIED EXPONENTIAL FUNCTION METHOD	**Adalet ERDİNÇ** **Tanfer TANRIVERDİ**
7	EXTENDED HYPERBOLIC FUNCTION METHOD FOR THE (2+1) DIMENSIONAL CONFORMABLE TIME-FRACTIONAL ZOOMERON EQUATION	**Prof. Dr. Berat KARAAGAC**
8	AN ADI FINITE DIFFERENCE SCHEME FOR THE (2+1)-DIMENSIONAL HUXLEY EQUATION	**Prof. Dr. Berat KARAAGAC**
9	DEVELOPMENT AND SPATIAL ANALYSIS OF A SOCIOECONOMİC VULNERABILITY INDEX FOR TURKISH PROVİINCES USİNG PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS	**Dr. Cenk İÇÖZ**

No: 1

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 3	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:00 – 13:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Gültekin Gürçay		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	NORMALIZED-ERROR AND HYSTERESIS-BASED CLOSED-LOOP CONTROL ALGORITHM FOR LDR-BASED DUAL-AXIS SOLAR TRACKING ON ARDUINO UNO	**Engin CAN** **Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR**
2	DESIGN AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE ENERGY PERFORMANCE OF AN LDR-BASED DUAL-AXIS SOLAR TRACKING PROTOTYPE	**Engin CAN** **Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR**
3	VITALUMOS: AN STM32-BASED PORTABLE BIOMEDICAL DATA MEASUREMENT SYSTEM	**Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN** **Rumeysa İRKİN**
4	TURK-DOC: ARTIFICIAL INTELLIGENCE-SUPPORTED VOICE ASSISTANT SYSTEM FOR TURKISH CLINICAL DOCUMENTATION	**Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN** **Emirhan EDİS**
5	SHIELD-ICS: ENDÜSTRİYEL KONTROL SİSTEMLERİNDE LLM TABANLI OTONOM AJANLAR İÇİN YEDİ KATMANLI SAVUNMA MİMARİSİ, TESTBED TASARIMI VE İLK KAVRAMSAL KANIT BULGULARI	**Ahmed Yaseen Bishree AL-ANI** **Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ**
6	ENDÜSTRİYEL KONTROL SİSTEMLERİNDE LLM TABANLI OTONOM AJANLAR İÇİN TEHDİT TAKSONOMİSİ VE GENİŞLETİLMİŞ TEHDİT MODELİ	**Ahmed Yaseen Bishree AL-ANI** **Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ**
7	PARABOLIK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLERINDE YUTUCU BORU İÇ ÇAPI OPTIMIZASYONU	**Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇATALKAYA**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 4	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:00 – 13:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	DEMİRYOLU YOL GEOMETRİSİ PARAMETRELERİNİN YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (BIM) 7D BOYUTU İLE TAKİBİNİN İNCELENMESİ	**Ali KURT** **Prof. Dr. Ali TOPAL**
2	COLD-BONDED ARTIFICIAL AGGREGATES FROM 75 µm COLEMANITE AND ULEXITE POWDERS USING CEMENT AND REACTIVE MgO BINDERS	**Youssef ALKHABAZE** **Prof. Dr. Orhan CANPOLAT** **Dr. Hasan YILDIRIM** **Prof. Dr. Mücteba UYSAL** **Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ** **Doç. Dr. Abdullah Huzeyfe AKCA** **Doç. Dr. Metin MEHMETOĞLU** **Dr. Öğr. Üyesi Rafet ŞİŞMAN** **Arş. Gör. Dr. Burcu DİNÇ ŞENGÖNÜL** **Dr. Abdullah ÇELİK** **Esra IŞIKAKDOĞAN**
3	PERFORMANCE OF 45 µm COLEMANITE- AND ULEXITE-BASED ARTIFICIAL AGGREGATES PRODUCED WITH CEMENT AND HIGH-CALCINED MgO	**Esra IŞIKAKDOĞAN** **Prof. Dr. Orhan CANPOLAT** **Dr. Hasan YILDIRIM** **Prof. Dr. Mücteba UYSAL** **Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ** **Doç. Dr. Abdullah Huzeyfe AKCA** **Doç. Dr. Metin MEHMETOĞLU** **Dr. Öğr. Üyesi Rafet ŞİŞMAN** **Arş. Gör. Dr. Burcu DİNÇ ŞENGÖNÜL** **Dr. Abdullah ÇELİK** **Youssef ALKHABAZE**
4	INFLUENCE OF INFILL TYPE ON THE CHARPY IMPACT BEHAVIOUR OF FFF-PRINTED CARBON FIBRE REINFORCED PLA COMPONENTS	**Assist. Prof. Dr. Mehmet Çağatay Akbolat**
5	MİKRON BOYUTLU CAM ELYAF TOZUNUN ODUN-PLASTİK KOMPOZİTLERİN BAZI TEKNOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI	**Ferhat ÖZ** **Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ACAR**
6	FORDİZM BAĞLAMINDA KENTSEL PEYZAJIN BİÇİMLENİŞİ: ÜRETİM REJİMİNDEN MEKÂNSAL SÜREKLİLİKLERE	**YL. Öğr. Aslıhan UYGUN** **Doç. Dr. Elif SAĞLIK**

No: 5

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 5	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:00 – 13:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Doç. Dr. Arzu ULVİ		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	COMBINING ABILITY AND HETEROSIS FOR SOME YIELD AND FIBER TRAITS IN INTERSPECIFIC COTTON (*Gossypium hirsutum* L. × *Gossypium barbadense* L.) CROSSES	**Mustafa YAŞAR** **Remzi EKİNCİ**
2	Comparison of Oilseed SUNFLOWER (*Helianthus annuus* L.) GENOTYPES FOR YIELD AND SELECTED AGRONOMIC TRAITS UNDER MUŞ ECOLOGICAL CONDITIONS	**Mustafa YAŞAR** **Remzi EKİNCİ**
3	EFFECTS OF ROBOTIC FEEDING ON MILKING MANAGEMENT AND HERD PERFORMANCE IN AUTOMATIC MILKING SYSTEMS FOR DAIRY CATTLE	**Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKDAĞ**
4	NDVI GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİNİN ÇAYIR VE MERALARDA KULLANIMI	**Talha KİTAPÇI** **Dr. Öğr. Üyesi Zübeyir AĞIRAĞAÇ** **Prof. Dr. Şeyda ZORER ÇELEBİ**
5	YEM BİTKİLERİNDE HASAT KAYIPLARI: NEDENLER, BOYUTLAR VE AZALTMA STRATEJİLERİ	**Dr. Öğr. Üyesi Zübeyir AĞIRAĞAÇ** **Talha KİTAPÇI** **Prof. Dr. Şeyda ZORER ÇELEBİ**
6	KENTSEL ATIKSUDA DİYABET İLAÇLARI VE ARITMA TESİSİNDE GİDERİMLERİ	**Doç. Dr. Arzu ULVİ** **Prof. Dr. Senar AYDIN** **Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN**
7	YÜZEYSEL SULARDA POLİBROMLU DİFENİL ETERLER (PBDE) VE SAĞLIK ETKİLERİ	**Doç. Dr. Arzu ULVİ** **Prof. Dr. Senar AYDIN** **Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN**

No: 4

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 6	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:00 – 13:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. NİHAT YUMUŞAK		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	SCREENING OF PROTEASE-PRODUCING BACTERIA AND FUNGI ISOLATED FROM TRADITIONAL ERZURUM CHEESE	**Arife BİLGİÇ** **Assoc. Prof. Dr. Sümeyra GÜRKÖK**
2	JELMA/PEGDA BİYOKOMPOZİTLERİN SENTEZİ VE DOKU MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI	**Dr. Sabiha DEMİRCİ CENGİZ** **Prof. Dr. Fatma AYHAN**
3	RUMİNANTLARIN MAVİ DİL HASTALIĞINDA PATOLOJİK DEĞERLENDİRMELER	**Dr. NİHAT YUMUŞAK**
4	SIĞIRLARDA PARATÜBERKÜLOZ HASTALIĞININ MAKROSKOPİK VE HİSTOPATOLOJİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ	**Dr. NİHAT YUMUŞAK**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 7	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:30 – 13:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Ming-Hao Wang		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	INVESTIGATION OF BACTERIAL CONTAMINATION AND ANTIBIOTIC RESISTANCE PROFILES IN LIBYAN HOSPITAL SURGICAL UNITS AND INTENSIVE CARE ENVIRONMENTS	**Prof. Dr. Ahmed Al-Maghribi** **Salma El-Fituri** **Omar Ben Yusuf**
2	ASSESSMENT OF MICROBIAL DIVERSITY AND PATHOGENIC LOAD IN DESERT WATER RESOURCES AND URBAN SUPPLY SYSTEMS IN LIBYA	**Dr. Aisha El-Hassi** **Assoc. Prof. Dr. Omar Ben Yusuf** **Ahmed Al-Maghribi**
3	GENOMIC ANALYSIS OF EXTREME ENVIRONMENT ADAPTED MICROBES IN INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ZONES OF KAZAKHSTAN	**Prof. Dr. Ayan Nursultanov** **Dana Karimova** **Yerlan Sadykov** **Aigerim Sarsenova**
4	EVALUATION OF PROBIOTIC BACTERIAL STRAINS FOR IMPROVING GUT MICROBIOTA AND IMMUNE RESPONSE IN CENTRAL ASIAN POPULATIONS	**Assoc. Prof. Dr. Dana Karimova** **Dr. Yerlan Sadykov** **Ayan Nursultanov**
5	METAGENOMIC PROFILING OF ANTIBIOTIC RESISTANCE GENES IN AQUATIC ECOSYSTEMS AND COASTAL WATERS OF EAST ASIA	**Wei-Chen Lin** **Yu-Hsuan Chen** **Chia-Ling Huang**
6	CHARACTERIZATION OF NOVEL MARINE MICROORGANISMS WITH BIOACTIVE COMPOUND POTENTIAL FROM TAIWANESE COASTAL REGIONS	**Dr. Ming-Hao Wang** **Assoc. Prof. Dr. Chia-Ling Huang** **Wei-Chen Lin**
7	DEVELOPMENT OF MICROBIOME-BASED DIAGNOSTIC MODELS FOR EARLY DETECTION OF INFECTIOUS DISEASES USING MACHINE LEARNING APPROACHES IN CLINICAL MICROBIOLOGY	**Prof. Dr. Yu-Hsuan Chen** **Dr. Wei-Chen Lin** **Ming-Hao Wang** **Chia-Ling Huang**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 8	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:30 – 13:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Aigerim Kassym		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE AND MOLECULAR CHARACTERIZATION OF BRUCELLOSIS IN SMALL RUMINANTS IN NORTH AFRICA	**Youssef El Amrani** **Dr. Salma Benkirane**
2	ANTIMICROBIAL RESISTANCE PATTERNS IN BOVINE MASTITIS PATHOGENS AND STRATEGIES FOR DAIRY HERD MANAGEMENT	**Assoc. Prof. Dr. Nadia Rachidi** **Hassan Ait Lamine**
3	EFFECTS OF CLIMATE VARIABILITY ON TICK-BORNE DISEASE PREVALENCE IN CATTLE POPULATIONS IN EAST AFRICA	**Dr. Asha Mkwawa** **Prof. Dr. John Mrema**
4	EVALUATION OF ANIMAL WELFARE PRACTICES IN SMALL-SCALE POULTRY FARMS AND THEIR IMPACT ON PRODUCTIVITY	**Dr. Neema Komba**
5	ADVANCES IN VETERINARY PARASITOLOGY: CONTROL OF ECHINOCOCCOSIS IN RURAL LIVESTOCK SYSTEMS	**Assoc. Prof. Dr. Aidos Sarsenov** **Dr. Gulnar Zhakupova**
6	APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DIAGNOSING CANINE CARDIAC DISEASES IN CENTRAL ASIA	**Prof. Dr. Marat Nursultanov** **Dr. Aigerim Kassym**
7	MOLECULAR EPIDEMIOLOGY OF AVIAN INFLUENZA VIRUSES IN COMMERCIAL POULTRY FARMS IN EAST ASIA	**Dr. Wei-Lun Chen** **Assoc. Prof. Dr. Mei-Hua Lin**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 9	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:30 – 13:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Dana Sarsenova		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	SUSTAINABLE IRRIGATION MANAGEMENT AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN ARID AGRICULTURAL REGIONS OF MOROCCO WITH WATER EFFICIENCY OPTIMIZATION	**Prof. Dr. Youssef El Amrani** **Dr. Salma Benali** **Assoc. Prof. Dr. Omar Kettani**
2	SOIL SALINITY CONTROL AND CLIMATE RESILIENT OLIVE CULTIVATION STRATEGIES IN MEDITERRANEAN AGRICULTURAL ZONES OF MOROCCO	**Dr. Amina Rachid** **Prof. Dr. Hassan El Fassi**
3	CLIMATE SMART COFFEE PRODUCTION SYSTEMS AND SUSTAINABLE FARMING PRACTICES FOR SMALLHOLDER FARMERS IN TANZANIA	**Assoc. Prof. Dr. John Mwangi** **Dr. Neema Kiwelu** **Prof. Dr. Salim Hassan**
4	MAIZE YIELD ENHANCEMENT THROUGH INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND DIGITAL AGRICULTURAL MONITORING SYSTEMS IN TANZANIA	**Dr. Peter Mushi** **Assoc. Prof. Dr. Grace Nyerere** **Dr. David Seko**
5	PRECISION AGRICULTURE TECHNOLOGIES FOR WINTER WHEAT PRODUCTION IMPROVEMENT IN THE STEPPE REGIONS OF KAZAKHSTAN	**Prof. Dr. Aibek Nurmaganbet** **Dr. Dana Sarsenova** **Assoc. Prof. Dr. Yerlan Tolegen**
6	SUSTAINABLE PASTURE MANAGEMENT AND LIVESTOCK GRAZING OPTIMIZATION MODELS USING REMOTE SENSING IN KAZAKHSTAN RURAL ECOSYSTEMS	**Dr. Marat Kenzhebek** **Prof. Dr. Gulnara Akhmetova** **Assis. Prof. Dr. Nursultan Abilov**
7	PRECISION VITICULTURE AND SMART IRRIGATION SYSTEMS FOR HIGH QUALITY GRAPE PRODUCTION IN RIOJA WINE REGIONS OF SPAIN	**Assoc. Prof. Dr. Lucia Herrera** **Dr. Javier Alonso**
	SUSTAINABLE OLIVE OIL PRODUCTION SYSTEMS AND ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION STRATEGIES IN ANDALUSIAN AGRICULTURE OF SPAIN	**Dr. Maria Gonzalez** **Prof. Dr. Antonio Ruiz**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 10	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:30 – 13:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Marat Kenzhebek		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	SUSTAINABLE IRRIGATION MANAGEMENT AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN ARID AGRICULTURAL REGIONS OF MOROCCO WITH WATER EFFICIENCY OPTIMIZATION	**Prof. Dr. Youssef El Amrani** **Dr. Salma Benali** **Assoc. Prof. Dr. Omar Kettani**
2	SOIL SALINITY CONTROL AND CLIMATE RESILIENT OLIVE CULTIVATION STRATEGIES IN MEDITERRANEAN AGRICULTURAL ZONES OF MOROCCO	**Dr. Amina Rachid** **Prof. Dr. Hassan El Fassi**
3	CLIMATE SMART COFFEE PRODUCTION SYSTEMS AND SUSTAINABLE FARMING PRACTICES FOR SMALLHOLDER FARMERS IN TANZANIA	**Dr. John Mwangi** **Dr. Neema Kiwelu** **Dr. Salim Hassan**
4	MAIZE YIELD ENHANCEMENT THROUGH INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND DIGITAL AGRICULTURAL MONITORING SYSTEMS IN TANZANIA	**Dr. Peter Mushi** **Assoc. Prof. Dr. Grace Nyerere** **Dr. David Seko**
5	PRECISION AGRICULTURE TECHNOLOGIES FOR WINTER WHEAT PRODUCTION IMPROVEMENT IN THE STEPPE REGIONS OF KAZAKHSTAN	**Prof. Dr. Aibek Nurmaganbet** **Dr. Dana Sarsenova** **Assoc. Prof. Dr. Yerlan Tolegen**
6	SUSTAINABLE PASTURE MANAGEMENT AND LIVESTOCK GRAZING OPTIMIZATION MODELS USING REMOTE SENSING IN KAZAKHSTAN RURAL ECOSYSTEMS	**Dr. Marat Kenzhebek**
7	PRECISION VITICULTURE AND SMART IRRIGATION SYSTEMS FOR HIGH QUALITY GRAPE PRODUCTION IN RIOJA WINE REGIONS OF SPAIN	**Carlos Mendez** **Assoc. Prof. Dr. Lucia Herrera** **Dr. Javier Alonso**
8	SUSTAINABLE OLIVE OIL PRODUCTION SYSTEMS AND ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION STRATEGIES IN ANDALUSIAN AGRICULTURE OF SPAIN	**Dr. Maria Gonzalez** **Prof. Dr. Antonio Ruiz**
9	HIGH-TECH GREENHOUSE HORTICULTURE AND CLIMATE CONTROLLED AGRICULTURAL INNOVATIONS IN SOUTHERN SPAIN ALMERIA REGION	**Assoc. Prof. Dr. Elena Vargas** **Dr. Miguel Torres** **Prof. Dr. Rafael Castillo**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 11	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:30 – 13:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Assis .Prof. Dr. Matías Valenzuela		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	GENOME EDITING STRATEGIES USING CRISPR-CAS SYSTEMS FOR TARGETED THERAPEUTIC APPLICATIONS IN HUMAN DISEASE MODELS	**Prof. Dr. Salma Qadiri** **Amina El Idrissi** **Youssef Benali**
2	BIOENGINEERED NANOPARTICLES FOR CONTROLLED DRUG DELIVERY AND ENHANCED CELLULAR UPTAKE IN CANCER THERAPY	**Dr. Rachid El Amrani** **Assoc. Prof. Dr. Leila Bouzid** **Hassan El Fassi**
3	SYNTHETIC BIOLOGY APPROACHES FOR MICROBACTERIAL PRODUCTION OF HIGH-VALUE BIOFUELS UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS	**Assoc. Prof. Dr. Emeka Nwosu** **Dr. Aisha Bello** **Chinedu Okafor** **Kehinde Adeyemi**
4	BIOTECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS IN PLANT-BASED BIOPESTICIDES FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN SUB-SAHARAN ENVIRONMENTS	**Prof. Dr. Ngozi Umeh** **Dr. Ibrahim Musa** **Amina Suleiman**
5	RECOMBINANT PROTEIN ENGINEERING FOR NEXT-GENERATION VACCINE DEVELOPMENT AGAINST EMERGING VIRAL PATHOGENS	**Dr. Salma El Sharif** **Hassan Al-Farjani** **Assoc. Prof. Dr. Nadia Al-Sadi**
6	MICROBIAL FUEL CELL TECHNOLOGIES FOR WASTEWATER TREATMENT AND RENEWABLE ENERGY GENERATION IN ARID REGIONS	**Omar Al-Maghribi** **Dr. Lina Ben Youssef** **Prof. Dr. Khaled Al-Din**
7	GENE THERAPY VECTOR OPTIMIZATION FOR NEURODEGENERATIVE DISEASE TREATMENT USING LENTIVIRAL AND AAV SYSTEMS	**Assis .Prof. Dr. Matías Valenzuela**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 12	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:30 – 13:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Assoc. Prof. Dr. Ibrahim Musa		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	IMPACT OF URBAN AIR POLLUTION ON RESPIRATORY HEALTH OUTCOMES IN NORTH AFRICAN METROPOLISES	**Prof. Dr. Youssef El Amrani** **Dr. Salma Benkiran**
2	TELEMEDICINE ADOPTION AND HEALTHCARE ACCESSIBILITY IN RURAL MOROCCO: A SYSTEMATIC ANALYSIS	**Assoc. Prof. Dr. Amina Qadiri** **Dr. Omar Zaoui** **Fatima Ezzahra El Idrissi**
3	COMMUNITY-BASED MALARIA CONTROL STRATEGIES AND PUBLIC HEALTH EFFECTIVENESS IN WEST AFRICA	**Prof. Dr. Chinedu Okafor** **Dr. Aisha Bello** **Emeka Nwosu** **Dr. Kemi Adebayo**
4	MENTAL HEALTH BURDEN AMONG ADOLESCENTS IN URBAN NIGERIA: SOCIOECONOMIC AND EDUCATIONAL CORRELATES	**Assoc. Prof. Dr. Ibrahim Musa** **Dr. Grace Adeola** **Samuel Okoye**
5	HEALTHCARE SYSTEM RESILIENCE AND POST-CONFLICT RECOVERY MODELS IN LIBYA	**Prof. Dr. Khaled Al Mansouri** **Dr. Mariam El Sherif** **Assoc. Prof. Dr. Nabil Faraj**
6	NON-COMMUNICABLE DISEASE PREVENTION STRATEGIES IN LIBYA: POLICY IMPLEMENTATION AND COMMUNITY ENGAGEMENT	**Dr. Huda Ben Ali** **Prof. Dr. Ahmed El Rafi** **Salim Abukhattala** **Dr. Rania Mansour**
7	IMPROVING PRIMARY HEALTHCARE DELIVERY IN CHILEAN RURAL COMMUNITIES THROUGH DIGITAL HEALTH INTEGRATION	**Prof. Dr. Valentina Rojas** **Dr. Camila Sepúlveda** **Assoc. Prof. Dr. Rodrigo Valdés**
8	EPIDEMIOLOGICAL TRENDS OF CARDIOVASCULAR DISEASES AMONG ELDERLY POPULATIONS IN CHILE: A LONGITUDINAL STUDY	**Dr. Nicolás Herrera** **Prof. Dr. Fernanda Loyola**
9	CLIMATE CHANGE AND EMERGING VECTOR-BORNE DISEASE RISKS IN CHILE: A PUBLIC HEALTH FORECASTING MODEL	**Assoc. Prof. Dr. Martina Cárdenas** **Dr. José Miguel Torres** **Prof. Dr. Andrea Salgado**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES			
SESSION - HALL Session 1 – Hall 13	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 11:30 – 13:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Assoc. Prof. Dr. Amina El Idrissi		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	THREE-DIMENSIONAL PRINTING TECHNOLOGIES IN MAXILLOFACIAL SURGERY: CLINICAL APPLICATIONS, LIMITATIONS, AND FUTURE PERSPECTIVES	**Prof. Dr. Jean-Luc Fournier** **Dr. Élodie Mercier** **Antoine Girard** **Marie Lefevre**
2	ADVANCES IN DIGITAL DENTISTRY FOR COMPLEX ORAL REHABILITATION: A CLINICAL EVALUATION OF CAD/CAM-GUIDED TREATMENT OUTCOMES IN ADULT PATIENTS	**Prof. Dr. Youssef El Mansouri** **Dr. Salma Benjelloun**
3	ASSESSMENT OF PERIODONTAL HEALTH AWARENESS AND PREVENTIVE ORAL CARE PRACTICES AMONG UNIVERSITY STUDENTS IN URBAN COMMUNITIES	**Assoc. Prof. Dr. Amina El Idrissi**
4	THE EFFECTIVENESS OF MINIMALLY INVASIVE RESTORATIVE TECHNIQUES IN THE MANAGEMENT OF EARLY CHILDHOOD CARIES: A LONGITUDINAL STUDY	**Prof. Dr. Arben Kola** **Elira Hoxha** **Dr. Gentian Leka**
5	EVALUATION OF PATIENT SATISFACTION AND FUNCTIONAL OUTCOMES FOLLOWING IMPLANT-SUPPORTED PROSTHETIC REHABILITATION IN ELDERLY INDIVIDUALS	**Assis. Prof. Dr. Klodiana Dervishi** **Dr. Besnik Shehu**
6	ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN ORAL RADIOLOGY: IMPROVING DIAGNOSTIC ACCURACY FOR MAXILLOFACIAL PATHOLOGIES	**Prof. Dr. Fahad Al-Rashidi** **Noura Al-Enezi** **Dr. Abdullah Al-Harbi** **Sara Al-Mutairi**
7	CLINICAL AND MICROBIOLOGICAL EVALUATION OF NOVEL ANTIBACTERIAL AGENTS IN THE PREVENTION OF PERI-IMPLANT DISEASES	**Assoc. Prof. Dr. Maha Al-Sabah**
8	LONG-TERM PERFORMANCE OF CERAMIC VENEERS IN ESTHETIC DENTISTRY: FACTORS INFLUENCING SURVIVAL RATES AND PATIENT SATISFACTION	**Prof. Dr. Pierre Dubois** **Dr. Camille Laurent**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 1	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:00 – 17:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Gültekin Gürçay		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	ONLINE EDUCATION AND REIMAGINING OF TEACHING PEDAGOGY DURING THE CRISIS	**Dr Monisa Qadiri**
2	YEDİNCİ SINIF ÖĞRENCİLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLEME BECERİLERİNİN BİR MODELLEME PROBLEMİ BAĞLAMINDA İNCELENMESİ	**Duygu DAYAN**
3	RUSÇA VE TÜRKÇEDE KALIP SÖZLER: “TANRI” VE “ŞEYTAN” İÇEREN YAPILARIN KARŞILAŞTIRMALI BİR İNCELEMESİ	**Dr. Öğr. Üyesi Mariana BUDU**
4	JAPON KÜLTÜRÜNDE ŞANS GETİREN OBJELERİN SEMBOLİK VE KÜLTÜREL İŞLEVLERİ	**Arş. Gör. Dr. Güliz DOĞAN**
5	BİR ŞÂRİHİN KÜTÜPHANESİ: CEVÂHİR-İ BEVÂHİR-İ MESNEVÎ’NİN EDEBÎ-TASAVVUFÎ KAYNAKLARI VE BU KAYNAKLARIN METNİN İNŞASINDAKİ ROLÜ ÜZERİNE BİR İNCELEME	**Dr. Sait AVCI**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 2	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:00 – 17:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Doç. Dr. Canan YILDIRAN		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	MEASURING AND IMPROVING PROCESS PERFORMANCE IN LEAN MANUFACTURING THROUGH DIGITALIZATION	**Doktora Öğrencisi Kübra ARSLAN** **Prof. Dr. Mehmet Mustafa YÜCEL** **Öğr. Gör. Fatma Sümeyye ERARSLAN**
2	BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF THE LEAN AGRICULTURE LITERATURE: CURRENT SITUATION AND FUTURE TRENDS	**Öğr. Gör. Fatma Sümeyye ERARSLAN** **Prof. Dr. Mehmet Mustafa YÜCEL** **Doktora Öğrencisi Kübra ARSLAN**
3	REFERANS NOKTASI BAĞIMLILIĞI VE DİNAMİK FİYATLANDIRMA: BEKLENTİ TEORİSİ ÇERÇEVESİNDE HAVAYOLU VE OTEL SEKTÖRÜNDE İNDİRİM ALGISI İLE KAYIP KORKUSUNUN TEORİK MODELLENMESİ	**Doç. Dr. Sezen GÜNGÖR** **Dr. Kader EROL**
4	DUYGUSAL MUHASEBE, MARKA DEĞERİ VE PREMİUM FİYATLANDIRMA: TÜKETİCİ TERCİHLERİNDE DUYGUNUN RASYONEL ANALİZİN ÖNÜNE GEÇMESİ	**Dr. Kader EROL** **Doç. Dr. Sezen GÜNGÖR**
5	ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK FARKINDALIĞI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA	**Doç. Dr. Canan YILDIRAN**
6	CURRENT SITUATION ANALYSIS AND NEW TRENDS IN THE AUTOMOTIVE SECTOR	**Assist. Prof. Dr. Zeynep ÖZER** **Graduate Student Yasemin YÜRÜK**

No: 4

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 3	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:00 – 17:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Öğr. Üyesi Elif ATICI TEKTAŞ		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	PROFESSİONALİZATİON İN MUSİC THERAPHY: THE CONSTRUCTİON OF IDENTİTY AND THE BAUNDARİES OF PRACTİCE	**Ezel ÇINAR**
2	FOTOĞRAFIN KARANLIK NESNESİ: GÖRÜLEMEYENİN GÖRÜNTÜLENMESİ	**Dr. Öğr. Üyesi M. Uluç CEYLANİ**
3	KOCAELİ'DE YENİ DANS ÜRETİMİ	**Nurdan KILIÇ** **Doç. Dr. Bekir Şahin BALOĞLU** **Doç. Dr. Sonay ÖDEMİŞ**
4	THE SILENT BOUNDARIES OF URBAN MEMORY: GENDER AND INTERGENERATIONAL SPATIAL SEGREGATION IN ESKİŞEHİR	**Dr. Öğr. Üyesi Elif ATICI TEKTAŞ**
5	AN EVALUATION OF THE USE OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN THE VISUALIZATION OF URBAN MEMORY	**Dr. Öğr. Üyesi Elif ATICI TEKTAŞ**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 4	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:00 – 17:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Öğrt. Üyesi Tuncay SARIİPEK		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	THE ROLE OF TRANSNATIONAL CORPORATIONS: FDI, OIL PRICES AND OIL-EXPORT DYNAMICS — EVIDENCE FROM AZERBAIJAN	**Khayal Amiraslanov**
2	THEORETICAL-METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF E-COMMERCE DEVELOPMENT IN THE CONSUMER ELECTRONICS MARKET: AN ECONOMIC OPTIMIZATION PERSPECTIVE	**PHD candidate Ramin Namazov**
3	THE IMPACT OF UNITED STATES ADMINISTRATIONS ON GOLD PRICE VOLATILITY: THE NOVEMBER 2000 – NOVEMBER 2024 PERIOD	**Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇAYIR**
4	Türkiye'de Sosyal Güvenlik Politikaları ve Siyasal İktidar İlişkisi: 1980 Sonrası Dönüşüm Analizi	**Nazlı YİĞİT SİNANLI**
5	SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK STRATEJİLERİ: KENTSEL ULAŞIMDA YENİ BİR PLANLAMA YAKLAŞIMI	**Emrah AZBAY**
6	AREAS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE USE IN SPORTS MANAGEMENT: A REVIEW STUDY	**Dr. Öğrt. Üyesi Tuncay SARIİPEK**
7	ULUSLARARASI SPOR HUKUKUNDA DOPİNG VE ŞİKE SUÇLARININ HUKUKİ ANALİZİ: CAS KARARLARI VE ULUSAL DÜZENLEMELER	**Dr. Öğrt. Üyesi Tuncay SARIİPEK**

No: 5

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 5	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:00 – 17:00	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Öğr. Üyesi Tuba SÜTLÜOĞLU		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	DİJİTAL OYUNLARDA LOOT BOX VE KASA AÇMA MEKANİKLERİ KUMAR DAVRANIŞINA NASIL YÖNLENDİRİYOR?	**Beylem Sevde SAĞLAM** **Hakan KARAMAN**
2	SOCIAL SERVICE POLICIES OF LOCAL GOVERNMENTS TOWARDS FOREIGN-NATIONAL WOMEN: A CONTENT ANALYSIS	**Öğr. Gör. Hülya Karakartal** **Ar. Gör. Gökçe Ceylan**
3	SOCIAL MEANINGS ATTRIBUTED TO EARTHQUAKES: A SOCIOLOGICAL STUDY FROM THE FIELD	**Dr. Öğr. Üyesi Tuba SÜTLÜOĞLU** **Doç. Dr. Tuba GÜN ÇINGI**
4	FEELINGS OF GUILT AND SHAME, SELF-ESTEEM, AND PSYCHOLOGICAL DISTRESS SYMPTOMS ACCORDING TO GENDER AND MARITAL STATUS	**Psikolog Ahmet ÖZEN** **Prof. Dr. Fatmagül CİRHİNLİOĞLU** **Psikolog Secihan METİN**
5	TÜRKÇE SINIFINDA YERSİZYURTSUZLAŞMA: GÖÇMEN ÇOCUKLARIN DİLSEL SESSİZLİK VE ÖĞRENCİ-OLUŞ DENEYİMLERİ	**Psikolog Şeyhmus ÜSTÜNDAĞ**
6	DİN PSİKOLOJİSİ PERSPEKTİFİNDEN BAĞLANMA VE GRUBA BAĞLILIK KAPSAMINDA BEYİN YIKAMA ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME	**Dr. Öğr. Üyesi Bilal KARTAL** **Öğr. Ahmet AKTÜRK**

No: 1

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 6	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:30 – 17:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Dr. Madina Kassenova		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	EPISTEMOLOGICAL FOUNDATIONS OF DIGITAL ETHICS IN MODERN NORTH AFRICAN THOUGHT	**Prof. Dr. Youssef El Amrani** **Dr. Salma Bennis**
2	PHENOMENOLOGICAL READINGS OF IDENTITY AND MEMORY IN CONTEMPORARY MAGHREB PHILOSOPHY	**Assoc. Prof. Dr. Amina El Khatib** **Dr. Rachid Benali** **Dr. Leila Zahir**
3	AFRICAN COMMUNALISM AND THE LIMITS OF WESTERN INDIVIDUALISM IN MORAL PHILOSOPHY	**Dr. John M. Nyerere** **Assoc. Prof. Dr. Asha K. Mboya** **Prof. Dr. Elias M. Chuma**
4	ONTOLOGY OF TRADITION: RETHINKING UBUNTU-LIKE CONCEPTS IN EAST AFRICAN EPISTEMOLOGY	**Dr. Neema S. Mwinyi** **Prof. Dr. David O. Kileo**
5	THE DIALECTICS OF MODERNIZATION AND CULTURAL MEMORY IN CENTRAL ASIAN PHILOSOPHICAL DISCOURSE	**Dr. Ayan Tursynbek** **Dr. Madina Kassenova**
6	LOGICAL STRUCTURES AND ETHICAL FORMALISM IN POST-SOVIET PHILOSOPHICAL THOUGHT	**Assoc. Prof. Dr. Yerlan Akhmetov** **Dr. Gulnara Sadykova** **Prof. Dr. Timur Zhakupov**
7	CONTEMPORARY SPANISH PRAGMATISM AND THE RECONSTRUCTION OF PUBLIC REASON	**Prof. Dr. Javier M. Ortega** **Dr. Lucia Fernández** **Assoc. Prof. Dr. Marta I. Ríos**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 7	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:30 – 17:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Assoc. Prof. Dr. Nadia Kettani		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	CRITICAL DISCOURSE ANALYSIS IN MODERN ARABIC LITERATURE AND IDENTITY CONSTRUCTION	**Prof. Dr. Amina El Mansouri** **Dr. Youssef Benkirane** **Dr. Salma Rachidi**
2	DIGITAL TRANSFORMATION OF LANGUAGE TEACHING IN MOROCCAN HIGHER EDUCATION SYSTEMS	**Assoc. Prof. Dr. Nadia Kettani** **Dr. Omar Zahir** **Prof. Dr. Hicham El Amrani**
3	POSTCOLONIAL NARRATIVES AND POWER STRUCTURES IN WEST AFRICAN LITERARY TEXTS	**Prof. Dr. Chinedu Okafor** **Dr. Aisha Bello** **Assoc. Prof. Dr. Ibrahim Sani** **Dr. Grace Nwosu**
4	LINGUISTIC HYBRIDITY AND CULTURAL MEMORY IN CONTEMPORARY NIGERIAN FICTION	**Dr. Tunde Adebayo** **Dr. Zainab Musa** **Dr. Nkechi Umeh**
5	ORAL TRADITIONS AND MODERN POETIC FORMS IN LIBYAN LITERARY HERITAGE	**Assoc. Prof. Dr. Khaled Al-Maghrebi** **Dr. Salma Faraj** **Prof. Dr. Abdul Rahman El-Hadi**
6	TRANSLATION STRATEGIES AND SEMANTIC LOSS IN ARABIC-ENGLISH LITERARY TRANSFER Dr. Mariam Al-Darsi	**Dr. Fathi Ben Ali** **Dr. Yasser Mahmoud** **Dr. Lina Al-Khouri**
7	CULTURAL MEMORY AND INDIGENOUS LANGUAGE PRESERVATION IN CHILEAN LITERATURE	**Prof. Dr. Isabel Valdivia** **Dr. Camila Rojas** **Assoc. Prof. Dr. Rodrigo Mendoza**
8	NARRATIVE IDENTITY AND SOCIAL TRANSFORMATION IN CONTEMPORARY CHILEAN NOVELS	**Dr. Pablo Herrera** **Prof. Dr. Fernanda Salazar** **Dr. Matías Contreras** **Assoc. Prof. Dr. Elena Vargas**
9	ECOCRITICISM AND LANDSCAPE REPRESENTATION IN LATIN AMERICAN POETRY	**Assoc. Prof. Dr. Javier Molina** **Dr. Sofía Reyes** **Prof. Dr. Diego Fernández**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 8	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:30 – 17:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Assoc. Prof. Dr. Pierre Dubois		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	DIGITAL TRANSFORMATION AND SME PERFORMANCE IN EMERGING MOROCCAN MARKETS	**Prof. Dr. Youssef El Mansouri** **Dr. Nadia Benkirane** **Amine El Fassi**
2	STRATEGIC INNOVATION AND ENTREPRENEURIAL GROWTH IN MOROCCAN FAMILY BUSINESSES	**Assoc. Prof. Dr. Karim Ait Baha** **Salma Rachidi**
3	SUSTAINABLE TOURISM MANAGEMENT AND REGIONAL ECONOMIC DEVELOPMENT IN ALBANIA	**Prof. Dr. Arben Kodra** **Dr. Elira Hoxha** **Assoc. Prof. Dr. Dorian Leka** **Besa Marku**
4	DIGITAL MARKETING TRANSFORMATION IN ALBANIAN SMALL AND MEDIUM ENTERPRISES	**Dr. Ilir Meta** **Erion Kallaku** **Arta Gjini**
5	ISLAMIC FINTECH ADOPTION AND FINANCIAL INCLUSION STRATEGIES IN KUWAIT	**Prof. Dr. Abdullah Al-Mutairi** **Dr. Sara Al-Harbi** **Nasser Al-Fahad**
6	CORPORATE GOVERNANCE PRACTICES AND OIL-DEPENDENT ECONOMY DIVERSIFICATION IN KUWAIT	**Assoc. Prof. Dr. Khalid Al-Sabah** **Mariam Al-Otaibi**
7	ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BUSINESS DECISION MAKING AND ORGANIZATIONAL PERFORMANCE IN FRANCE	**Prof. Dr. Jean-Luc Moreau** **Dr. Sophie Lambert** **Assoc. Prof. Dr. Pierre Dubois** **Claire Martin**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 9	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:30 – 17:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Assoc. Prof. Dr. Nasser Al-Harbi		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	STRATEGIC MANAGEMENT OF OCCUPATIONAL HEALTH SERVICES IN LARGE-SCALE INDUSTRIAL ORGANIZATIONS: IMPROVING EMPLOYEE WELL-BEING, PRODUCTIVITY, AND CORPORATE SUSTAINABILITY	**Prof. Dr. Youssef El Mansouri** **Dr. Salma Benjelloun** **Karim Ait Haddou**
2	THE ROLE OF OCCUPATIONAL PHYSICIANS IN REDUCING WORKPLACE STRESS AND PREVENTING PROFESSIONAL BURNOUT: EVIDENCE FROM MODERN BUSINESS ENVIRONMENTS	**Assoc. Prof. Dr. Nadia El Amrani** **Omar Chafik**
3	EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF WORKPLACE HEALTH PROMOTION PROGRAMS IN ENHANCING EMPLOYEE PERFORMANCE AND ORGANIZATIONAL COMMITMENT	**Prof. Dr. Arben Kola** **Dr. Elira Hoxha** **Klevis Dervishi** **Mirela Shehu**
4	DIGITAL TRANSFORMATION IN OCCUPATIONAL MEDICINE: UTILIZING HEALTH INFORMATION SYSTEMS FOR WORKFORCE RISK ASSESSMENT AND MANAGEMENT	**Assis. Prof. Dr. Gentian Leka** **Erisa Marku**
5	THE IMPACT OF OCCUPATIONAL HEALTH SURVEILLANCE ON EMPLOYEE RETENTION AND CORPORATE PERFORMANCE IN THE PRIVATE SECTOR	**Prof. Dr. Fahad Al-Mutairi** **Dr. Reem Al-Shammari** **Abdullah Al-Enezi**
6	INTEGRATING PREVENTIVE OCCUPATIONAL MEDICINE INTO HUMAN RESOURCE STRATEGIES: A FRAMEWORK FOR HEALTHIER AND MORE PRODUCTIVE WORKPLACES	**Assoc. Prof. Dr. Nasser Al-Harbi**
7	ASSESSING THE RELATIONSHIP BETWEEN WORK ENVIRONMENT QUALITY, OCCUPATIONAL HEALTH INDICATORS, AND EMPLOYEE SATISFACTION IN KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATIONS	**Prof. Dr. Jean-Luc Martin** **Claire Dubois** **Dr. Antoine Lefevre**
8	OCCUPATIONAL HEALTH RISK MANAGEMENT IN MULTINATIONAL COMPANIES: CHALLENGES, BEST PRACTICES, AND POLICY IMPLICATIONS	**Assis. Prof. Dr. Sophie Bernard** **Dr. Mathieu Laurent**

ANADOLU 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES			
SESSION - HALL Session 2 – Hall 10	**DATE** August 14, 2026	**TIME** Ankara: 15:30 – 17:30	**ZOOM ID - Passcode** 885 7151 8350 - 202224

Head Of Session : Assis. Prof. Dr. Mirela Dervishi		
	Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
1	EMOTIONAL INTELLIGENCE, SOCIAL CONNECTEDNESS, AND PSYCHOLOGICAL WELL-BEING IN THE POST-PANDEMIC ERA: IMPLICATIONS FOR PREVENTIVE MENTAL HEALTH CARE	**Assoc. Prof. Dr. Pierre Lambert** **Sophie Martin** **Dr. Élodie Bernard** **Antoine Renault**
2	PSYCHOLOGICAL CONSEQUENCES OF PROLONGED DIGITAL EXPOSURE AMONG ADOLESCENTS: ASSESSING COGNITIVE FUNCTIONING, EMOTIONAL REGULATION, AND CLINICAL INTERVENTION STRATEGIES	**Dr. Youssef El Mansouri**
3	EARLY IDENTIFICATION OF DEPRESSIVE SYMPTOMS IN UNIVERSITY STUDENTS: A MULTIDIMENSIONAL APPROACH TO PREVENTION, SCREENING, AND MENTAL HEALTH PROMOTION	**Dr. Salma Benjelloun** **Karim El Fassi**
4	THE RELATIONSHIP BETWEEN TRAUMA EXPOSURE AND ANXIETY DISORDERS IN YOUNG ADULTS: CLINICAL EVALUATION AND EVIDENCE-BASED TREATMENT APPROACHES	**Assoc. Prof. Dr. Arben Kola** **Elira Hoxha** **Dr. Gentian Leka**
5	PSYCHOLOGICAL RESILIENCE AND COPING MECHANISMS AMONG HEALTHCARE PROFESSIONALS: IMPLICATIONS FOR OCCUPATIONAL MENTAL HEALTH AND WELL-BEING	**Assis. Prof. Dr. Mirela Dervishi**
6	THE EFFECTIVENESS OF COGNITIVE BEHAVIORAL THERAPY IN THE MANAGEMENT OF GENERALIZED ANXIETY DISORDER: A LONGITUDINAL CLINICAL PERSPECTIVE	**Prof. Dr. Fahad Al-Rashidi** **Dr. Noura Al-Sabah**
7	ASSESSING THE IMPACT OF FAMILY DYNAMICS ON ADOLESCENT MENTAL HEALTH: CLINICAL INSIGHTS INTO EMOTIONAL DEVELOPMENT AND PSYCHOLOGICAL ADJUSTMENT	**Assoc. Prof. Dr. Abdullah Al-Mutairi** **Mariam Al-Enezi** **Dr. Yousef Al-Harbi** **Sarah Al-Duwaisan**
8	SLEEP DISTURBANCES AND THEIR ASSOCIATION WITH DEPRESSIVE DISORDERS IN OLDER ADULTS: DIAGNOSTIC CHALLENGES AND THERAPEUTIC CONSIDERATIONS	**Assis. Prof. Dr. Jean-Luc Moreau**
9	THE ROLE OF MINDFULNESS-BASED INTERVENTIONS IN REDUCING STRESS AND BURNOUT AMONG WORKING PROFESSIONALS: A CLINICAL PSYCHOLOGY PERSPECTIVE	**Dr. Claire Dubois** **Mathieu Laurent**

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Contents

TUBERCULUM ADDUCTORIUM'DA GÖRÜLEN YAPISAL VARYASYONLAR VE EDİNSEL DEFORMİTELER 1

KRONİK BÖBREK YETMEZLİĞİ OLAN ÇOCUĞA SAHİP EBEVEYNLERİN DENEYİMLERİ: NİTEL BİR ÇALIŞMA 2

İLERİ PREMATÜRE DOĞUMDA ZİHİNSEL SENKRONİZASYON KAYBI ÜZERİNE 14

İNSANİ GELİŞMİŞLİK SAĞLIK SİSTEMİ ETKİNLİĞİNE DÖNÜŞÜYOR MU? İKİ AŞAMALI VZA VE SIMAR–WILSON BOOTSTRAP ANALİZİ 15

GENÇ FUTBOLCULARDA UYGULANAN FIFA 11+ ISINMA PROGRAMININ SEÇİLMİŞ MOTOR PARAMETRELERE ETKİSİ 17

ÖDEME GECİKMESİ RİSKİ ALTINDA BÜTÇE KISITLI MÜDAHALE OPTİMİZASYONU 19

KARBON SALIMLARININ MATEMATİKSEL OPTİMİZASYONU: TÜRKİYE'NİN 2053 NET SIFIR HEDEFİ İÇİN BİR MODELLEME YAKLAŞIMI 30

HASTA BAKIM UYGULAMALARINDA MATEMATİK DESTEKLİ YAPAY ZEKA UYGULAMALARI: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLER..... 43

ASTRONOMİK GÖZLEMLERDE DERİN ÖĞRENME İLE HEDEF TANIMA 44

AN APPLICATION OF THE MODIFIED EXPONENTIAL FUNCTION METHOD 62

EXTENDED HYPERBOLIC FUNCTION METHOD FOR THE $(2+1)$ DIMENSIONAL CONFORMABLE TIME-FRACTIONAL ZOOMERON EQUATION 63

AN ADI FINITE DIFFERENCE SCHEME FOR THE (2+1)-DIMENSIONAL HUXLEY EQUATION..... 74

DEVELOPMENT AND SPATIAL ANALYSIS OF A SOCIOECONOMİC VULNERABILITY INDEX FOR TURKISH PROVİINCES USİNG PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS..... 82

NORMALİZE HATA VE HİSTEREZİS TABANLI KAPALI ÇEVRİM KONTROL ALGORİTMASININ GÜNEŞ TAKİBİ ÜZERİNDE TASARIMI 89

LDR TABANLI ÇİFT EKSENLİ BİR GÜNEŞ TAKİP PROTOTİPİNİN TASARIMI VE ENERJİ PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ 99

VITALUMOS: AN STM32-BASED PORTABLE BIOMEDICAL DATA MEASUREMENT SYSTEM..... 111

VİTALUMOS: STM32 TABANLI TAŞINABİLİR BİYOMEDİKAL VERİ ÖLÇÜM SİSTEMİ 112

TURK-DOC: ARTIFICIAL INTELLIGENCE-SUPPORTED VOICE ASSISTANT SYSTEM FOR TURKISH CLINICAL DOCUMENTATION..... 120

ENDÜSTRİYEL KONTROL SİSTEMLERİNDE LLM TABANLI OTONOM AJANLAR İÇİN TEHDİT TAKSONOMİSİ VE GENİŞLETİLMİŞ TEHDİT MODELİ 134

SHIELD-ICS: ENDÜSTRİYEL KONTROL SİSTEMLERİNDE LLM TABANLI OTONOM AJANLAR İÇİN YEDİ KATMANLI SAVUNMA MİMARİSİ, TESTBED TASARIMI VE İLK KAVRAMSAL KANIT BULGULARI..... 154

PARABOLIK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLERINDE YUTUCU BORU İÇ ÇAPI OPTIMIZASYONU 174

DEMİRYOLU YOL GEOMETRİSİ PARAMETRELERİNİN YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (BIM) 7D BOYUTU İLE TAKİBİNİN İNCELENMESİ 184

COLD-BONDED ARTIFICIAL AGGREGATES FROM 75 µm COLEMANITE AND ULEXITE POWDERS USING CEMENT AND REACTIVE MGO BINDERS 198

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

PERFORMANCE OF 45 µm COLEMANITE- AND ULEXITE-BASED ARTIFICIAL AGGREGATES PRODUCED WITH CEMENT AND HIGH-CALCINED MgO 214

INFLUENCE OF INFILL TYPE ON THE CHARPY IMPACT BEHAVIOUR OF FFF-PRINTED CARBON FIBRE REINFORCED PLA COMPONENTS 229

MİKRON BOYUTLU CAM ELYAF TOZUNUN ODUN-PLASTİK KOMPOZİTLERİN BAZI TEKNOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI 235

FORDİZM BAĞLAMINDA KENTSEL PEYZAJIN BİÇİMLENİŞİ: ÜRETİM REJİMİNDEN MEKÂNSAL SÜREKLİLİKLERE 237

Comparison of Oilseed Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Genotypes for Yield and Selected Agronomic Traits under Muş Ecological Conditions 252

Combining Ability and Heterosis for Some Yield and Fiber Traits in Interspecific Cotton (*Gossypium hirsutum* L. × *Gossypium barbadense* L.) Crosses 260

SÜT SIĞIRCILIĞINDA OTOMATİK SAĞIM SİSTEMLERİNDE ROBOT YEMLEMESİNİN SAĞIM YÖNETİMİ VE SÜRÜ PERFORMANSINA ETKİLERİ 269

YEM BİTKİLERİNDE HASAT KAYIPLARI: NEDENLER, BOYUTLAR VE AZALTMA STRATEJİLERİ 271

NDVI GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİNİN ÇAYIR VE MERALARDA KULLANIMI 299

KENTSEL ATIKSUDA DİYABET İLAÇLARI VE ARITMA TESİSİNDE GİDERİMLERİ 317

GELENEKSEL ERZURUM PEYNİRİNDEN İZOLE EDİLEN PROTEAZ ÜRETEN BAKTERİ VE FUNGUSLARIN TARANMASI 327

SCREENING OF PROTEASE-PRODUCING BACTERIA AND FUNGI ISOLATED FROM TRADITIONAL ERZURUM CHEESE 332

JELMA/PEGDA BİYOKOMPOZİTLERİN SENTEZİ VE DOKU MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI 338

SIĞIRLARDA PARATÜBERKÜLOZ HASTALIĞININ MAKROSKOPİK VE HİSTOPATOLOJİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ 351

RUMİNANTLARIN MAVİ DİL HASTALIĞINDA PATOLOJİK DEĞERLENDİRMELER 354

INVESTIGATION OF BACTERIAL CONTAMINATION AND ANTIBIOTIC RESISTANCE PROFILES IN LIBYAN HOSPITAL SURGICAL UNITS AND INTENSIVE CARE ENVIRONMENTS 358

ASSESSMENT OF MICROBIAL DIVERSITY AND PATHOGENIC LOAD IN DESERT WATER RESOURCES AND URBAN SUPPLY SYSTEMS IN LIBYA 359

GENOMIC ANALYSIS OF EXTREME ENVIRONMENT ADAPTED MICROBES IN INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ZONES OF KAZAKHSTAN 360

EVALUATION OF PROBIOTIC BACTERIAL STRAINS FOR IMPROVING GUT MICROBIOTA AND IMMUNE RESPONSE IN CENTRAL ASIAN POPULATIONS 361

METAGENOMIC PROFILING OF ANTIBIOTIC RESISTANCE GENES IN AQUATIC ECOSYSTEMS AND COASTAL WATERS OF EAST ASIA 362

CHARACTERIZATION OF NOVEL MARINE MICROORGANISMS WITH BIOACTIVE COMPOUND POTENTIAL FROM TAIWANESE COASTAL REGIONS 363

DEVELOPMENT OF MICROBIOME-BASED DIAGNOSTIC MODELS FOR EARLY DETECTION OF INFECTIOUS DISEASES USING MACHINE LEARNING APPROACHES IN CLINICAL MICROBIOLOGY 364

GENOME EDITING STRATEGIES USING CRISPR-CAS SYSTEMS FOR TARGETED THERAPEUTIC APPLICATIONS IN HUMAN DISEASE MODELS 365

BIOENGINEERED NANOPARTICLES FOR CONTROLLED DRUG ELIVERY AND ENHANCED CELLULAR UPTAKE IN CANCER THERAPY 366

SYNTHETIC BIOLOGY APPROACHES FOR MICROBACTERIAL PRODUCTION OF HIGH-VALUE BIOFUELS UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS 367

BIOTECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS IN PLANT-BASED BIOPESTICIDES FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN SUB-SAHARAN ENVIRONMENTS 368

RECOMBINANT PROTEIN ENGINEERING FOR NEXT-GENERATION VACCINE DEVELOPMENT AGAINST EMERGING VIRAL PATHOGENS 369

MICROBIAL FUEL CELL TECHNOLOGIES FOR WASTEWATER TREATMENT AND RENEWABLE ENERGY GENERATION IN ARID REGIONS 370

GENE THERAPY VECTOR OPTIMIZATION FOR NEURODEGENERATIVE DISEASE TREATMENT USING LENTIVIRAL AND AAV SYSTEMS 371

IMPACT OF URBAN AIR POLLUTION ON RESPIRATORY HEALTH OUTCOMES IN NORTH AFRICAN METROPOLISES 372

TELEMEDICINE ADOPTION AND HEALTHCARE ACCESSIBILITY IN RURAL MOROCCO: A SYSTEMATIC ANALYSIS 373

COMMUNITY-BASED MALARIA CONTROL STRATEGIES AND PUBLIC HEALTH EFFECTIVENESS IN WEST AFRICA 374

MENTAL HEALTH BURDEN AMONG ADOLESCENTS IN URBAN NIGERIA: SOCIOECONOMIC AND EDUCATIONAL CORRELATES 375

HEALTHCARE SYSTEM RESILIENCE AND POST-CONFLICT RECOVERY MODELS IN LIBYA 376

NON-COMMUNICABLE DISEASE PREVENTION STRATEGIES IN LIBYA: POLICY IMPLEMENTATION AND COMMUNITY ENGAGEMENT 377

IMPROVING PRIMARY HEALTHCARE DELIVERY IN CHILEAN RURAL COMMUNITIES THROUGH DIGITAL HEALTH INTEGRATION 378

EPIDEMIOLOGICAL TRENDS OF CARDIOVASCULAR DISEASES AMONG ELDERLY POPULATIONS IN CHILE: A LONGITUDINAL STUDY 379

CLIMATE CHANGE AND EMERGING VECTOR-BORNE DISEASE RISKS IN CHILE: A PUBLIC HEALTH FORECASTING MODEL 380

THREE-DIMENSIONAL PRINTING TECHNOLOGIES IN MAXILLOFACIAL SURGERY: CLINICAL APPLICATIONS, LIMITATIONS, AND FUTURE PERSPECTIVES 381

ADVANCES IN DIGITAL DENTISTRY FOR COMPLEX ORAL REHABILITATION: A CLINICAL EVALUATION OF CAD/CAM-GUIDED TREATMENT OUTCOMES IN ADULT PATIENTS 382

ASSESSMENT OF PERIODONTAL HEALTH AWARENESS AND PREVENTIVE ORAL CARE PRACTICES AMONG UNIVERSITY STUDENTS IN URBAN COMMUNITIES 383

THE EFFECTIVENESS OF MINIMALLY INVASIVE RESTORATIVE TECHNIQUES IN THE MANAGEMENT OF EARLY CHILDHOOD CARIES: A LONGITUDINAL STUDY 384

EVALUATION OF PATIENT SATISFACTION AND FUNCTIONAL OUTCOMES FOLLOWING IMPLANT-SUPPORTED PROSTHETIC REHABILITATION IN ELDERLY INDIVIDUALS 385

ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN ORAL RADIOLOGY: IMPROVING DIAGNOSTIC ACCURACY FOR MAXILLOFACIAL PATHOLOGIES 386

CLINICAL AND MICROBIOLOGICAL EVALUATION OF NOVEL ANTIBACTERIAL AGENTS IN THE PREVENTION OF PERI-IMPLANT DISEASES 387

LONG-TERM PERFORMANCE OF CERAMIC VENEERS IN ESTHETIC DENTISTRY: FACTORS INFLUENCING SURVIVAL RATES AND PATIENT SATISFACTION 388

EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE AND MOLECULAR CHARACTERIZATION OF BRUCELLOSIS IN SMALL RUMINANTS IN NORTH AFRICA 389

ANTIMICROBIAL RESISTANCE PATTERNS IN BOVINE MASTITIS PATHOGENS AND STRATEGIES FOR DAIRY HERD MANAGEMENT 390

EFFECTS OF CLIMATE VARIABILITY ON TICK-BORNE DISEASE PREVALENCE IN CATTLE POPULATIONS IN EAST AFRICA..... 391

EVALUATION OF ANIMAL WELFARE PRACTICES IN SMALL-SCALE POULTRY FARMS AND THEIR IMPACT ON PRODUCTIVITY 392

ADVANCES IN VETERINARY PARASITOLOGY: CONTROL OF ECHINOCOCCOSIS IN RURAL LIVESTOCK SYSTEMS 393

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DIAGNOSING CANINE CARDIAC DISEASES IN CENTRAL ASIA..... 394

MOLECULAR EPIDEMIOLOGY OF AVIAN INFLUENZA VIRUSES IN COMMERCIAL POULTRY FARMS IN EAST ASIA..... 395

SUSTAINABLE IRRIGATION MANAGEMENT AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN ARID AGRICULTURAL REGIONS OF MOROCCO WITH WATER EFFICIENCY OPTIMIZATION..... 396

SOIL SALINITY CONTROL AND CLIMATE RESILIENT OLIVE CULTIVATION STRATEGIES IN MEDITERRANEAN AGRICULTURAL ZONES OF MOROCCO 397

CLIMATE SMART COFFEE PRODUCTION SYSTEMS AND SUSTAINABLE FARMING PRACTICES FOR SMALLHOLDER FARMERS IN TANZANIA 398

MAIZE YIELD ENHANCEMENT THROUGH INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND DIGITAL AGRICULTURAL MONITORING SYSTEMS IN TANZANIA..... 399

PRECISION AGRICULTURE TECHNOLOGIES FOR WINTER WHEAT PRODUCTION IMPROVEMENT IN THE STEPPE REGIONS OF KAZAKHSTAN..... 400

SUSTAINABLE PASTURE MANAGEMENT AND LIVESTOCK GRAZING OPTIMIZATION MODELS USING REMOTE SENSING IN KAZAKHSTAN RURAL ECOSYSTEMS 401

PRECISION VITICULTURE AND SMART IRRIGATION SYSTEMS FOR HIGH QUALITY GRAPE PRODUCTION IN RIOJA WINE REGIONS OF SPAIN..... 402

SUSTAINABLE OLIVE OIL PRODUCTION SYSTEMS AND ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION STRATEGIES IN ANDALUSIAN AGRICULTURE OF SPAIN..... 403

YÜZEYSEL SULARDA POLİBROMLU DİFENİL ETERLER (PBDE) VE SAĞLIK ETKİLERİ..... 404

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

TUBERCULUM ADDUCTORIUM'DA GÖRÜLEN YAPISAL VARYASYONLAR VE EDİNSEL DEFORMİTELER

Dr.Öğr.Üyesi Ece BURU
VAN YYÜ Tıp Fakültesi Anatomi A.D.,
buruecebiber@gmail.com - 0000-0002-2984-6582
Doç.Dr. Necat KOYUN
VAN YYÜ Tıp Fakültesi Anatomi A.D.,
necat_1974@hotmail.com - 0000-0002-6626-0302
Dr.Öğr.Üyesi Veysel AKYOL
VAN YYÜ Tıp Fakültesi Anatomi A.D.,
veysel-akyol@hotmail.com-0000-0002-6355-441X

ÖZET

İnsan iskelet yapısında alt extremite kemikleri vücut ağırlığının pelvis tarafından çift taraflı iletildiği dolayısıyla,bu ağırlığın yarattığı basıncı karşılayan ve dengeleyen en önemli bölgedir. Bu bölgede bulunan kemikler içinde femur, bu yükü ve kas kuvvetinin dik durmadaki rolünü en büyük oranda karşılayan ve sabitleyen kemiktir.Femur yapısında kemiğin distal ucuna yakın ve medialde bulunan tuberculum adductorium,uylukta adduksiyon hareketinin dolayısıyla femur'un esas görevlerinden biri olan adduksiyonu temel olarak sağlayan m.adductor magnus kasının inseisyo yaptığı yapıdır. Tuberculum adductorium'da edinsel olarak aşırı zorlanmaya bağlı kas gücüyle oluşabilecek kırıklar veya yapısal olarak görülebilen büyüklük ve şekil farklılıkları kişinin ayakta sabit durmasında ve vücut ağırlığının hareketler örn;adduksiyon sırasında dengelenmesinde ağrı,hareket kısıtlılığı v.b sorunlar yaratmaktadır. Geçmiş yıllarda çeşitli araştırmacıların yaptığı incelemeler ve Ortopedi, Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon, Spor Hekimliği, Algoloji branşları başta olmak üzere uyluk ve çevresinde ağrı,hareket kısıtlılığı v.b. şikayetlerle başvuran hastalarda da tuberculum adductorium'da görülebilen bu tür deformitelerin ileri tetkik olarak Anatomik ve Radyolojik incelemesinin öngörülmesi amacıyla bu çalışma ve konu incelenmiş olup üzerine tartışılarak ortak bir sonuca varılması planlanmıştır. Bu çalışmada Van YYÜ Tıp Fakültesi Anatomi A.D.'e ait öğrenci eğitimi amaçlı kullanılan 54 adet femur (23sağ ve 31 adet sol) morfolojik olarak incelenmiş ve 5 adet femur'da tuberculum adductorium'da değişik düzeyde deformite saptanmış olup;saptanan femur'lar değişik Anatomik açılardan fotoğraflanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Femur,Tuberculum adductorium,Deformite

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

KRONİK BÖBREK YETMEZLİĞİ OLAN ÇOCUĞA SAHİP EBEVEYNLERİN DENEYİMLERİ: NİTEL BİR ÇALIŞMA

Arş. Gör. Dr. Melek Akgün Özbey
Erciyes Üniversitesi,
melekakgn93@gmail.com - 0000-0003-4913-5478
Arş. Gör. Dr. Harun Özbey
Erciyes Üniversitesi,
harunozbey@erciyers.edu.tr - 0000-0001-9827-0655
Doç. Dr. Yağmur Sezer Efe
Erciyes Üniversitesi,
ysezerefe@gmail.com - 0000-0003-0980-8439
Prof. Dr. Meral Bayat
Erciyes Üniversitesi,
bayatmeral@gmail.com - 0000-0002-7076-1097
Prof. Dr. İsmail Dursun
Erciyes Üniversitesi,
idursun@erciyes.edu.tr - 0000-0002-0191-4344
Doç. Dr. Sibel Yel
Erciyes Üniversitesi,
syel@erciyes.edu.tr - 0000-0001-8946-0481

ÖZET

Amaç: Bu fenomenolojik nitel çalışma, kronik böbrek yetmezliği (KBY) olan çocuğa sahip ebeveynlerin tedavi ve bakım sürecinde yaşadıkları deneyimlerin özünü ortaya koymayı ve bu deneyimlerin çok boyutlu etkilerini belirlemeyi amaçlamıştır.

Yöntem: Araştırma, bir üniversite hastanesinin Çocuk Nefroloji Servisi'nde takip edilen KBY'li çocukların ebeveynleriyle yürütülmüştür. Ölçüt örnekleme yöntemiyle 12 anne veri doygunluğuna ulaşılana kadar dahil edilmiştir. Veriler, Haziran 2025-Şubat 2026 tarihleri arasında demografik bilgi formu ve araştırmacı tarafından geliştirilen yarı yapılandırılmış görüşme formu ile derinlemesine görüşme tekniği kullanılarak toplanmıştır. Görüşmeler yaklaşık 60 dakika sürmüş, kaydedilmiş ve transkripsiyonu yapılmıştır. Veriler MAXQDA20 programı ile tematik içerik analizi yöntemiyle kodlanmış, kategorize edilmiş ve temalara dönüştürülmüştür. Araştırmanın iç ve dış geçerlik-güvenirliği uzman incelemesi, katılımcı teyidi, doğrudan alıntılar ve çift kodlama ile sağlanmıştır.

Bulgular: Tematik analiz sonucunda dört ana tema ve on alt tema belirlenmiştir: (1) Hastalığa bakış ve hastalık ile ilgili görüşler (tanı anındaki şok ve bilgi eksikliği; normal yaşamdan kronik sürece geçiş); (2) Tedavi ve bakım süreci ile ilgili görüşler (hastane tedavisi; evde bakım ve bakım sağlayıcı sorunları; çocuk ve kurumla karşılaşılan problemler); (3) Tedavi ve bakım sürecinin etkileri (ekonomik; psikolojik; fiziksel; sosyo-kültürel etkiler ve maneviyat); (4) Tedavi sonrası süreç (nakil sonrası uyum). Katılımcılar, tanı şokunu, diyaliz yükünü, ekonomik çöküşü, psikolojik tükenmişliği, sosyal izolasyonu ve nakil sonrası umut ile yeni endişeleri detaylı alıntılarla ifade etmişlerdir.

Sonuç: KBY'li çocuğa bakım veren ebeveynler yoğun fiziksel, psikolojik, ekonomik ve sosyo-kültürel yük altında olup multidisipliner destek gereksinimi belirgindir. Bulgular, ebeveyn merkezli bakım modellerinin geliştirilmesine ve sağlık politikalarına katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kronik Böbrek Yetmezliği, Bakım verenler, Ebeveynler, Nitel Araştırma, Fenomenolojik Çalışma

1. GİRİŞ

Kronik böbrek yetmezliği (KBY), böbrek fonksiyonlarında geri dönüşü olmayan, ilerleyici kayıpla seyreden ve nihai olarak renal replasman tedavisi gerektiren ciddi bir sağlık sorunudur. Çocukluk çağında görülme sıklığı erişkinlere kıyasla düşük olmakla birlikte, hastalığın büyüme, nörokognitif gelişim, okul başarısı ve psikososyal uyum üzerindeki etkileri nedeniyle yükü orantısız biçimde ağırdır (Becherucci vd., 2016). Dünya genelinde çocuklarda KBY prevalansının bir milyon çocuk nüfusta yaklaşık 55-60 olduğu, son dönem böbrek yetmezliği insidansının ise bölgeler arasında belirgin farklılık gösterdiği bildirilmektedir (Harambat vd., 2012). Türkiye'de de pediatrik son dönem böbrek yetmezliği olgularının önemli bir bölümünün konjenital anomaliler ve herediter nefropatilere bağlı geliştiği, tanının çoğunlukla ileri evrelerde konulduğu vurgulanmaktadır (Süleymanlar vd., 2011).

Çocukluk çağı kronik hastalıklarında bakımın büyük bölümü aile, özellikle de anne tarafından üstlenilmektedir. Diyaliz programlarının sürdürülmesi, sıvı ve diyet kısıtlamalarının uygulanması, çok sayıda ilacın doğru zamanda verilmesi, enfeksiyon riskinin izlenmesi ve sık hastane ziyaretlerinin yönetilmesi, ebeveyni fiilen bir sağlık bakım sağlayıcısı konumuna getirmektedir (Tong vd., 2008). Bu rol değişimi, literatürde "bakım verme yükü" kavramı çerçevesinde ele alınmakta ve pediatrik KBY'de bakım verenlerde anksiyete, depresyon, uyku bozuklukları ve yaşam kalitesinde düşüş şeklinde yansımaları olduğu gösterilmektedir (Medway vd., 2015; Wightman, 2020). Ayrıca tedavi maliyetleri, ulaşım giderleri ve ebeveynlerden birinin çalışma hayatından çekilmek zorunda kalması, aileler için ciddi bir ekonomik kırılganlık yaratmaktadır (Splinter vd., 2018).

Bakım yükünü niceliksel ölçeklerle değerlendiren çalışmalar sorunun boyutunu ortaya koymakla birlikte, ebeveynlerin tanı anındaki şoku, belirsizlikle baş etme biçimlerini, manevi kaynaklara yönelimlerini ve sosyal damgalanma deneyimlerini derinlemesine açıklamakta yetersiz kalmaktadır (Swallow vd., 2012). Nitel araştırmalar, bu deneyimlerin öznel anlamına ulaşılmasını sağlayarak aile merkezli bakım modellerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır (Nicholas vd., 2011). Türkiye bağlamında ise pediatrik KBY'li çocukların ebeveynlerinin deneyimlerini fenomenolojik yaklaşımla bütüncül olarak inceleyen çalışma sayısı sınırlıdır. Bu

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

doğrultuda mevcut araştırma, KBY'li çocuğa sahip ebeveynlerin tedavi ve bakım sürecinde yaşadıkları deneyimlerin özünü ortaya koymayı ve bu deneyimlerin çok boyutlu etkilerini belirlemeyi amaçlamaktadır.

2. GEREÇ VE YÖNTEM

Araştırmanın Şekli

Bu araştırma, kronik böbrek yetmezliği (KBY) olan çocuğa sahip ebeveynlerin tedavi ve bakım sürecinde yaşadıkları deneyimleri belirlemek amacıyla nitel araştırma tasarımında olgu bilim (fenomenolojik) tipte yürütülmüştür. Fenomenolojik araştırmalar karakteristik olarak, gündelik dilde ortaya konan ve soyut entelektüel genellemelerden kaçınan, genellikle birinci şahsa özgü açıklamaları olan, yaşanmış durumların somut tanımlarıyla bilinen bir araştırma yöntemidir. Fenomenolojinin kökünde amaç, insanları kendi terimleriyle anlamak, insan deneyiminin kişinin kendisi tarafından deneyimlendiği şekilde bir tanımını sağlamak ve özün ortaya çıkmasına izin vermektir (Creswell ve Creswell, 2018).

Araştırmanın Evren ve Örneklemi

Araştırmanın çalışma grubunu çocuk nefroloji servisinde tedavi ve bakım hizmeti alan KBY'li çocukların ebeveynleri oluşturmuştur. Katılımcılar, amaçlı örnekleme yöntemlerinden ölçüt örnekleme yöntemi ile belirlenmiştir (Flick, 2022). KBY'li çocuğa sahip olan, veri toplama süresi içerisinde serviste bakım ve tedavi hizmeti alan, Türkçe konuşan, okuyan ve yazabilen ve araştırmaya katılmayı kabul eden ebeveynler araştırma kapsamına alınmıştır. Fenomenolojik bir çalışmada seçilecek örneklem büyüklüğünün araştırmanın amacı ve ele alınan fenomenlere dair ortak deneyimlerin ortaya çıkartılabilmesi için ortalama 5-15 kişi arasında olması gerektiği belirtilmektedir (McNabb, 2015; Creswell ve Creswell, 2018). Çalışmada, ele alınan temel fenomenlere ilişkin ortak deneyimlere sahip 12 ebeveyn araştırmaya dahil edilmiştir. Veri doygunluğuna ulaştığı belirlendiğinde katılımcı alımı durdurulmuştur.

Verilerin Toplanması

Araştırmanın verileri, demografik bilgiler formu ve yarı yapılandırılmış görüşme formu ile Haziran 2025- Şubat 2026 tarihleri arasında nitel araştırma veri oluşturma yöntemlerinden birisi olan görüşme tekniği ile derinlemesine görüşme yöntemi kullanılarak toplanmıştır. Derinlemesine görüşme yöntemi, araştırılan konunun tüm boyutlarını ele alan, genellikle açık uçlu soruların sorulduğu ve detaylı yanıtların alınmasına olanak sağlayan bir veri toplama yöntemidir (Américo et al., 2022). Görüşmeye, tanışma ve bilgilendirme bölümleri ile başlanmıştır. Bilgilendirme bölümünde, ebeveynlere araştırmanın amacı açıklanmış, çalışmaya katılımın gönüllülük esasına dayandığı, gerekirse araştırma sürecinin herhangi bir aşamasında çalışmadan çekilebilecekleri, görüşmenin kayıt altına alınacağı ve elde edilen verilerin araştırma dışında herhangi bir şekilde kullanılmayacağı konusunda güvence verilmiştir. Tanışma bölümünde ise ebeveynlerin kendilerini tanıtmaları istenmiş ve Demografik Bilgiler Formu doldurulmuştur. Tanışma bölümünün ardından yaklaşık 60 dakika süren görüşmeler yapılmıştır.

Demografik Bilgiler Formu: Ebeveyn ve çocukların tanıtıcı özelliklerine ilişkin sorulardan (yaş, cinsiyet, hastaneye yatma deneyimi, tıbbi tanı vb.) oluşmaktadır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Yarı Yapılandırılmış Görüşme Formu: Nitel araştırmalarda veri toplama aracı araştırmacının bizzat kendisi olduğundan, bu araştırmada da veriler yarı yapılandırılmış görüşme formu aracılığıyla araştırmacı tarafından toplanmıştır (Américo et al., 2022). Araştırmada, ebeveynlerin tedavi ve bakım sürecine ilişkin deneyimlerini belirlemeye yönelik sorulardan oluşan Yarı Yapılandırılmış Görüşme Formu kullanılmıştır. Formun sunuş bölümünde yer alan tanışma ve bilgilendirme bölümünde araştırma hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Araştırmacılar tarafından geliştirilen görüşme sorularının hazırlanmasında; soruların kolaylıkla anlaşılması ve ebeveynleri yönlendirici olmaması gibi ilkelere dikkat edilmiştir. Hazırlanan görüşme formunun işlerliği, anlaşılırlığı ve uygulanabilirliğini kontrol etmek amacıyla alan uzmanlarının görüşlerine sunulmuştur. Uzmanların geri dönüşleri doğrultusunda görüşme formunda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Ön Uygulama

Veri oluşturma araçları, uzman görüşleri doğrultusunda düzenlendikten sonra işlerliği, uygulanabilirliği ve anlaşılırlığını değerlendirmek amacıyla iki ebeveyn ile yaklaşık 60 dakika sürecek olan ön uygulama yapılmıştır. Ön uygulama sonrasında formların anlaşılır ve uygulanabilir olduğu belirlenmiştir.

İstatistiksel Analizler

Araştırmada, veri analizinden önce araştırmacı (H.Ö) tarafından kayıt altına alınmış görüşmelerin transkripsiyonu yapılmıştır. Araştırmacılar (H.Ö ve M.A.Ö) tarafından derinlemesine yapılan görüşmelerden elde edilen notlar ve görüşmelerin dökümü, bilgisayar destekli nitel veri analiz programı olan MAXQDA20'ye yüklendikten sonra tematik içerik analizi yapılmıştır. Tematik içerik analizi, bir metindeki sözcüklerin belirli kurallar çerçevesinde oluşturulan kodlamalar ile daha küçük kategorilere ayrılması tekniğidir. Tematik içerik analizinde temelde yapılan işlem, birbirine benzeyen verileri belirli kavramlar ve temalar çerçevesinde bir araya getirmek ve bunları okuyucunun anlayabileceği şekilde düzenleyerek yorumlamaktır (Timmermans ve Tavory, 2022). Programın sistemine yüklenmiş veriler öncelikle detaylı olarak kodlanmış ve ardından kategorize edilmiştir. Sonrasında ise temalar oluşturulmuştur. Katılımcıların görüşlerini gerçekçi bir şekilde sunabilmek adına doğrudan alıntılara yer verilmiştir.

Araştırmanın Geçerlik ve Güvenirliği

Araştırmada uzman incelemesi, katılımcı teyidi, doğrudan alıntılara yer verilmesi ve katılımcılarla yapılan görüşme sürelerinin uzun tutulması yöntemleri kullanılarak araştırmanın iç geçerliği (inandırıcılığı) sağlanmıştır. Araştırma süreci ve bu süreçte yapılan işlemler ayrıntılı bir şekilde betimlenerek araştırmanın dış geçerliği (aktarılabilirliği) sağlanmıştır. Araştırmanın iç güvenirliğini (tutarlığını) sağlamak için bulguların yorumlanmadan doğrudan aktarılması ve iki ayrı araştırmacı tarafından kodların oluşturulması ve karşılaştırılması yöntemleri kullanılmıştır. Araştırmanın dış güvenirliğini (teyit edilebilirliğini) sağlamak için ise araştırmanın ham verilerinin saklanması yöntemi kullanılmıştır (Creswell ve Creswell, 2018).

Araştırmanın Etik Boyutu

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Araştırmaya başlamadan önce bir üniversitenin Klinik Araştırmalar Etik Kurulu'ndan etik onay alınmıştır (Karar No:2023/636). Araştırmalarda insan onuru ve bireysel hakların korunması gerektirdiğinden katılımcıların bilgilendirilmiş onamları yazılı olarak alınmıştır. Görüşmenin başlangıcında araştırmada yer alan ebeveynlere, araştırmaya katılımın tamamen gönüllülük esaslı olduğu ve araştırmadan istedikleri zaman ayrılabilecekleri; görüşme kaydının alınacağı, katılımcıya ait özel bilgilerin paylaşılmayacağı açık bir dille sözel olarak ifade edilmiştir. Çalışmada görüşleri alınan ebeveynlerin gerçek isimleri mahremiyetin korunması ilkesi çerçevesinde gizli tutulmuş ve her katılımcıya farklı kod adı verilerek kaydedilmiştir.

3. BULGULAR

Bu nitel çalışmanın bulguları, bakım veren ebeveynlerle yapılan yarı yapılandırılmış görüşmelere dayalı tematik analiz sonucunda dört ana tema ve on alt tema altında sunulmuştur. Katılımcılar 12 anneden oluşmakta; yaş ortalamaları 35-42 arasında değişmekte, çocukların çoğu diyaliz aşamasında olup bazıları (K4, K7, K10) böbrek nakli geçirmiştir. Her alt temada katılımcıların görüşü doğrudan alıntı ifadelerle verilmiştir.

ANA TEMA 1: HASTALIĞA BAKIŞ VE HASTALIK İLE İLGİLİ GÖRÜŞLER

Bu tema, ebeveynlerin KBY tanısına ilişkin bilgi düzeylerini, tanı öncesi/sonrası süreç algılarını ve nakil beklentilerini kapsamaktadır.

Alt Tema 1.1: Tanı Anındaki Şok ve Bilgi Eksikliği

Katılımcılar, KBY tanısının beklenmedik şekilde geldiğini, çocuklarda nadir görüldüğü algısıyla büyük bir şok yaşadıklarını ve ilk başta tıbbi terimleri anlamakta zorlandıklarını detaylı olarak anlatmışlardır.

- **K1:** "Çocuğum 8 yaşındaydı, bir akşam idrarı azalmış ve yüzü şişmişti. Hastanede doktor 'kronik böbrek yetmezliği' dediğinde dünyam başıma yıkıldı. Yetişkinlerde duyuyordum ama çocuklarda olacağını hiç düşünmemiştim. Doktorlar anlattı ama ilk başta hiçbir şey anlayamadım, sanki yabancı bir dil konuşuyorlardı. Eve döndüğümde gece boyunca ağladım, 'bu nasıl olur, bizim ailede hiç yoktu' diye düşündüm."
- **K2:** "Tanıyı aldığımızda sanki bir kabus gibiydi. 'Nasıl olur, bizim çocuğumuz neden?' diye isyan ettim. Bilgim yoktu, hemen internetten araştırdım ama hepsi korkutucuydu; diyaliz, nakil, ömür boyu ilaç… İlk hafta uyuyamadım, eşimle saatlerce konuştuk. Doktorun 'erken evre' demesi bile teselli etmedi, çünkü ne yapacağımızı bilemiyorduk."
- **K5:** "Hastanede söylediklerinde donup kaldım. Önce inanmadım, ikinci bir doktora gittik, üçüncüye gittik. Bilgi eksikliği yüzünden ne yapacağımızı bilemedik; 'diyet mi, ilaç mı, yoksa hemen diyaliz mi?' diye soruyordum ama cevaplar karmaşık geliyordu. Çocuğumun yüzüne bakıp 'benim hatam mı?' diye kendimi suçladım o an."

Alt Tema 1.2: Hastalık Öncesi Normal Yaşamdan Kronik Sürece Geçiş

Ebeveynler, çocuklarının büyüme geriliği, sık idrar yolu enfeksiyonları ve yorgunluk gibi erken belirtileri fark ettiklerini ancak bunları önemsiz sandıklarını, normal çocukluk döneminden kronik hastalığa geçişin ani ve yıkıcı olduğunu vurgulamışlardır.

- **K3:** "Hastalık öncesi her şey normaldi; okula gidiyor, arkadaşlarıyla oynuyor, sadece biraz yorgun ve iştahsızdı. Sonra idrar azaldı, bacakları şişti, kan testleri kötü çıktı. Süreç

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

yavaş yavaş ilerledi, biz de fark etmedik. ‘Büyüme evresi’ diye geçiştirdik, ama bir sabah acile gittiğimizde ‘kronik’ dediler. Hayatımız bir anda hastane odalarına, diyaliz programlarına döndü.”

- **K8:** “Okula gidiyordu, spor yapıyordu, bisiklete biniyordu. Birden böbrek yetmezliği çıktı, kreatinin seviyesi fırladı. Öncesi ile sonrası arasında uçurum var; hafta sonları pikniğe giderdik, şimdi her hafta hastane. ‘Keşke daha erken fark etseydik’ diye pişmanlık duyuyorum, o normal hayatı özlüyoruz.”
- **K11:** “Hastalık süreci bizi hazırlıksız yakaladı. Tedavi başlayana kadar ‘geçer, vitamin veririz’ diye umut ettik, ama kronik olduğunu anladık. Çocuk okulda arkadaşlarından geri kalıyordu, biz de işten izin alıp doktor doktor geziyorduk. O masum günler bir daha gelmeyecek gibi hissediyoruz.”

ANA TEMA 2: TEDAVİ VE BAKIM SÜRECİ İLE İLGİLİ GÖRÜŞLER

Bu tema, hastane-ev bakım ayrımını, bakım veren olarak yaşanan zorlukları ve kurum-çocuk ilişkilerini ele almaktadır.

Alt Tema 2.1: Hastanede Tedavi Süreci

Katılımcılar, diyaliz seanslarının saatlerce sürmesi, ilaç yan etkileri ve hastane beklemelerinin yarattığı yorgunluğu detaylıca tarif etmişlerdir.

- **K1:** “Hastanede diyaliz günleri çok kötüydü. Sabah erkenden gidip akşam geç dönüyorduk, çocuk makineye bağlıyken ağlıyordu, ‘anne acıyor’ diyordu. İlaçlar yüzünden iştahı kapandı, sürekli kusuyordu, tansiyonu düşüyordu. Muayenelerde her seferinde yeni bir kan testi, yeni bir iğne… Saatlerce koridorda bekliyorduk, yorgunluktan ayakta duramıyordum.”
- **K7:** “Diyaliz sırasında kan basıncı aniden düşüyor, acil müdahale gerekiyordu. Hemşireler koşuşturuyordu, çocuğum panikliyordu. Muayenelerde doktorlar acele ediyordu, sorularımıza tam cevap vermiyorlardı. O seanslar sırasında çocuğun acısını izlemek, kendi gücümü tüketiyordu.”
- **K9:** “Hastane tedavisi yorucuydu; diyaliz makinesine bağlıyken çocuğun rengi soluyor, midesi bulanıyordu. İlaçları içtikten sonra uykusu kaçıyor, gece boyunca yanında oturuyordum. Her muayenede ‘bugün de yeni bir sorun’ diye çıkıyorduk, psikolojik olarak da bizi bitiriyordu.”

Alt Tema 2.2: Evde Bakım Süreci ve Bakım Sağlayıcı Olarak Yaşanılan Sorunlar

Evde diyet kısıtlamaları, ilaç takibi, periton diyalizi gibi rutinlerin yarattığı fiziksel ve zihinsel yükü anlatmışlardır.

- **K2:** “Evde her şeyi ben yönetiyorum; diyet listesine uymak için her yemeği tartıyorum, tuzsuz ve potasyumsuz özel yemekler pişiriyorum. İlaç saatlerini takip etmek, gece uyanıp tansiyon ölçmekten uyuyamıyorum. İşimi de yarı zamanlıya çevirdim, kendi sağlığımı unuttum. Bazen ‘bu yükü tek başıma nasıl taşıyacağım’ diye düşünüyorum.”
- **K4:** “Evde bakım en zoruydu. Periton diyalizi yaparken her gün karnına kateterden sıvı doldurup boşaltıyorduk, enfeksiyon korkusuyla yaşıyorduk. Gece 3’te alarm çalınca uyanıyordum, çocuğum uyurken ben tetikteydim. Yemek pişirmek, okul ödevlerine yardım etmek… Tüm günümü buna adadım.”

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

- **K10:** "Bakım verirken kendi işimi bıraktım. Çocukla ilgili her şeyi öğrenmek zorunda kaldım; sıvı kısıtlaması, günlük tartım, ilaç kutularını doldurmak. Yorgunluktan tükeniyorum, eşimle bile tartışıyoruz. Bu süreç bizi hem fiziksel hem duygusal olarak ezdi."

Alt Tema 2.3: Tedavi Sürecinde Çocukla ve Tedavi Kurumu ile Karşılaşılan Problemler

Çocuğun tedavi direnci, hastane personeliyle iletişim kopuklukları ve randevu sorunlarını vurgulamışlardır.

- **K3:** "Çocuğum diyalize gitmek istemiyor, 'neden ben, diğer çocuklar gibi oynayayım' diye ağlıyordu. Onunla iletişimde zorlanıyorum; 'anne yalan söyleme, iyileşmeyecek miyim?' diye soruyor. Hastanede randevular gecikiyor, doktorlar acele ediyor, bizi dinlemiyor gibi hissediyoruz."
- **K6:** "Hastanede randevu saatleri tutmuyor, bazen 4-5 saat bekliyoruz. Doktorlar acele ediyor, sorularımıza kısa cevap veriyor. Kurumla ilgili en büyük sorun iletişim eksikliği; hemşireler değişiyor, her seferinde aynı şeyleri anlatıyoruz. Çocuk da bunlardan etkilenip tedaviye karşı çıkıyor."
- **K12:** "Çocuk ilaçları içmek istemiyor, her seferinde kriz çıkıyor; 'acıyor, içmeyeceğim' diye bağırıyor. Hastane personeli bazen anlayışsız davranıyor, 'her çocuk böyle' diyorlar. Bizim yaşadığımızı tam anlamıyorlar, bu da bizi yalnız hissettiriyor."

ANA TEMA 3: TEDAVİ VE BAKIM SÜRECİNİN ETKİLERİ

Bu tema, ekonomik, psikolojik, fiziksel ve sosyo-kültürel boyutları içermektedir.

Alt Tema 3.1: Ekonomik Etkiler ve Maddi İhtiyaçlarda Yaşanılan Problemler

Tedavi masrafları, iş kaybı, SGK kapsamı dışındaki özel diyet ve ulaşım giderlerini detaylandırmışlardır.

- **K1:** "İlaçlar ve diyaliz için harcadığımız para yüzünden evdeki diğer giderleri kısıyoruz. Nakil beklerken borçlandık, özel diyet ürünlerini almak için market market geziyoruz. Baba fazla mesai yapıyor ama yetmiyor; bazen 'bu ay neyi kısalım' diye hesap kitap yapıyoruz."
- **K4:** "Hastaneye gidiş-gelişler, özel diyet ürünleri, nakil sonrası immünosupresan ilaçlar… Ekonomik olarak çöktük, baba işini değiştirdi, maaşı düştü. Maddi destek alamadık, aile büyüklerinden borç aldık. Her ay faturalar birikiyor."
- **K7:** "Nakil sonrası ilaçlar çok pahalı, aylık 5-6 bin lira gidiyor. Ulaşım ve hastane yemekleri de cabası. Hastalığın ailede yarattığı ekonomik değişim yüzünden evimizi küçültmek zorunda kaldık."

Alt Tema 3.2: Psikolojik Etkiler ve Duygusal Değişim Süreci

Kaygı, suçluluk, aile içi gerilimler ve manevi mücadeleleri uzun uzun anlatmışlardır.

- **K2:** "Sürekli 'neden bizim çocuğumuz?' diye düşünüp depresyona girdim. Diğer çocuklarımızla da ilgilenemiyorum, eşimle tartışmalarımız arttı. Gece uykum kaçıyor, 'ya bir şey olursa' diye korkuyorum. Kabullenme süreci çok uzun sürdü, manevi olarak da sarsıldım."

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

- **K5:** "Çocuğumla iletişimde suçluluk hissediyorum; 'benim genlerimden mi?' diye düşünüyorum. Aile içi tartışmalar arttı, eşimle bile gerildik. Diğer çocuklarımız 'anne bizi unuttun' diyor, bu da vicdan azabı yaratıyor."
- **K8:** "Psikolojik olarak tükendim. Hastalık sürecinde eşimle ilişkilerimiz bozuldu, birbirimizi suçladık. Dua etmek, camiye gitmek biraz rahatlattı ama suçlama duygusu hâlâ içimde."

Alt Tema 3.3: Fiziksel Etkiler ve Çocuğun Görünümündeki Değişim

Çocuğun şişlik, büyüme geriliği, renk değişiklikleri ve ebeveynlerin kendi fiziksel yorgunluğunu detaylandırmışlardır.

- **K3:** "Çocuğumun yüzü şişti, kilosu arttı, boyu uzamadı. Okulda alay ediyorlardı, o da utanıyordu; ben de onunla birlikte üzülüyordum. Kendim de sırt ağrılarından, uykusuzluktan fiziksel olarak çöktüm, kilo verdim."
- **K6:** "Fiziksel değişimler yüzünden çocuğun özgüveni düştü; saçları döküldü, rengi soldu. Ben de sürekli hastanede koşturmaktan bel fıtığı oldum, yorgunluktan yürüyemiyorum bazen."
- **K9:** "Diyaliz sonrası çocuğun rengi soldu, göz altları morardı, şişlikler indiğinde cildi sarktı. Bu görünüm değişiklikleri bizi derinden sarstı; aynaya bakınca 'eskiden ne kadar sağlıklıydı' diye ağlıyorum."

Alt Tema 3.4: Sosyo-Kültürel Etkiler ve Maneviyat

Sosyal izolasyon, akraba ilişkileri, kültürel kimlik ve manevi başa çıkma yollarını anlatmışlardır.

- **K10:** "Arkadaş çevremiz azaldı, 'hasta çocuk' diye uzak duruyorlar. Akrabalar 'neden nakil olmuyor' diye sorup eleştiriyor, yardım etmiyor. Sosyal hayattan koptuk, kamusal alanlarda bile rahatsız oluyoruz."
- **K11:** "Kültürel olarak 'kader' diyoruz ama suçlama da oluyor; 'ailede kan bağı var mı?' diye soruyorlar. Maneviyatımız güçlendi; dua ederek, hocaya giderek dayanıyoruz. Teslimiyetle başa çıkıyoruz ama bazen isyan ediyoruz."
- **K12:** "Sosyal çevrede 'kronik hasta annesi' diye damgalandık. Bölgemizin geleneklerinde farklı etnik kimliklerimiz yok ama bu hastalık bizi dışladı. Akraba ziyaretleri azaldı, manevi olarak inancımız arttı ama yalnızlık da derinleşti."

ANA TEMA 4: TEDAVİ SONRASI SÜREÇ İLE İLGİLİ GÖRÜŞLER

Nakil sonrası yaşam, umut ve yeni zorlukları içermektedir (nakil geçiren K4, K7, K10 ve onların deneyimlerini paylaşan diğerleri).

Alt Tema 4.1: Nakil Süreci ve Sonrası Uyum

- **K4:** "Nakil umut verdi ama reddedilme korkusuyla yaşadık; ameliyat öncesi bekleme sürecinde uykusuz geceler geçirdik. Şimdi ilaçlar devam ediyor, diyet biraz gevşedi ama her ay kontrole gidiyoruz. Çocuk daha enerjik, biz de biraz nefes aldık ama sürekli tetikteyiz."
- **K7:** "Nakil sonrası hayat normale döndü gibi; diyaliz bitti, çocuk okula tam zamanlı gidebiliyor. Ama immünosupresan ilaçların yan etkileri var, enfeksiyon korkusu hâlâ devam ediyor. Doktorlarla iletişim daha iyi, minnettarız ama yeni bir rutin oluştu."

- **K10:** "Nakil sürecinde donör bulma stresi bitti, aylarca testler yaptırdık. Sonrası özgürlük gibi; çocuğun yüzü güldü, biz de rahatladık. Ama yeni bakım rutini var; ilaç saatleri, kontroller… Yine de 'en kötüsünü atlattık' diye şükrediyoruz."

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada ebeveynlerin tanı anını bir kırılma noktası olarak deneyimledikleri; şok, inkâr ve yoğun bilgi gereksinimi ile karakterize bir süreç yaşadıkları belirlenmiştir. Katılımcıların tıbbi terminolojiyi anlamakta zorlandıklarını ve bilgiye internet üzerinden ulaşmaya çalıştıklarını ifade etmeleri, sağlık okuryazarlığı ve bilgilendirme sürecindeki boşluğa işaret etmektedir. Tong ve arkadaşlarının (2008) pediatrik kronik böbrek hastalığında ebeveyn deneyimlerini inceleyen meta-sentezinde de tanı sonrası dönemin belirsizlik, kontrol kaybı ve bilgi arayışı ile tanımlandığı bildirilmiştir. Benzer şekilde Swallow ve arkadaşları (2012), ebeveynlerin zamanla uzmanlaşmış bakım verene dönüştüklerini, ancak bu dönüşümün profesyonel destekten çok deneme-yanılma yoluyla gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Bulgularımız, tanı sonrası dönemde yapılandırılmış, kademeli ve anlaşılır bir hasta-aile eğitimi programının gerekliliğini desteklemektedir.

Tedavi ve bakım sürecine ilişkin bulgular, hastane temelli tedavinin fiziksel yorgunluk, uzun bekleme süreleri ve iletişim kopukluğu ile; ev temelli bakımın ise diyet, sıvı kısıtlaması, ilaç takibi ve enfeksiyon korkusu ile ilişkilendirildiğini göstermiştir. Özellikle periton diyalizi uygulayan annelerin gece uyanmalarına ve sürekli tetikte olma haline vurgu yapması, literatürde tanımlanan kesintisiz bakım nöbeti olgusuyla örtüşmektedir (Wightman vd., 2019). Medway ve arkadaşları (2015), bakım veren ebeveynlerde uyku bozukluklarının ve tükenmişliğin normal popülasyona göre anlamlı düzeyde yüksek olduğunu saptamıştır. Çocuğun tedaviye direnç göstermesi ve iyileşip iyileşmeyeceğini sorarak ebeveyni zorlaması ise, kronik hastalığa sahip çocuklarla iletişimde ebeveynlerin yaşadığı ikilemi yansıtmakta olup, gelişim dönemine uygun bilgilendirme stratejilerinin önemini göstermektedir (Crawford vd., 2020).

Ekonomik etkiler, katılımcıların en çok vurguladığı boyutlardan biri olmuştur. Ebeveynlerin çalışma hayatından çekilmesi, immünosupresif ilaç ve özel diyet giderleri ile ulaşım maliyetleri aileleri borçlanmaya sürüklemiştir. Splinter ve arkadaşları (2018), pediatrik kronik böbrek hastalığında doğrudan tıbbi maliyetlerin yanı sıra dolaylı maliyetlerin ve verimlilik kayıplarının aile bütçesi üzerinde belirleyici bir yük oluşturduğunu göstermiştir. Psikolojik boyutta ise suçluluk, kaygı, eşler arası gerilim ve diğer çocuklara yeterince zaman ayıramamaya bağlı vicdan azabı öne çıkmıştır. Wightman (2020), pediatrik nefroloji popülasyonunda bakım verenlerde depresyon ve anksiyete oranlarının yüksek olduğunu, buna karşın rutin psikososyal tarama uygulamalarının yetersiz kaldığını belirtmektedir. Bu bulgu, nefroloji kliniklerinde psikolog ve sosyal hizmet uzmanının ekibin daimi üyesi olması gerektiğini desteklemektedir.

Sosyo-kültürel etkiler ve maneviyat teması, çalışmanın kültürel bağlama özgü yönlerini ortaya koymuştur. Katılımcılar sosyal çevrenin daralmasını, akrabaların eleştirel tutumunu ve kronik hasta annesi olarak damgalanmayı dile getirmişlerdir. Damgalanma deneyimi, kronik hastalıklı çocuk ailelerinde sosyal desteğin azalmasına ve izolasyona yol açan temel mekanizmalardan biri olarak tanımlanmaktadır (Mitter vd., 2019). Buna karşılık dua, ibadet ve kadere teslimiyet gibi manevi başa çıkma yöntemleri katılımcılar için önemli bir dayanıklılık kaynağı işlevi

görmüştür. Türkiye'de yürütülen fenomenolojik bir çalışma da hemodiyaliz sürecinin biyopsikososyal açıdan yıpratıcı olmasına karşın, hastaların manevi başa çıkma stratejilerini etkili bir kaynak olarak kullandıklarını ortaya koymuştur (Demir Çam ve Uzun, 2025). Bu bulgu, çalışmamızda ebeveynlerin dua ve teslimiyet yoluyla dayanıklılık geliştirmeleriyle örtüşmektedir. Bu durum, kültüre duyarlı bakım yaklaşımlarının ve manevi bakımın hemşirelik uygulamalarına entegrasyonunun önemini ortaya koymaktadır.

Son olarak, nakil geçiren çocukların ebeveynleri süreci hem bir kurtuluş hem de yeni bir kaygı dönemi olarak tanımlamıştır. Diyalizin sona ermesi ve çocuğun okula dönmesi büyük bir rahatlama sağlarken; ret riski, enfeksiyon korkusu ve immünosupresif tedaviye bağlı yan etkiler yeni bir tetikte olma hali yaratmıştır. Bu bulgu, nakil sonrası dönemin iyileşme değil, hastalık yönetiminin biçim değiştirmesi olarak kavramsallaştırılması gerektiğini savunan çalışmalarla uyumludur (Tong vd., 2011; Crawford vd., 20202). Dolayısıyla nakil sonrası izlemde tedaviye uyum kadar ailenin psikososyal uyumunun da sistematik biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu fenomenolojik çalışma, KBY'li çocuğa sahip ebeveynlerin tanı anından nakil sonrası döneme uzanan süreçte yoğun bir şok ve belirsizlik deneyimi yaşadıklarını; hastane ve ev temelli bakımın fiziksel tükenmişliğe yol açtığını; sürecin ekonomik çöküş, psikolojik yıpranma, sosyal izolasyon ve damgalanma gibi çok boyutlu etkiler doğurduğunu; buna karşın maneviyatın önemli bir başa çıkma kaynağı işlevi gördüğünü ortaya koymuştur. Bu doğrultuda; tanı sonrası dönemde ailelere sade bir dille hazırlanmış, kademeli ve yazılı materyalle desteklenen yapılandırılmış eğitim programlarının sunulması, pediatrik nefroloji kliniklerinde psikolog ve sosyal hizmet uzmanını içeren multidisipliner ekiplerin oluşturulması ve bakım verenlere düzenli psikososyal tarama yapılması, ebeveynlere yönelik akran destek gruplarının ve dinlenme bakım hizmetlerinin yaygınlaştırılması, özel diyet ürünleri, ulaşım ve immünosupresif tedavi giderlerini kapsayacak biçimde sosyal güvenlik desteklerinin genişletilmesi, randevu ve iletişim süreçlerinin aile merkezli bakım ilkeleri doğrultusunda yeniden düzenlenmesi, manevi bakımın hemşirelik uygulamalarına kültüre duyarlı biçimde entegre edilmesi ve nakil sonrası izlemde ailenin psikososyal uyumunun sistematik olarak değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca gelecekte babaların ve kardeşlerin deneyimlerini de kapsayan, farklı merkezlerde yürütülecek boylamsal nitel çalışmalara gereksinim duyulmaktadır.

6. KAYNAKLAR

Américo, B., Clegg, S., Tureta, C. (2022). Qualitative Management Research in Context: Data Collection, Interpretation and Narrative. Florida: Routledge.

Becherucci, F., Roperto, R. M., Materassi, M., & Romagnani, P. (2016). Chronic kidney disease in children. Clinical Kidney Journal, 9(4), 583-591. https://doi.org/10.1093/ckj/sfw047

Crawford, K., Wilson, C., Low, J. K., Manias, E., & Williams, A. (2020). Transitioning adolescents to adult nephrology care: a systematic review of the experiences of

adolescents, parents, and health professionals. Pediatric nephrology (Berlin, Germany), 35(4), 555–567. https://doi.org/10.1007/s00467-019-04223-9

Creswell, J.W., & Creswell, J.D. (2018). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. California: SAGE Publications.

Demir Çam, S., & Uzun, S. (2025). Bio-psychosocial dimension of hemodialysis and spiritual coping strategies: A phenomenological study on patient experiences in Türkiye. Journal of Religion and Health, 64(4), 2525–2541. https://doi.org/10.1007/s10943-024-02219-w

Flick, U. (2022). The SAGE Handbook of Qualitative Research Design. California: SAGE Publications.

Harambat, J., van Stralen, K. J., Kim, J. J., & Tizard, E. J. (2012). Epidemiology of chronic kidney disease in children. Pediatric Nephrology, 27(3), 363-373. https://doi.org/10.1007/s00467-011-1939-1

McNabb, D. E. (2015). Research methods for political science: Quantitative and Qualitative methods. London: Routledge.

Medway, M., Tong, A., Craig, J. C., Kim, S., Mackie, F., McTaggart, S., Walker, A., & Wong, G. (2015). Parental perspectives on the financial impact of caring for a child with CKD. American Journal of Kidney Diseases, 65(3), 384-393. https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2014.07.019

Mitter, N., Ali, A., & Scior, K. (2019). Stigma experienced by families of individuals with intellectual disabilities and autism: A systematic review. Research in Developmental Disabilities, 89, 10-21. https://doi.org/10.1016/j.ridd.2019.03.001

Nicholas, D. B., Picone, G., & Selkirk, E. K. (2011). The lived experiences of children and adolescents with end-stage renal disease. Qualitative Health Research, 21(2), 162-173. https://doi.org/10.1177/1049732310382789

Splinter, A., Tjaden, L. A., Haverman, L., Adams, B., Collard, L., Cransberg, K., … Groothoff, J. W. (2018). Children on dialysis as well as renal transplanted children report severely impaired health-related quality of life. Quality of Life Research, 27(6), 1445-1454. https://doi.org/10.1007/s11136-018-1789-4

Süleymanlar, G., Utaş, C., Arinsoy, T., Ateş, K., Altun, B., Altiparmak, M. R., … Serdengeçti, K. (2011). A population-based survey of chronic renal disease in Turkey: The CREDIT study. Nephrology Dialysis Transplantation, 26(6), 1862-1871. https://doi.org/10.1093/ndt/gfq656

Swallow, V. M., Lambert, H., Santacroce, S., & Macfadyen, A. (2012). Fathers' and mothers' developing care-giving roles for a child with chronic kidney disease. Journal of Renal Care, 38(2), 87-98.

Timmermans, S., & Tavory, I. (2022). Data Analysis in Qualitative Research: Theorizing with Abductive Analysis. Chicago: University of Chicago Press.

Tong, A., Lowe, A., Sainsbury, P., & Craig, J. C. (2008). Experiences of parents who have children with chronic kidney disease: A systematic review of qualitative studies. Pediatrics, 121(2), 349-360. https://doi.org/10.1542/peds.2006-3470

Tong, A., Morton, R., Howard, K., McTaggart, S., & Craig, J. C. (2011). Adolescent perspectives on life after kidney transplantation. Pediatric Transplantation, 15(3), 285-293. https://doi.org/10.1111/j.1399-3046.2010.01470.x

Wightman, A. (2020). Caregiver burden in pediatric dialysis. Pediatric Nephrology, 35(9), 1575-1583. https://doi.org/10.1007/s00467-019-04332-5

Wightman, A., Zimmerman, C. T., Neul, S., Lepere, K., Cedars, K., & Opel, D. (2019). Caregiver Experience in Pediatric Dialysis. Pediatrics, 143(2), e20182102. https://doi.org/10.1542/peds.2018-2102

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

İLERİ PREMATÜRE DOĞUMDA ZİHİNSEL SENKRONİZASYON KAYBI ÜZERİNE

Öğr. Gör. Dr., Eda Öztürk Belet
İstanbul Kültür Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu
e.ozturk@iku.edu.tr, pskedaozturk@gmail.com - ORCID: 0000-0002-7718-7200

ÖZET

Ebeveynlik kimliğinin inşası, biyolojik doğumdan çok önce başlayan bir zihinsel süreçtir. Normal gebelik sürecinde anne ve baba, bebeğe ilişkin zihinsel temsiller oluşturmakta; ona hayali bir kişilik atfetmekte ve ebeveynlik rollerine dair içsel provalar yapmaktadır. Stern'in (1995) "hayali bebek" kavramı, ebeveynin zihninde şekillenen bu temsili ifade etmekte olup gerçek bebeğin doğumuyla birlikte sınanacak olan bu yapının önemi vurgulanmaktadır. Bu zihinsel inşa süreci, ebeveynin bebeğiyle kuracağı ilk duygusal bağın ve bağlanma güvenliğinin temelini oluşturmaktadır. Prematüre doğum ise bu sürecin henüz tamamlanmadığı bir evrede gerçekleşmekte; biyolojik doğumun hızı ile ebeveynin zihinsel hazırlık süreci arasında bir kopuş yaratmaktadır. Bu çalışmada söz konusu kopuş, "zihinsel senkronizasyon kaybı" olarak adlandırılmaktadır. Kuvözdeki gerçek bebek ile ebeveynin zihnindeki hayali bebek arasındaki uyumsuzluk, ebeveynin bebeğiyle özdeşim kurmasını güçleştirmekte ve duygusal yabancılaşmayı tetikleyebilmektedir. Bu durum yalnızca duygusal bir kopukluğu değil; ebeveynlik kimliğinin zamanından önce ve hazırlıksız biçimde yeniden kurulmak zorunda kalındığı psikolojik bir süreci de ifade etmektedir. Yoğun bakım ortamının steril ve teknolojik yapısı bu süreci daha da güçleştirmekte; ebeveynlerin bebeğe duygusal olarak yaklaşmasını ve bakım verme rolünü benimsemesini kısıtlamaktadır. Bu çalışma, prematüre doğumun ebeveyn psikolojisine etkisini zihinsel senkronizasyon kaybı ekseninde kavramsal olarak ele almakta; klinik uygulamada erken dönem ebeveyn-bebek bağlanmasını desteklemeye yönelik değerlendirmeler sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler : Prematüre doğum, zihinsel senkronizasyon kaybı, hayali bebek, ebeveynlik, ebeveyn-bebek bağlanması

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

İNSANİ GELİŞMİŞLİK SAĞLIK SİSTEMİ ETKİNLİĞİNE DÖNÜŞÜYOR MU? İKİ AŞAMALI VZA VE SIMAR–WILSON BOOTSTRAP ANALİZİ

Dr. Öğr. Üyesi Yasin ARAS

Aksaray Üniversitesi, Sağlık Yönetimi Bölümü,

yasinaras@aksaray.edu.tr- ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5171-7779

ÖZET

Sağlık sistemlerinin başarısı sadece sahip olunan finansal ve insan kaynakların miktarına değil, bu kaynakların toplum sağlığı sonuçlarına ne ölçüde etkin dönüştürülebildiğine de bağlıdır. Bu çalışmanın amacı, ülkelerin sağlık sistemi teknik etkinliklerini belirlemek ve insani gelişmişlik düzeyinin sağlık sistemi etkinliği üzerindeki etkisini incelemektir. Araştırma, uluslararası ikincil veriler kullanılarak gerçekleştirilen kesitsel ve karşılaştırmalı bir çalışmadır. Analize, İnsani Gelişme İndeksi (HDI) verisi bulunan ve sağlık sistemi göstergeleriyle eşleştirilebilen 184 ülke dahil edilmiştir. İlk aşamada ülkelerin sağlık sistemi etkinlikleri, çıktı yönelimli ve değişken ölçek getirili Veri Zarflama Analizi (VZA-BCC) kullanılarak hesaplanmıştır. Modelde kişi başına sağlık harcaması, hekim sayısı, hemşire ve ebe sayısı ile hastane yatağı sayısı girdi değişkenleri; Evrensel Sağlık Kapsamı Hizmet Kapsama İndeksi (UHC Service Coverage Index), bebek ölüm hızının ters dönüştürülmüş değeri ve anne ölüm hızının ters dönüştürülmüş değeri ise çıktı değişkenleri olarak kullanılmıştır. HDI'nin sağlık bileşeni içerisinde yaşam beklentisi yer aldığından, olası mekanik ilişkiyi önlemek amacıyla yaşam beklentisi VZA çıktıları arasına dahil edilmemiştir. VZA sonucunda ülkelerin ortalama teknik etkinlik skoru 0,942, medyan etkinlik skoru 0,976 olarak bulunmuş; 68 ülkenin tam etkin, 116 ülkenin ise etkinlik sınırının altında olduğu belirlenmiştir. İkinci aşamada HDI'nin sağlık sistemi etkinsizliği üzerindeki etkisi Simar–Wilson bootstrap truncated regression yöntemiyle ve 2.000 bootstrap tekrarı kullanılarak incelenmiştir. Analiz sonucunda HDI katsayısının negatif olduğu (β=-1,208; %95 bootstrap GA:-2,962–-0,531) ve güven aralığının sıfırı içermediği belirlenmiştir. Bulgular, insani gelişmişlik düzeyi yükseldikçe sağlık sistemlerindeki teknik etkinsizliğin azaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, sağlık sistemlerinin performansının yalnızca sağlık kaynaklarının artırılmasıyla değil, ülkelerin daha geniş insani gelişmişlik kapasitesinin güçlendirilmesiyle birlikte ele alınması gerektiği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: İnsani Gelişme İndeksi, Sağlık Sistemi Etkinliği, Veri Zarflama Analizi, Simar–Wilson Bootstrap, Evrensel Sağlık Kapsamı

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

DOES HUMAN DEVELOPMENT TRANSLATE INTO HEALTH SYSTEM EFFICIENCY? A TWO-STAGE DEA AND SIMAR–WILSON BOOTSTRAP ANALYSIS

Assist. Prof. Yasin ARAS

Aksaray University, Department of Health Management,

yasinaras@aksaray.edu.tr- ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5171-7779

ABSTRACT

The performance of health systems depends not only on the amount of financial and human resources available but also on how efficiently these resources are transformed into population health outcomes. This study aimed to estimate the technical efficiency of national health systems and examine the role of human development in explaining differences in health system efficiency. The study employed a cross-sectional comparative design based on international secondary data. A total of 184 countries with available Human Development Index (HDI) data and matching health system indicators were included. In the first stage, health system efficiency was estimated using an output-oriented, variable returns to scale Data Envelopment Analysis (DEA-BCC) model. Per capita health expenditure, physician density, nurse and midwife density, and hospital bed density were used as input variables. The Universal Health Coverage Service Coverage Index (UHC Service Coverage Index), inverse infant mortality, and inverse maternal mortality were included as output variables. Because life expectancy is already incorporated into the health dimension of the HDI, it was excluded from the DEA outputs to avoid a potential mechanical relationship. The DEA results showed a mean technical efficiency score of 0.942 and a median score of 0.976. A total of 68 countries were fully efficient, whereas 116 countries operated below the efficiency frontier. In the second stage, the association between HDI and health system inefficiency was examined using Simar–Wilson bootstrap truncated regression with 2,000 bootstrap replications. The HDI coefficient was negative (β = -1.208; 95% bootstrap CI: -2.962 to -0.531), and the confidence interval did not include zero. The findings indicate that higher levels of human development are associated with lower technical inefficiency in health systems. In conclusion, improving health system performance requires not only increasing health resources but also strengthening broader human development capacities.

Keywords: Human Development Index, Health System Efficiency, Data Envelopment Analysis, Simar–Wilson Bootstrap, Universal Health Coverage

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

GENÇ FUTBOLCULARDA UYGULANAN FIFA 11+ ISINMA PROGRAMININ SEÇİLMİŞ MOTOR PARAMETRELERE ETKİSİ

Evren ÇELİK
İstanbul Gelişim Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,
celikevren36@gmail.com - 0009-0008-3452-3375

Dr. Öğr. Üyesi Ömer AKSOY
İstanbul Gelişim Üniversitesi / Spor Bilimleri Fakültesi,
aksoyyomerr@gmail.com - 0000-0002-0976-4977

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, genç futbolculara 8 hafta boyunca uygulanan FIFA 11+ ısınma programının motorik performans özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmada ön test–son test kontrol gruplu yarı deneysel desen kullanılmıştır. Çalışmaya 17-18 yaş aralığında araştırma grubu (n=12) ve kontrol grubu (n=12) olmak üzere toplam 24 erkek futbolcu katılmıştır. Araştırma grubuna haftada 3 gün FIFA 11+ programı uygulanırken, kontrol grubuna geleneksel ısınma yaptırılmıştır. Araştırma kapsamında sürat (10 m ve 20 m), esneklik (otur-uzan), dikey sıçrama ve bacak kuvveti, üst vücut kuvveti (geriye sağlık topu atma), denge (flamingo testi) ve çeviklik (505 çeviklik testi) parametreleri değerlendirilmiştir. Verilerin analizinde SPSS programı kullanılmış, normallik dağılımı Shapiro-Wilk testi ile incelenmiş ve verilerin normal dağıldığı belirlenmiştir. Gruplar arasındaki farklılıkların belirlenmesi amacıyla Mixed ANOVA testi uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre zaman etkisinde denge hata puanı ve sağlık topu fırlatma performansında anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Zaman × grup etkileşiminde ise dikey sıçrama, güç, kuvvet, uçuş süresi, 10 m sürat ve 20 m sürat parametrelerinde istatistiksel olarak anlamlı gelişmeler tespit edilmiştir. Grup etkisinde anlamlı farklılık görülmemiştir. Bununla birlikte deney grubunda esneklik, çeviklik, sürat ve dikey sıçrama performanslarında pratik açıdan dikkate değer gelişmeler belirlenmiştir. Sonuç olarak FIFA 11+ ısınma programının, genç futbolcuların özellikle sıçrama ve sürat performanslarını geliştirmede olumlu etkiler sağladığı görülmüştür. Bu çalışma, ilgili yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Futbol, Genç, Motor Parametreler, FIFA 11+ Isınma Programı

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

THE EFFECT OF THE FIFA 11+ WARM-UP PROGRAM APPLIED TO YOUNG SOCCER PLAYERS ON SELECTED MOTOR PARAMETERS

ABSTRACT

This thesis investigated the effects of an 8-week FIFA 11+ warm-up program on selected motor performance characteristics in young soccer players. A quasi-experimental pre-test/post-test control group design was employed. A total of 24 male soccer players aged 17–18 years voluntarily participated in the study and were assigned to either an experimental group (n = 12) or a control group (n = 12). While the experimental group performed the FIFA 11+ program three times per week, the control group followed a traditional warm-up routine. The assessed performance parameters included sprint performance (10 m and 20 m), flexibility (sit-and-reach test), vertical jump performance and leg power, upper-body strength (backward medicine ball throw), balance (Flamingo Balance Test), and agility (505 Agility Test). Data were analyzed using the SPSS statistical software package. Normality was assessed using the Shapiro–Wilk test, and the data were found to be normally distributed. Mixed ANOVA was subsequently performed to determine differences between groups and measurement times. he results revealed significant time effects for balance error score and medicine ball throw performance. Significant time × group interaction effects were observed for vertical jump height, power, force, flight time, 10-m sprint performance, and 20-m sprint performance. No significant differences were found for the main effect of group. Nevertheless, the experimental group demonstrated practically meaningful improvements in flexibility, agility, sprint performance, and vertical jump performance. Effect size analysis (Cohen's d) indicated small-to-moderate changes in several performance variables. In conclusion, the FIFA 11+ warm-up program positively influenced selected performance parameters in young soccer players, particularly those related to jumping and sprint performance. This study was derived from a master's thesis.

Keywords: Football, Youth, Motor Parameters, FIFA 11+ Warm-Up Program

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ÖDEME GECİKMESİ RİSKİ ALTINDA BÜTÇE KISITLI MÜDAHALE OPTİMİZASYONU

Öğr. Gör. Betül ÖZTEL
İstanbul Esenyurt Üniversitesi
betuloztel@esenyurt.edu.tr - ORCID: 0000-0002-5973-9323

Öğr. Gör. Gülfer YILDIZ
İstanbul Esenyurt Üniversitesi
gulferyildiz@esenyurt.edu.tr - ORCID: 0000-0002-3658-7160

ÖZET

Bu çalışmada, 100.000 banka müşterisinden oluşan sağlanan veri üzerinde sınırlı müdahale bütçesinin gecikme riski taşıyan müşterilere optimal dağıtımı incelenmiştir. Temel karar problemi, müşteri bazlı beklenen yararların toplamını bütçe kısıtı altında en çoklayan bir 0–1 tamsayılı program olarak kurulmuştur. Müşteri riskleri, optimizasyon modelinin amaç fonksiyonu katsayılarını elde etmek amacıyla Bernoulli dağılımı ve logit bağ fonksiyonuna dayalı L_2 düzenlileştirmeli modelle kestirilmiştir. Cezalı negatif log-olabilirliğin gradyan ve Hessian matrisi türetilmiş ve kestirim probleminin konveksliği gösterilmiştir. Eşit maliyet, eşit müdahale başarısı ve eşit kayıp varsayımı altında optimal çözümün sıralı risklerin ilk K tanesini seçmek olduğu değiş-tokuş yöntemiyle kanıtlanmıştır. Test kümesinde en yüksek riskli yüzde 10'luk gruba ayrılan bütçe, gecikme olaylarının yüzde 87,5'ini kapsamıştır. Yüzde 20 kapasitede kapsama yüzde 94,3'e çıkmakla birlikte marjinal kazanç belirgin biçimde azalmıştır. Normalize edilmiş maliyet/yarar oranının 0,02, 0,04 ve 0,06 olduğu senaryolarda optimal kapasite sırasıyla yüzde 22,1, yüzde 13,5 ve yüzde 9,8 bulunmuştur. Sonuçlar, optimal bütçenin yalnızca tahmin başarısına değil, sıralı marjinal risk ile müdahale maliyeti arasındaki dengeye bağlı olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: 0–1 Tamsayılı Programlama, bütçe Optimizasyonu, Kaynak Tahsisi, Marjinal Analiz, Ödeme Gecikmesi Riski

ABSTRACT

This study examines the optimal allocation of a limited intervention budget among bank customers exposed to payment delinquency risk, using a dataset of 100,000 bank customers. The core decision problem is formulated as a 0–1 integer program that maximizes the sum of customer-level expected benefits subject to a budget constraint. Customer risks are estimated using a regularized model based on the Bernoulli distribution and the logit link function, in order to derive the objective function coefficients of the optimization model. The gradient and Hessian matrix of the penalized negative log-likelihood are derived, and the convexity of the estimation problem is established. Under the assumptions of equal cost, equal intervention success, and equal loss, it is proven via an exchange argument that the optimal solution consists of selecting the top-k customers by ranked risk. On the test set, allocating the budget to the highest-risk decile (10%) covered 87.5% of delinquency events. Expanding capacity to 20% raised coverage to 94.3%, but with markedly diminishing marginal returns. Under normalized

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

cost/benefit ratio scenarios of 0.02, 0.04, and 0.06, the corresponding optimal capacities were found to be 22.1%, 13.5%, and 9.8%, respectively. The results indicate that the optimal budget depends not only on predictive performance but also on the trade-off between ranked marginal risk and intervention cost.

Keywords: 0–1 Integer Programming, Budget Optimization, Resource Allocation, Marginal Analysis, Payment Delinquency Risk

1. GIRIŞ

Ödeme gecikmesinin yönetimi, sürekli bir olasılık tahmini ile ayrık bir kaynak tahsis kararının ardışık olarak çözülmesini gerektirir. Birinci problem, gözlenen özellik vektörü x_i verildiğinde ikili rassal değişken Y_i için $P(Y_i = 1 | x_i)$ koşullu olasılığının tahminidir. İkinci problem ise bu olasılıklar bilindiğinde sonlu bir bütçe altında hangi müşterilerin seçileceğinin belirlenmesidir. Bütçe altında ayrık proje veya müşteri seçimi, sermaye tahsisi ve sırt çantası literatürüyle yakından ilişkilidir (nemhauser1969,martello1990,kellerer2004). Dolayısıyla çalışma, istatistiksel karar teorisi, konveks optimizasyon ve tamsayılı programlamanın kesişiminde yer almaktadır.

Kredi skorlamasında istatistiksel sınıflandırma ve yöneylem araştırması yöntemleri uzun süredir birlikte kullanılmaktadır (hand1997,thomas2002). Geniş ölçekli karşılaştırmalar, model değerlendirmesinin farklı veri kümeleri ve performans ölçütleri üzerinde yapılması gerektiğini göstermektedir (lessmann2015). Lojistik regresyon, olasılık üreten yapısı ve görece açıklanabilir katsayıları nedeniyle güçlü bir başlangıç yöntemidir (hosmer2013). Bununla birlikte yalnızca sınıflandırma doğruluğuna odaklanılması, düşük olay oranına sahip veri kümelerinde yanıltıcı olabilir. Bu nedenle ROC-AUC yanında pozitif sınıfa odaklanan PR-AUC, duyarlılık, kesinlik, F1 ve Brier skoru birlikte değerlendirilmelidir (fawcett2006,saito2015).

Bu çalışmanın amacı, sağlanan müşteri verisini kullanarak (i) ödeme gecikmesini Bernoulli olasılık modeliyle ifade etmek, (ii) cezalı negatif log-olabilirlik probleminin konveks yapısını incelemek, (iii) doğrusal olmayan özellik dönüşümlerinin model uzayına etkisini göstermek, (iv) tahmin edilen olasılıkları bütçe kısıtlı 0–1 seçim problemine dönüştürmek ve (v) eşit maliyetli özel durumun optimal çözümünü karakterize etmektir. Ampirik performans ölçütleri, bu matematiksel yapının veri üzerindeki sayısal davranışını değerlendirmek için kullanılmıştır.

2. VERI, MATEMATIKSEL MODEL VE SAYISAL YÖNTEM

2.1. VERI KÜMESI VE HEDEF DEĞIŞKEN

Sağlanan CSV dosyası 100.000 gözlem ve 21 sütun içermektedir. Veri kümesinde eksik değer bulunmamaktadır. Değişkenler demografik özellikleri, coğrafi ve ekonomik bölge göstergelerini, meslek ve gelir türünü, kart türünü, kredi kartı limitini, toplam borcu, limit kullanım oranını, son ay ödenen tutarı, aylık ödeme yüzdesini, asgari ödeme zorunluluğunu, gecikme gününü, müşteri skorunu ve hesap durumunu kapsamaktadır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

İkili hedef değişken

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{müşteri } i \text{ için gecikme gün sayısı } > 0, \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (1)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Toplam 5.488 müşteride gecikme gözlenmiş, olay oranı yüzde 5,488 olmuştur. Gecikme günlerinin dağılımı 5, 10, 15, 20, 30, 45 ve 60 günlük değerlerden oluşmaktadır. Müşteri kimliği ve müşteri adı, tahmin değeri taşımayan tanımlayıcı alanlar oldukları için çıkarılmıştır. Gecikme gün sayısı hedefin kendisi olduğu için, müşteri skoru ise hedef veya benzer davranış bilgilerini önceden birleştirmiş olabileceğinden bilgi sızıntısını azaltmak amacıyla girdilere alınmamıştır.

Çizelge 1. Seçilmiş sayısal değişkenlerin betimsel istatistikleri

Değişken	Ortalama	Std. sapma	En küçük	Medyan	En büyük
Yaş	43,31	17,22	18	41	90
Kredi kartı limiti (TL)	71.991,56	108.239,96	2.000	30.100	1.788.400
Toplam borç (TL)	21.713,24	39.175,41	0	4.950	1.212.750
Limit kullanım oranı (%)	31,54	32,49	0	24,40	98
Son ay ödenen (TL)	13.510,67	28.681,56	0	2.450	441.640
Aylık ödeme yüzdesi	53,08	28,81	3	41,60	100
Asgari ödeme zorunluluğu	18,05	16,58	0	20	40
Gecikme gün sayısı	1,12	5,79	0	0	60

2.2. ÖN IŞLEME VE DENEY TASARIMI

Gözlemler, hedef sınıf oranı korunarak sabit 42 rassal tohumu ile eğitim (69.999), doğrulama (15.000) ve test (15.001) kümelerine ayrılmıştır. Sayısal değişkenler yalnızca eğitim kümesinin ortalama ve standart sapmaları kullanılarak standartlaştırılmıştır. Kategorik değişkenler referans düzeyi bırakılan kukla değişkenlere dönüştürülmüştür. Karar eşiği test verisine bakılmadan, doğrulama kümesindeki F1-skorunu en yüksek yapan değer olarak seçilmiştir.

Üç model belirtimi karşılaştırılmıştır:

Finansal model: limit, borç, kullanım, ödeme ve asgari ödeme değişkenleri;

Tam model: finansal değişkenlere yaş, cinsiyet, şehir tipi, ekonomik bölge seviyesi, meslek, gelir, eğitim, kart türü ve hesap durumu eklenmiştir;

Doğrusal olmayan model: tam modele limit, borç ve ödeme tutarlarının logaritmaları; yaş, kullanım ve ödeme yüzdesinin kareleri; borç/ödeme oranı ile kullanım–ödeme etkileşimi eklenmiştir.

2.3. ÖZELLIK UZAYI VE DOĞRUSAL OLMAYAN DÖNÜŞÜM

Ham açıklayıcı vektör $x_{\mathrm{i}} \in \backslash mathbbR^{\mathrm{d}}$, standartlaştırma ve kukla değişken dönüşümünden sonra $\varphi(x_{\mathrm{i}}) \in \backslash mathbbRq$ özellik vektörüne dönüştürülmüştür. Sayısal bir x_{ij} değişkeni eğitim ortalaması $\backslash barx_{\mathrm{j}}$ ve standart sapması s_{j} kullanılarak

$$x_{\tilde{ij}} = \frac{x_{ij} - \overline{x_j}}{s_j} \tag{2}$$

biçiminde ölçeklenmiştir. Doğrusal olmayan belirtimde özellik dönüşümü şematik olarak

$$\varphi\,\mathbf{x} = \left(\mathbf{x},\ \log\left(1 + x_j\right),\ {x_k}^2,\ \frac{x_{\text{borç}}}{x_{\text{ödeme}} + 1000},\ x_{\text{kullanım}} x_{\text{ödeme yüzdesi}}\right) \tag{3}$$

şeklindedir. Buradaki ``doğrusal olmayan model'' ifadesi parametreler bakımından doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi anlamına gelmez. Model β parametresinde doğrusal kalmakta, yalnızca x uzayından daha geniş bir $\varphi(x)$ uzayına geçilmektedir. Bu ayrım, aşağıdaki konvekslik sonucunun korunması bakımından önemlidir.

2.4. BERNOULLI MODELI VE CEZALI OLABILIRLIK

$Y_{\mathrm{i}} \in \backslash 0{,}1 \backslash$ Gecikme göstergesi olmak üzere, gözlemlerin koşullu olarak Bernoulli dağılımına sahip olduğu varsayılmıştır:

$$Y_i \mid \mathrm{x}_i \sim \text{Bernoulli}\, p_i\,, \quad p_i = \sigma\,\eta_i\,, \quad \eta_i = \beta_0 + \varphi\,\mathrm{x}_i{}^{\top}\,\beta \tag{4}$$

burada $\sigma(t) = (1 + e^{-\mathrm{t}})^{-1}$ lojistik fonksiyondur. Eğitim kümesinin olabilirlik fonksiyonu

$$L(\beta_0, \beta) = \prod_{i \in T} {p_i}^{y_i} (1 - p_i)^{1 - y_i} \tag{5}$$

ve negatif log-olabilirliği

$$\ell(\beta_0, \beta) = \sum_{i \in T} [\log(1 + e^{\eta_i}) - y_i \eta_i] \tag{6}$$

olarak yazılır. Çok sayıda kukla ve türetilmiş değişkenin katsayılarını dengelemek ve kötü koşullanmanın etkisini azaltmak için kesme terimi cezalandırılmadan L_2 düzenlileştirme uygulanmıştır (nocedal2006):

$$Q_\lambda(\beta_0, \beta) = \ell(\beta_0, \beta) + \frac{\lambda}{2} \|\beta\|_2{}^2, \quad \lambda = 1 \tag{7}$$

Tahmin edici, $\backslash widehat\theta = \backslash argmin\ Q_\lambda(\theta)$ ile tanımlanmıştır; burada $\theta = (\beta_0, \beta \hat{}\, \top) \hat{}\, \top$ genişletilmiş parametre vektörüdür.

2.5. GRADYAN, HESSIAN VE KONVEKSLIK

Eğitim tasarım matrisi $X \in \backslash mathbbR^{\mathrm{m}} \times {}^{(}q^{+1)}$, ilk sütunu birlerden ve kalan sütunları $\varphi(x_{\mathrm{i}}) \hat{}\, \top$ satırlarından oluşacak biçimde tanımlansın. Ayrıca $p = \sigma(X\theta)$, $y = (y_1, \backslash ldots, y_{\mathrm{m}}) \hat{}\, \top$ ve

$$\mathrm{D} = \mathrm{diag}(0, 1, \ldots, 1) \tag{8}$$

olsun. Cezalı amaç fonksiyonunun birinci ve ikinci türevleri

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

$$\nabla Q_\lambda(\theta) = \mathrm{X}^\top(\mathrm{p} - \mathrm{y}) + \lambda \mathrm{D}\theta \tag{9}$$

$$\nabla^2 Q_\lambda(\theta) = \mathrm{X}^\top \mathrm{W}\mathrm{X} + \lambda \mathrm{D}, \quad \mathrm{W} = \mathrm{diag}\{p_i(1 - p_i)\} \tag{10}$$

biçimindedir.

Önerme. $\lambda \geq 0$ için Q_λ konveks bir fonksiyondur. $\lambda > 0$ olduğunda amaç fonksiyonu eğim katsayıları β yönünde güçlü konvekstir. Tasarım matrisinin kesme terimini tanımlayabilmesi altında en küçükleyici tektir.

Kanıt. Her $u \in \backslash mathbbRq^{+1}$ için Denklem (10) kullanılarak

$$\mathrm{u}^\top \nabla^2 Q_\lambda \mathrm{u} = \left\| \mathrm{W}^{\frac{1}{2}} \mathrm{X}\mathrm{u} \right\|_2^2 + \lambda \left\| \mathrm{u}_{2:q+1} \right\|_2^2 \geq 0 \tag{11}$$

elde edilir. Dolayısıyla Hessian pozitif yarı tanımlı ve Qλ konvekstir. λ > 0 için ikinci terim kesme dışındaki bütün parametre yönlerinde pozitiftir. Kesme yönünün de veri tarafından tanımlanmasıyla durağan nokta global ve tek minimumdur.

Bu yapı, yerel minimum sorunu olmaksızın birinci mertebe koşulu $\nabla\ Q_\lambda(\backslash widehat\theta) = 0$ çözülerek global optimumun bulunmasını sağlar (boyd2004,nocedal2006). Sayısal çözümde, ters Hessianı sınırlı sayıda gradyan farkıyla yaklaşıklandıran L-BFGS-B yöntemi kullanılmıştır (zhu1997). Durdurma ölçütü amaç fonksiyonundaki göreli değişim için 10^{-10}, en yüksek iterasyon sayısı 300 olarak alınmıştır.

2.6. PERFORMANS ÖLÇÜTLERI

ROC-AUC, rastgele seçilen bir gecikmeli müşterinin gecikmesiz müşteriden daha yüksek skor alma olasılığını özetler (fawcett2006). PR-AUC, düşük olay oranında pozitif sınıfı daha doğrudan değerlendirir (saito2015). Ayrıca

$$\mathrm{Kesinlik} = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FP}}, \quad \mathrm{Duyarlılık} = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FN}}, \quad F1 = 2\frac{\mathrm{Kesinlik} \times \mathrm{Duyarlılık}}{\mathrm{Kesinlik} + \mathrm{Duyarlılık}} \tag{12}$$

hesaplanmıştır. Olasılık kalibrasyon hatası Brier skoru

$$\mathrm{Brier} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i - y_i)^2 \tag{13}$$

ile ölçülmüştür (brier1950); daha düşük değer daha iyi olasılık tahminine işaret eder.

2.7. MALIYET DUYARLI BAYES KARAR EŞIĞI

Olasılık tahmini ile sınıf kararı birbirinden ayrıdır. $a_\mathrm{i} \in \backslash 0,1 \backslash$ kararında $a_\mathrm{i} = 1$ yüksek risk uyarısını göstersin. Yanlış pozitif kararın maliyeti $C^{\mathrm{fP}} > 0$, yanlış negatif kararın maliyeti $C^{\mathrm{fN}} > 0$ ise x_i verildiğinde iki kararın koşullu riskleri

$$R(a_i = 1 \mid \mathbf{x}_i) = (1 - p_i)C_{\mathrm{FP}} \tag{14}$$

$$R(a_i = 0 \mid \mathbf{x}_i) = p_i C_{\mathrm{FN}} \tag{15}$$

olur. Birinci kararın riski daha küçük olduğunda uyarı verilmelidir. Dolayısıyla Bayes karar kuralı

$$a_i^* = \mathbb{I}\{p_i > \tau^*\}, \quad \tau^* = \frac{C_{\mathrm{FP}}}{C_{\mathrm{FP}} + C_{\mathrm{FN}}} \tag{16}$$

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

biçimindedir. Maliyet duyarlı sınıflandırmada olasılık tahmini ile ekonomik kararın bu biçimde ayrılması temel bir ilkedir (elkan2001). Bu çalışmada maliyetler gözlenmediğinden τ doğrulama kümesinde F1-skorunu en çoklayan değer olarak belirlenmiştir. Denklem (10), gerçek maliyetler elde edildiğinde eşik seçiminin doğrudan ekonomik parametrelere bağlanabileceğini göstermektedir.

2.8. BÜTÇE KISITLI MÜDAHALE MODELI

Tahmin aşaması, her müşteri için p_i riskini üretir. Bankanın müşteri i ile iletişime geçmesinin maliyeti c_i, gecikme gerçekleştiğinde önlenebilir beklenen kayıp veya operasyonel yarar v_i, toplam bütçe B ve seçim kararı $z_i \in \{0,1\}$ olsun. Müdahalenin başarı olasılığı r_i ile gösterildiğinde seçim problemi

$$\max_{\mathbf{z}} \quad \sum_{i=1}^{n} p_i r_i v_i z_i \tag{17}$$

$$\text{öyle ki} \quad \sum_{i=1}^{n} c_i z_i \le B \tag{18}$$

$$z_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n \tag{19}$$

biçiminde bir 0–1 sırt çantası problemidir. $a_i = p_i\, r_i\, v_i$ tanımıyla amaç $\sum_i a_i\, z_i$ olur. Genel durumda karar uzayı $\{0,1\}^n$ ayrık olduğundan problem konveks değildir; doğrusal gevşetme, dal-sınır veya dinamik programlama yaklaşımları kullanılabilir (wolsey1998,martello1990,kellerer2004). Bütçe tahsisinde dinamik programlamanın klasik kullanımı Nemhauser ve Ullmann'a dayanmaktadır (nemhauser1969).

Önerme. $c_i = c > 0$, $r_i = r > 0$ ve $v_i = v > 0$ bütün müşteriler için eşit olsun. $K = min\{n, \lfloor B/c \rfloor\}$ ve riskler $p_{(1)} \ge p_{(2)} \ge \cdot s \ge p_{(n)}$ biçiminde sıralansın. O zaman

$$z_{(i)}^{*} = \begin{cases} 1, & i \le K, \\ 0, & i > K \end{cases} \tag{20}$$

optimal bir çözümdür.

Kanıt. Uygun bir çözümde $j \le K$ için $z_{(j)} = 0$ ve $k > K$ için $z_{(k)} = 1$ olduğunu varsayalım. k yerine j müşterisinin seçilmesi bütçeyi değiştirmez; amaç fonksiyonundaki değişim

$$rv\left(p_{(j)} - p_{(k)}\right) \ge 0 \tag{21}$$

olur. Bu değiş-tokuş işlemi bütün ters sıralamalar giderilene kadar tekrarlanır. Böylece Denklem (20)'deki çözüm elde edilir. Dolayısıyla en yüksek K riskin seçimi optimaldir.

Sonuç. Eşit maliyetli durumda bütçe B arttıkça optimal amaç değeri azalmayan, parçalı sabit bir fonksiyondur. K'den $K+1$ müşteriye geçmenin marjinal beklenen yararı $rvp_{(K+1)}$'dir.

Bütçe üst sınırı yerine müdahale maliyetinin doğrudan amaç fonksiyonuna yazıldığı eşdeğer ekonomik senaryoda, ilk K müşterinin normalize edilmiş net değeri

$$J\,K = rv \sum_{i=1}^{K} p_{(i)} - cK \tag{22}$$

olur. Ardışık iki kapasite düzeyi arasındaki fark

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

$$\Delta JK = JK + 1 - JK = rvp_{(K+1)} - c \quad (23)$$

olduğundan müşteri eklemek ancak $p_{(}{}^{K}{}_{+1)} > c/(rv)$ iken net amaç değerini artırır. Bu koşul, optimal kapasitenin sıralı risk eğrisi ile maliyet–etkinlik eşiğinin kesişiminde bulunduğunu gösterir.

Veri kümesinde gerçek müdahale maliyeti, başarı olasılığı ve önlenen kayıp alanları bulunmadığından ampirik senaryo bu eşit maliyetli özel durum üzerinden değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR

3.1. OPTIMIZASYON KATSAYILARININ KESTIRIMI

0–1 modelinin $a_{\mathrm{i}} = p_{\mathrm{i}}\, r_{\mathrm{i}}\, v_{\mathrm{i}}$ amaç katsayıları için gerekli p_{i} değerleri üç özellik uzayında kestirilmiştir. Test sonuçları Tablo \ref{tab:model-performance}'de sunulmuştur. Doğrusal olmayan özellik dönüşümü ROC-AUC'yi 0,945'e ve PR-AUC'yi 0,631'e çıkarmış, en düşük Brier skorunu üretmiştir. Bu nedenle optimizasyon modelinde kullanılacak risk katsayıları bu belirtimden alınmıştır. Buradaki sınıflandırma ölçütleri nihai amaç değil, kaynak tahsisinde kullanılan katsayıların sıralama kalitesini doğrulayan yardımcı ölçütlerdir.

Çizelge 2. Optimizasyon katsayılarını üreten risk modellerinin test performansı

Model	ROC-AUC	PR-AUC	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1
Finansal	0,824	0,349	0,920	0,349	0,524	0,419
Tam	0,931	0,588	0,955	0,563	0,771	0,651
Doğrusal olmayan	0,945	0,631	0,954	0,555	0,790	0,652

Not: Brier skorları sırasıyla 0,0429, 0,0310 ve 0,0295'tir. Her modelin eşiği doğrulama kümesinde F1'i en çoklayacak biçimde seçilmiştir.

Nihai belirtimin doğrulama kümesinde F1'i en çoklayan karar eşiği 0,158'dir. Bununla birlikte bütçe kısıtlı seçimde sabit bir sınıflandırma eşiği kullanılmamış; Denklem (10) uyarınca müşteriler p_{i} değerlerine göre sıralanmıştır. Böylece seçilen müşteri sayısı doğrudan bütçe B tarafından belirlenmiştir.

3.2. BÜTÇE-KAPSAMA ETKINLIK SINIRI

Nihai modelin risk sıralaması operasyonel açıdan belirgin bir yoğunlaşma üretmiştir. Test kümesindeki en yüksek riskli yüzde 10'luk dilimde gözlenen gecikme oranı yüzde 48,0 iken tüm test kümesinde oran yüzde 5,49'dur. Böylece ilk dilimdeki risk yoğunluğu portföy ortalamasının yaklaşık 8,75 katıdır.

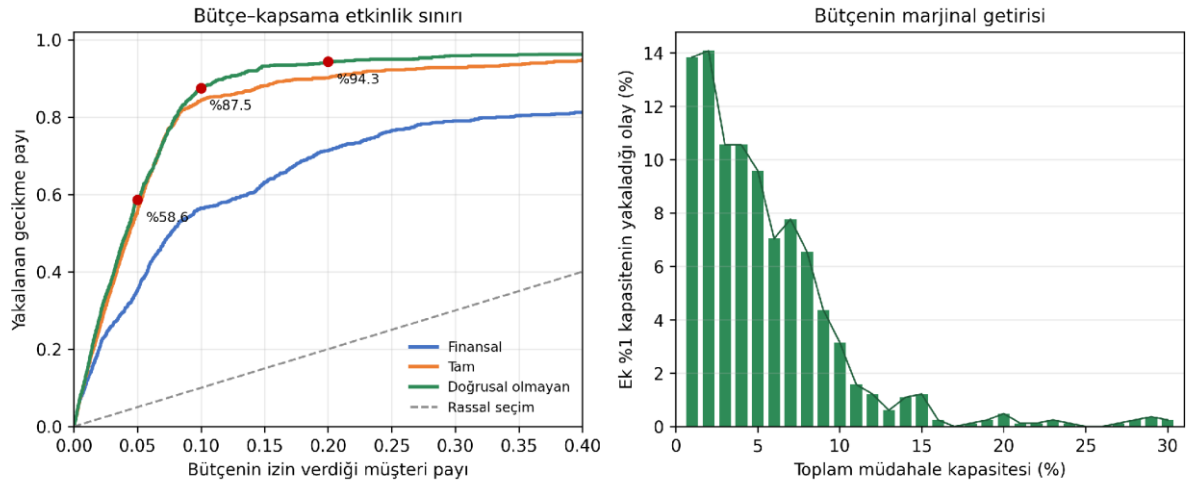
Çizelge 3. Müdahale kapasitesine göre risk yakalama sonucu

Kapasite	Seçilen müşteri	Yakalanan olay	Olay kapsama oranı	Artış katsayısı
%1	150	114	%13,83	13,84
%5	750	483	%58,62	11,72
%10	1.500	721	%87,50	8,75
%20	3.000	777	%94,30	4,72

Not: Artış katsayısı, seçilen gruptaki olay oranının test kümesindeki yüzde 5,49'luk olay oranına bölümüdür. Seçim, tahmin edilen riskin azalan sırasına göre yapılmıştır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Görsel 1'in sol paneli, eşit maliyet altında bütçenin izin verdiği müşteri payı ile yakalanan olay payı arasındaki etkinlik sınırını göstermektedir. Doğrusal olmayan risk katsayıları, bütün gösterilen kapasite düzeylerinde finansal modelden daha yüksek amaç değeri üretmiştir. Sağ panel, bütçenin her ek yüzde birlik artışının sağladığı marjinal olay kapsamasını göstermektedir. İlk yüzde birlik kapasite yaklaşık yüzde 13,8 olay yakalarken, kapasite yüzde 15'in üzerine çıktığında ek getirinin çoğu adımda yüzde 1'in altına düşmesi azalan marjinal yararı açıkça göstermektedir.



Görsel 1. Eşit maliyetli 0–1 seçim probleminde bütçe–kapsama etkinlik sınırı ve bütçenin marjinal getirisi. Kırmızı noktalar yüzde 5, yüzde 10 ve yüzde 20 kapasite çözümlerini göstermektedir.

Eşit maliyetli senaryoda kapasite müşterilerin yüzde 10'u ile sınırlandığında 1.500 müşteri seçilmiş ve 824 gecikmenin 721'i bu grupta yer almıştır. Aynı sayıda müşterinin rassal seçilmesi halinde beklenen kapsama yaklaşık yüzde 10 iken model tabanlı seçim yüzde 87,5 kapsamaya ulaşmıştır. Kapasitenin yüzde 10'dan yüzde 20'ye çıkarılması yalnızca 56 ek olayı yakalamıştır. Bu azalan marjinal getiri, operasyonel bütçe belirlenirken maliyet–yarar eşiğinin açıkça tanımlanması gerektiğini göstermektedir.

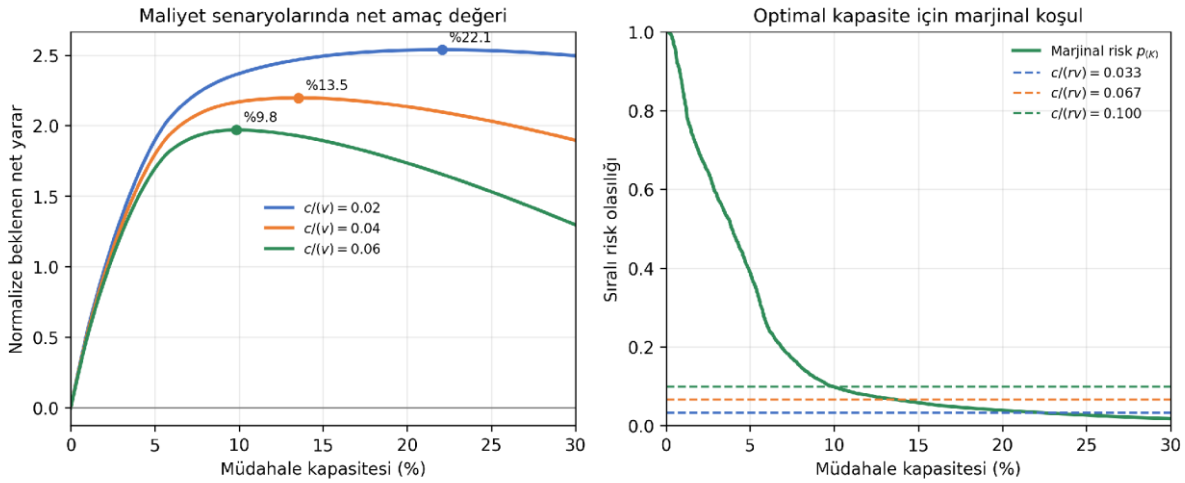
3.3. MALIYET--YARAR ORANINA GÖRE OPTIMAL KAPASITE

Denklem (22) ve Denklem (23), bütçe üst sınırı önceden verilmediğinde optimal kapasitenin ekonomik parametrelerden türetilebilmesini sağlar. Sayısal senaryolarda müdahale başarı olasılığı $r = 0{,}60$ ve normalize kayıp değeri $v = 1$ alınmıştır. Müşteri başına normalize maliyet c/v sırasıyla 0,02, 0,04 ve 0,06 olarak değiştirilmiştir.

Çizelge 4. Maliyet–yarar senaryolarında optimal müdahale kapasitesi

c/v	**Kırılma eşiği** $c/(rv)$	**Optimal kapasite**	**Yaklaşık müşteri sayısı**
0,02	0,033	%22,1	3.315
0,04	0,067	%13,5	2.025
0,06	0,100	%9,8	1.470

Şekil \ref{fig:cost-scenarios}'nin sol panelinde $J(K)$ fonksiyonunun her maliyet senaryosunda önce arttığı, marjinal risk maliyet eşiğinin altına düştükten sonra azaldığı görülmektedir. Sağ paneldeki kesişimler Denklem (10)'ın geometrik karşılığıdır. Maliyet oranı yükseldikçe kırılma eşiği artmakta ve optimal müşteri sayısı azalmaktadır.



Görsel 2. Normalize maliyet senaryolarında net amaç fonksiyonu ve optimal kapasite için $p_{(K)

4. TARTIŞMA

Sonuçlar, optimizasyon açısından iki temel yapıyı ortaya koymaktadır. Birincisi, amaç katsayıları müşteri portföyünde yüksek ölçüde yoğunlaşmıştır; bu nedenle küçük bir bütçe ile toplam riskin büyük bir bölümü kapsanabilmektedir. İkincisi, sıralı risk $p_{(K)}$ hızla azaldığı için amaç fonksiyonunun marjinal getirisi de kapasiteyle birlikte düşmektedir. Dolayısıyla bütçeyi büyütmek her zaman aynı oranda ek yarar sağlamamakta, optimal çözüm maliyet–yarar oranına duyarlı olmaktadır.

Eşit maliyet varsayımı altında sıralama kuralı kapalı biçimde çözülebilmektedir. Heterojen maliyetler söz konusu olduğunda ise yalnızca en yüksek riski seçmek optimal olmayabilir; karar $p_i\, r_i\, v_i/c_i$ bileşenleri arasındaki dengeye bağlıdır ve genel 0–1 problem çözülmelidir. Gerçek uygulamada Denklem (10); kanal bazlı kapasite, aynı müşteriye temas sınırı, bölgesel ekip kapasitesi ve yasal uygunluk kısıtlarıyla genişletilebilir. Çok dönemli durumda bütçe ve müşteri durumları zamana bağlanarak dinamik programlama veya stokastik programlama modeli kurulabilir (birge2011).

Şekil \ref{fig:cost-scenarios}'deki senaryolar gerçek para tutarlarını temsil etmemekte, maliyet oranının optimal kapasite üzerindeki matematiksel etkisini göstermektedir. Gerçek c_i, r_i ve v_i değerleri elde edildiğinde senaryo parametrelerinin bu gözlemlerle değiştirilmesi gerekir. Böylece risk tahmin modeli nihai kararın kendisi olmaktan çıkar ve ekonomik amaç fonksiyonunun katsayı üreticisi hâline gelir.

Modelin cinsiyet, meslek veya bölge gibi değişkenleri kullanması ayrımcılık ve adalet açısından ayrıca incelenmelidir. Üretim ortamına geçişten önce korunan gruplar için yanlış negatif ve yanlış pozitif oranları raporlanmalı; gerekirse bu değişkenler çıkarılmalı veya optimizasyon modeline grup bazlı fırsat eşitliği kısıtları eklenmelidir. Tahmin doğruluğundaki küçük bir artış, hukuki ve etik riskleri tek başına gerekçelendirmez.

5. SINIRLILIKLAR

Çalışmanın bulguları değerlendirilirken, kullanılan veri kümesinin yapısından ve model tasarımından kaynaklanan bazı yöntemsel kısıtların dikkate alınması önem arz etmektedir.

İlk olarak, veri kümesinin kapsadığı döneme ve örnekleme ayrıntılarına ilişkin dokümantasyon sınırlıdır. Veri seti genel sektörel dinamikleri yansıtsa da elde edilen sonuçların doğrudan tüm sektöre genellenmesi yerine, mevcut veri çerçevesinde değerlendirilmesi daha nitelikli bir yaklaşım olacaktır.

İkinci olarak, verinin kesitsel yapıda olması nedeniyle değişkenler arası zamansal sıralama tam olarak izlenememektedir. Bu doğrultuda modelin gerçek operasyonel süreçlere uyarlanması aşamasında, yalnızca işlem anında erişilebilen değişkenlerle ve ileriye dönük (prospektif) bir test tasarımıyla yeniden yapılandırılması önerilmektedir.

Son olarak, elde edilen bulguların farklı zaman dilimleri ve kurumsal yapılar üzerindeki genellenebilirliğini pekiştirmek adına, gelecek araştırmalarda bağımsız veri setleriyle dış doğrulama (external validation) yapılması faydalı görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERILER

Bu çalışmada ödeme gecikmesi problemi, risk katsayılarının konveks bir modelle kestirildiği ve sınırlı bütçenin 0–1 optimizasyonla dağıtıldığı bütünleşik bir kaynak tahsisi problemi olarak çözülmüştür. Eşit maliyetli durumda optimal çözümün en yüksek K riski seçmek olduğu kanıtlanmış; yüzde 10 kapasitenin gecikmelerin yüzde 87,5'ini kapsadığı gösterilmiştir. Marjinal analiz, kapasite artışının getirisinin hızla azaldığını ortaya koymuştur. Normalize maliyet oranı 0,02'den 0,06'ya yükseldiğinde optimal kapasitenin yüzde 22,1'den yüzde 9,8'e düşmesi, kararın ekonomik parametrelere duyarlılığını göstermektedir.

İzleyen çalışmalarda (i) müşteri bazlı müdahale maliyeti ve önlenebilir kayıp değerlerinin ölçülmesi, (ii) heterojen maliyetli 0–1 modelin dal-sınır yöntemiyle çözülmesi, (iii) çoklu kanal ve ekip kapasitesi kısıtlarının eklenmesi, (iv) belirsiz risk katsayıları için sağlam optimizasyon (bental2009) veya stokastik programlama (birge2011) kurulması, (v) çok dönemli bütçe tahsisinin dinamik programlamayla incelenmesi ve (vi) adalet kısıtlarının model içine alınması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Ben-Tal, A., El Ghaoui, L. ve Nemirovski, A. (2009). *Robust Optimization*. Princeton University Press.

Birge, J. R. ve Louveaux, F. (2011). *Introduction to Stochastic Programming* (2. baskı). Springer.

Boyd, S. ve Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge University Press.

Brier, G. W. (1950). Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Monthly Weather Review*, 78(1), 1–3.

Elkan, C. (2001). The foundations of cost-sensitive learning. *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 973–978.

Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874.

Hand, D. J. ve Henley, W. E. (1997). Statistical classification methods in consumer credit scoring: a review. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A*, 160(3), 523–541.

Hosmer, D. W., Lemeshow, S. ve Sturdivant, R. X. (2013). *Applied Logistic Regression* (3. baskı). Wiley.

Kellerer, H., Pferschy, U. ve Pisinger, D. (2004). *Knapsack Problems*. Springer.

Lessmann, S., Baesens, B., Seow, H.-V. ve Thomas, L. C. (2015). Benchmarking state-of-the-art classification algorithms for credit scoring: an update of research. *European Journal of Operational Research*, 247(1), 124–136.

Martello, S. ve Toth, P. (1990). *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations*. Wiley.

Nemhauser, G. L. ve Ullmann, Z. (1969). Discrete dynamic programming and capital allocation. *Management Science*, 15(9), 494–505.

Nocedal, J. ve Wright, S. J. (2006). *Numerical Optimization* (2. baskı). Springer.

Saito, T. ve Rehmsmeier, M. (2015). The precision–recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets. *PLOS ONE*, 10(3), e0118432.

Thomas, L. C., Edelman, D. B. ve Crook, J. N. (2002). *Credit Scoring and Its Applications*. SIAM.

Wolsey, L. A. (1998). *Integer Programming*. Wiley.

Zhu, C., Byrd, R. H., Lu, P. ve Nocedal, J. (1997). Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 23(4), 550–560.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

KARBON SALIMLARININ MATEMATİKSEL OPTİMİZASYONU: TÜRKİYE'NİN 2053 NET SIFIR HEDEFİ İÇİN BİR MODELLEME YAKLAŞIMI

Öğr. Gör. Betül ÖZTEL

İstanbul Esenyurt Üniversitesi

betuloztel@esenyurt.edu.tr - ORCID: 0000-0002-5973-9323

Ahmet KIZKAPAN

İstanbul Esenyurt Üniversitesi

ahmetkizkapan@esenyurt.edu.tr - ORCID: 0009-0006-5381-3461

ÖZET

Türkiye, 2053 yılında net sıfır sera gazı salımına ulaşmayı hedeflemektedir. Bu çalışmada Türkiye'nin 2010–2023 elektrik ve enerji verileri kullanılarak doğrusal programlama tabanlı bir elektrik üretim optimizasyonu geliştirilmiştir. Model, hedef elektrik talebini ve yenilenebilir enerji payı kısıtını karşılarken elektrik üretiminden kaynaklanan doğrudan sera gazı salımını en aza indirmektedir. Kömür, doğal gaz ve petrol emisyon katsayıları, kaynaklar arasındaki tipik oranlar korunarak 2023 yılında gözlenen 148,57 Mt CO_2-eşd. elektrik üretimi emisyonuna kalibre edilmiştir. Elektrik talebi 2030 için Türkiye Ulusal Enerji Planı'ndaki 455,3 TWh, 2053 için SHURA Net Sıfır Yol Haritası'ndaki 982 TWh değeriyle temsil edilmiştir. Model çözümünde 2030 yılı için 128,74 Mt CO_2-eşd., 2040 için 23,52 Mt CO_2-eşd. ve 2053 için sıfır doğrudan işletme emisyonu elde edilmiştir. Yenilenebilir üretim payları sırasıyla yüzde 57,11, yüzde 91,98 ve yüzde 100'dür. Sonuçlar, 2053 net sıfır elektrik sisteminin matematiksel olarak mümkün olduğunu; ancak bunun rüzgâr, güneş, hidroelektrik ve diğer yenilenebilir üretim üst sınırlarının gerçekleşmesine bağlı olduğunu göstermektedir. Model yatırım maliyetlerini, depolamayı ve yaşam döngüsü emisyonlarını içermediğinden sonuçlar koşullu bir teknik senaryo olarak yorumlanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Karbon Salımı, Doğrusal Programlama, Optimizasyon, Net Sıfır, Enerji Politikası, Türkiye

ABSTRACT

Mathematical Optimization of Carbon Emissions: A Modelling Approach for Türkiye's 2053 Net-Zero Target

This study develops a linear-programming model using Türkiye's electricity and energy data for 2010–2023. The model minimizes direct power-generation emissions while satisfying projected electricity demand, renewable-share requirements and technology-specific generation limits. Fossil-fuel emission coefficients were calibrated to the observed 2023 power-sector emissions of 148.57 Mt CO_2-equivalent. Electricity demand was set at 455.3 TWh in 2030 and

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

982 TWh in 2053, based respectively on the Türkiye National Energy Plan and the SHURA Net Zero 2053 Roadmap. The optimal solutions produce direct emissions of 128.74 Mt CO_2-equivalent in 2030, 23.52 Mt in 2040 and zero in 2053. Renewable-generation shares reach 57.11%, 91.98% and 100%, respectively. The results indicate that a zero-direct-emission power system is mathematically feasible by 2053, conditional on the assumed expansion limits for wind, solar, hydropower and other renewable technologies. Since investment costs, storage operation and life-cycle emissions are excluded, the findings should be interpreted as a conditional technical scenario rather than a complete investment plan.

Keywords: Karbon Emissions, Linear Programming, Optimization, Net Zero, Energy Policy, Turkey

1. GIRIŞ

İklim değişikliği; enerji üretimi, sanayi, ulaştırma, kentleşme ve doğal kaynak yönetimini aynı anda etkileyen çok boyutlu bir politika problemidir. Sera gazı salımlarının azaltılması yalnızca daha düşük karbonlu teknolojilerin seçilmesini değil, bu teknolojilerin hangi tarihte, hangi kapasitede ve hangi maliyetle devreye alınacağının da belirlenmesini gerektirir. IPCC, net sıfırla uyumlu enerji sistemlerinde düşük karbonlu elektrik üretimi, son kullanım sektörlerinin elektrifikasyonu, enerji verimliliği ve sistem esnekliğinin birlikte ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır (ipcc2022). Bu nedenle net sıfır hedefleri, farklı sektörler arasındaki teknik ve ekonomik ilişkileri açık biçimde temsil eden nicel karar araçlarına ihtiyaç doğurmaktadır.

Türkiye'nin uzun dönemli net sıfır hedefi bakımından temel güçlük, ekonomik faaliyet ve enerji hizmetleri sürdürülürken emisyon yoğunluğunun hızla düşürülmesidir. Enerji sektöründe elektrik üretim karması ve yenilenebilir kapasite; sanayide enerji verimliliği, yakıt dönüşümü ve proses emisyonları; ulaştırmada ise taşıt teknolojisi, yakıt türü ve ulaşım talebi belirleyicidir. Sektörlerin birbirinden bağımsız ele alınması, örneğin ulaştırmanın elektrifikasyonuyla artacak elektrik talebinin üretim tarafındaki etkisinin gözden kaçmasına yol açabilir.

Bu çalışma, söz konusu ilişkileri doğrusal programlama çerçevesinde bir araya getirmektedir. Önerilen yaklaşımın ayırt edici özelliği, yalnızca sektörel üretim miktarlarını değil, bu üretim veya hizmetin hangi teknolojiyle sağlandığını da karar değişkeni olarak tanımlamasıdır. Böylece model ekonomik faaliyeti keyfî biçimde azaltmak yerine, talebi karşılayan teknoloji bileşimini seçmektedir. Çalışmanın ana araştırma sorusu şöyledir:

Türkiye'nin enerji, sanayi ve ulaştırma sektörlerinde hizmet talebi, ekonomik büyüme, enerji arz güvenliği, teknoloji kapasitesi ve dönüşüm bütçesi kısıtları altında 2030, 2040 ve 2053 hedefleriyle uyumlu en düşük emisyonlu teknoloji ve faaliyet bileşimi nedir?

Ana hipotez, sektör ve teknoloji düzeyinde kurulmuş bir optimizasyon modelinin mevcut politikaların devamı senaryosuna göre daha düşük toplam emisyon üreten, maliyet ve kapasite bakımından uygulanabilir ve sektörlere göre farklılaşan azaltım yolları belirleyebileceğidir. Alt hipotezler; yenilenebilir elektrik kapasitesindeki artışın ulaştırma elektrifikasyonunun azaltım etkisini güçlendireceği, sanayide enerji verimliliğinin erken dönemde maliyet-etkin azaltım

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

sağlayacağı ve net sıfır kısıtının özellikle 2040 sonrasında negatif emisyon veya denkleştirme seçeneklerine ihtiyaç oluşturabileceği yönündedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LITERATÜR

Enerji ve çevre politikalarının nicel analizinde başlıca üç yaklaşım kullanılmaktadır: ekonometrik tahmin modelleri, bütünleşik değerlendirme/enerji sistemi modelleri ve matematiksel optimizasyon modelleri. Ekonometrik modeller geçmiş ilişkilerin ölçülmesinde güçlü olmakla birlikte, geçmişte gözlenmemiş teknoloji bileşimlerini değerlendirmede sınırlı kalabilir. MARKAL/TIMES türü enerji sistemi modelleri teknoloji ayrıntısını kapsamlı biçimde temsil eder; ancak uzun hazırlık süresi ve ayrıntılı veri gereksinimi nedeniyle küçük ölçekli araştırmalarda uygulanmaları güç olabilir. Doğrusal programlama ise amaç fonksiyonu ve kısıtları açıkça gösteren, senaryoların yeniden üretilmesine olanak veren daha yalın bir seçenektir (winston,fishbone).

Türkiye'nin sera gazı eğilimleri ulusal envanterler ve resmî istatistiklerle düzenli olarak izlenmektedir (envanter,tuik). IEA'nın Türkiye enerji politikası incelemesi, yenilenebilir elektrikteki büyümeye rağmen fosil yakıt bağımlılığı, enerji arz güvenliği ve uzun dönemli karbonsuzlaşmanın birlikte yönetilmesi gerektiğini belirtmektedir (iea2021). Ember'in Türkiye elektrik sistemi değerlendirmesi de 2023 üretim ve talep verileri üzerinden güneş ve rüzgârın artan rolünü ortaya koymaktadır (ember). Bununla birlikte bir emisyon envanteri, tek başına hangi teknoloji yatırımının ne zaman yapılması gerektiğini göstermez. Politika açısından gerekli olan, emisyon katsayılarını hizmet talebi, kapasite, maliyet ve dönüşüm hızı kısıtlarıyla birlikte değerlendirmektir.

Çalışmanın katkısı üç noktada toplanmaktadır. Birincisi, Türkiye'ye özgü ve resmî verilerle güncellenebilir bir model önerilmektedir. İkincisi, enerji–ulaştırma bağlantısı gibi sektörler arası ilişkiler açık kısıtlarla gösterilmektedir. Üçüncüsü, temel sonuçların tek bir tahmine dayandırılması yerine farklı politika senaryoları ve duyarlılık analizleri birlikte sunulmaktadır.

Türkiye için daha önce geliştirilen optimizasyon çalışmaları, üretim maliyeti, emisyon, ithalat bağımlılığı ve sosyal kabul gibi birden fazla amacı aynı model içinde ele almıştır (ozcan). Deveci ve Güler (deveci), yenilenebilir enerji planlamasında maliyet ve üretim hedeflerini çok amaçlı optimizasyonla değerlendirmiştir. Yörük ve arkadaşları (yoruk), zaman serisi tahminlerini karma tamsayılı programlamayla birleştirerek Türkiye için stratejik elektrik üretim planı geliştirmiştir. Önenli ve arkadaşları (onenli) ise gelecekteki elektrik talebini karşılayan emisyon azaltım yollarını doğrusal programlama senaryolarıyla incelemiştir. Kat ve arkadaşlarının (kat) enerji–ekonomi–çevre modeli, Türkiye elektrik sektörünün net sıfır dönüşümünü daha geniş makroekonomik bağlantılarla değerlendirmektedir. Mevcut çalışma, bu literatüre daha yalın, açık kodlu ve 2023 gerçekleşmeleriyle doğrudan kalibre edilen bir model sunarak katkıda bulunmaktadır.

3. AMAÇ VE HEDEFLER

Çalışmanın genel amacı, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi doğrultusunda enerji, sanayi ve ulaştırma sektörlerinden kaynaklanan sera gazı salımlarını ekonomik ve teknik kısıtlar altında

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

en aza indiren bir doğrusal programlama modeli geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki ölçülebilir hedefler belirlenmiştir:

2010–2023 dönemi için elektrik ve enerji göstergelerini ortak birim ve sınıflandırmada birleştirmek;
her sektör–teknoloji çifti için emisyon, enerji kullanımı ve birim maliyet katsayılarını hesaplamak;
2030, 2040 ve 2053 yıllarını temsil eden doğrusal optimizasyon modelini kurmak ve doğrulamak;
mevcut politikaların devamı, hızlandırılmış dönüşüm ve net sıfır senaryolarını karşılaştırmak;
temel parametreler için duyarlılık ve belirsizlik analizi yapmak;
sonuçlardan sektörel öncelikler ve uygulanabilir politika önerileri üretmek.

4. VERI VE YÖNTEM

4.1. ARAŞTIRMA TASARIMI VE KAPSAM

Araştırma, ikincil nicel verilere dayalı bir modelleme çalışmasıdır. Coğrafi kapsam Türkiye, tarihsel kalibrasyon dönemi 2010–2023, projeksiyon yılları ise 2030, 2040 ve 2053'tür. Bu ilk uygulama elektrik üretim sektörüyle sınırlandırılmıştır. Sanayi ve ulaştırmanın elektrik talebine etkisi projeksiyon değerleri içinde dolaylı olarak temsil edilmekte; sektörlerin ayrıntılı optimizasyonu sonraki model genişletmesine bırakılmaktadır.

Bağımlı çıktı, modelin amaç fonksiyonunda hesaplanan toplam sera gazı salımıdır (Mt CO_2-eşd.). Temel açıklayıcı girdiler; sektörel hizmet talebi, teknoloji bazında faaliyet düzeyi, emisyon faktörü, enerji tüketimi, kapasite, yatırım/işletme maliyeti, yenilenebilir enerji payı ve ekonomik büyüme varsayımlarıdır. Optimizasyon modeli nedensel etki tahmini yapmaz; verilen varsayımlar altında uygulanabilir en iyi bileşimi hesaplar.

4.2. GEREKLI VERI SETI

Bu çalışmanın ampirik olarak tamamlanabilmesi için veri gereklidir. Yalnızca toplam ulusal emisyon serisi yeterli değildir. Asgari veri yapısı Tablo \ref{tab:veri} içinde gösterilmiştir.

Uygulamada Our World in Data enerji veri tabanının 18 Ekim 2024 tarihli sürümü kullanılmıştır (owid). Türkiye için 2010–2023 dönemi ayrıştırılmış; 14 yıllık ve 29 değişkenli temiz bir analiz dosyası oluşturulmuştur. Modelin 2023 başlangıç değerleri 319,79 TWh toplam elektrik üretimi, 148,57 Mt CO_2-eşd. elektrik üretimi emisyonu ve yüzde 42,01 yenilenebilir elektrik payıdır. Veri tabanındaki sera gazı değişkeni bütün ekonomi yerine yalnızca elektrik üretimi emisyonunu gösterdiğinden model sonuçları da elektrik sektörüyle sınırlıdır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çizelge 1. Model için gerekli asgari veri grupları

p{2.25cm}Y p{2.45cm}Y@{}} Veri grubu	**Değişkenler**	**Önerilen birim**	**Olası kaynak**
Sektörel emisyon	Enerji, sanayi ve ulaştırma emisyonları; gaz türü	Mt CO_2-eşd./yıl	TÜİK, Ulusal Sera Gazı Envanteri, EEA
Faaliyet/hizmet	Elektrik üretimi, sanayi üretimi veya fiziksel ürün, yolcu-km, ton-km	GWh, ton, endeks, yolcu-km, ton-km	TÜİK, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, ilgili sektör kurumları
Enerji dengesi	Yakıt türüne göre üretim, ithalat, dönüşüm ve nihai tüketim	TJ, TWh, tep	Enerji denge tabloları, IEA
Teknoloji kapasitesi	Kurulu güç, kapasite faktörü, yıllık ilave kapasite sınırı	MW, yüzde, MW/yıl	TEİAŞ, EPDK, Bakanlık raporları
Maliyet	Yatırım, sabit/değişken işletme, yakıt ve dönüşüm maliyeti	sabit fiyatla TL veya USD/birim	Resmî raporlar, IEA ve literatür
Emisyon faktörü	Yakıt/teknoloji başına doğrudan ve mümkünse yaşam döngüsü emisyonu	t CO_2-eşd./TJ veya t CO_2-eşd./birim	IPCC, ulusal envanter
Makroekonomik veri	Reel GSYH, sektörel katma değer, nüfus, fiyat deflatörü	sabit fiyatla TL, kişi	TÜİK, Strateji ve Bütçe Başkanlığı
Politika parametreleri	Emisyon hedefi, yenilenebilir payı, verimlilik ve dönüşüm sınırları	yüzde, Mt CO_2-eşd.	Resmî strateji ve planlar

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Her gözlemde en az yıl, sektör, teknoloji/yakıt, değer, birim, kaynak ve erişim tarihi alanları tutulacaktır. Maliyet serileri ortak bir baz yılın sabit fiyatlarına çevrilecek; enerji birimleri terajul (TJ), elektrik miktarları teravatsaat (TWh) ve emisyonlar milyon ton CO_2-eşd. cinsinden eşleştirilecektir. Aynı değişken birden fazla kaynakta bulunduğunda ulusal resmî seri ana kaynak, uluslararası seri ise tutarlılık kontrolü olarak kullanılacaktır.

4.3. VERI TEMIZLEME VE KATSAYILARIN HESAPLANMASI

Veriler Python ortamında tablo anahtarları kullanılarak birleştirilecektir. Önce birim, fiyat yılı ve sektör sınıflandırmaları uyumlaştırılacak; ardından yinelenen kayıtlar, ani sıçramalar ve kaynaklar arası farklar denetlenecektir. Eksik değerler otomatik olarak ortalamayla doldurulmayacaktır. Kısa ve iç kesimdeki boşluklarda doğrusal interpolasyon yalnızca serinin yapısı uygunsa kullanılacak; başlangıç veya bitiş boşlukları ilgili kurumun yakın dönem raporu ya da açıkça belgelenmiş senaryo varsayımıyla tamamlanacaktır. Hem özgün hem de işlenmiş değerler ayrı sütunlarda saklanacaktır.

Teknoloji j ile sektörel hizmet i için tarihsel ortalama emisyon katsayısı

$$c_{ij} = \frac{E_{ij}}{X_{ij}} \tag{1}$$

biçiminde hesaplanacaktır. Burada E_{ij} teknolojiye atfedilen emisyonu, X_{ij} ise aynı teknolojiyle sağlanan faaliyet ya da hizmeti göstermektedir. Yakıt temelli verilerde emisyonlar, faaliyet verisi ile uygun emisyon faktörünün çarpımından üretilecektir. Katsayılar tek bir yıl yerine veri kalitesi elverdiğinde son üç yılın ağırlıklı ortalamasıyla kalibre edilecektir.

4.4. MATEMATIKSEL MODEL

Kümeler $i \in I$ sektörleri, $j \in J_{\mathrm{i}}$ sektör i içindeki teknolojileri ve $t \in T$ hedef yılları göstermektedir. Temel karar değişkeni x_{ijt}, t yılında i sektöründe j teknolojisiyle sağlanan faaliyet veya hizmet miktarıdır. k_{ijt} yeni kapasiteyi, a_{it} ise ek emisyon azaltım/denkleştirme miktarını göstermektedir.

Temel amaç toplam indirgenmiş sistem maliyetini ve hedef aşım cezasını en aza indirmektir:

$$\min Z = \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 + r)^{t - t_0}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(v_{ijt} x_{ijt} + f_{ijt} k_{ijt} \right) + q_{it} a_{it} + M s_t \right] \tag{2}$$

Burada v_{ijt} değişken maliyet, f_{ijt} kapasite maliyeti, q_{it} azaltım veya denkleştirme maliyeti, r iskonto oranı, s_{t} emisyon hedefinden sapma ve M büyük bir ceza katsayısıdır. Politika sorusuna göre alternatif amaç fonksiyonu olarak doğrudan toplam emisyon da minimize edilecektir:

$$min\ Z^E = \sum_{t \in T} \left(\sum_i \sum_j c_{ijt} x_{ijt} - \sum_i a_{it} \right) \quad (3)$$

Her sektörde talep edilen hizmetin karşılanması gerekir:

$$\sum_{j \in J_i} x_{ijt} \geq D_{it} \quad \forall\, i, t \quad (4)$$

Faaliyet, mevcut ve yeni kapasiteyle sınırlıdır:

$$x_{ijt} \leq \varphi_{ijt} \left(K_{ij,t-1} + k_{ijt} \right) \quad \forall\, i, j, t \quad (5)$$

burada φ_{ijt} kapasitenin yıllık kullanılabilir faaliyet miktarına dönüşüm katsayısıdır. Teknoloji dönüşümünün gerçekçi hızda kalması için

$$0 \leq k_{ijt} \leq \Delta K_{ijt} \quad (6)$$

kısıtı uygulanacaktır.

Elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payı en az ρ_t olacaktır:

$$\sum_{j \in R} x_{enerji,j,t} \geq \rho_t \sum_{j \in J_{enerji}} x_{enerji,j,t} \quad (7)$$

Ulaştırma ve sanayide elektrifikasyondan doğan elektrik talebi, enerji sektörü talebine aktarılacaktır. Arz güvenliği için puant talep, yedek kapasite ve gerektiğinde ithalat üst sınırı ayrıca tanımlanacaktır.

Toplam emisyon aşağıdaki hedefi aşamaz:

$$\sum_i \sum_j c_{ijt} x_{ijt} - \sum_i a_{it} \leq \bar{E}_t + s_t \quad \forall\, t \quad (8)$$

Katı net sıfır senaryosunda $\bar{E}_{2053} = 0$ ve $s_{2053} = 0$ alınacaktır. Negatif emisyon veya güvenilir denkleştirme seçeneği modele eklenmezse teknik olarak sıfır emisyonun mümkün olup olmadığı ayrıca fizibilite testiyle gösterilecektir. Son olarak toplam dönüşüm maliyeti dönemsel bütçeyi aşmayacaktır:

$$\sum_i \sum_j \left(f_{ijt} k_{ijt} + v_{ijt} x_{ijt} \right) + \sum_i q_{it} a_{it} \leq B_t \quad (9)$$

4.5. UYGULANAN ELEKTRIK SEKTÖRÜ MODELI

Eldeki veriyle çözülen ilk modelde karar değişkenix_{jt}, hedef yıl t içinde teknoloji j ile üretilecek elektrik miktarıdır. Teknolojiler kömür, doğal gaz, petrol, hidroelektrik, rüzgâr, güneş ve biyokütle/diğer yenilenebilir kaynaklar olarak tanımlanmıştır. Amaç fonksiyonu

$$min\ Z_t\ =\ \sum_j c_j x_{jt} \tag{10}$$

biçimindedir. Her hedef yılda toplam üretim talebe eşit olmakta,

$$\sum_j x_{jt}\ =\ D_t \tag{11}$$

yenilenebilir üretim belirlenen asgari payın altına düşmemekte ve her teknoloji için $0 \leq x_{jt} \leq U_{jt}$ üst sınırı uygulanmaktadır.

Kömür, doğal gaz ve petrol için başlangıç emisyon oranları sırasıyla 0,98; 0,45 ve 0,78 Mt CO_2-eşd./TWh alınmış, bu oranlar birlikte 2023 yılında gözlenen 148,57 Mt CO_2-eşd. toplamına eşit olacak biçimde ölçeklenmiştir. Kalibre edilmiş katsayılar kömür için 0,9951; doğal gaz için 0,4569 ve petrol için 0,7920 Mt CO_2-eşd./TWh'dir. Hidroelektrik, rüzgâr, güneş ve biyokütle/diğer yenilenebilir üretimin işletme sırasındaki doğrudan emisyonu sıfır kabul edilmiştir. Bu kabul, yaşam döngüsü emisyonlarının sıfır olduğu anlamına gelmemektedir.

2030 elektrik talebi Türkiye Ulusal Enerji Planı'ndaki 455,3 TWh değerinden alınmıştır (ulusalplan). SHURA yol haritasındaki 982 TWh değeri 2053 net sıfır talebini temsil etmektedir (shura). 2040 talebi, 2035 resmî talebi ile 2053 değeri arasında doğrusal ara değer olarak 641,47 TWh hesaplanmıştır. Teknoloji üst sınırları 2023 gerçekleşmeleri, 2035 ulusal hedefleri ve SHURA dönüşüm yolu dikkate alınarak senaryo parametresi olarak tanımlanmıştır. Model Python, SciPy ve HiGHS doğrusal programlama çözücüsüyle çalıştırılmış; üç hedef yıl için de optimum çözüm bulunmuştur.

Gerçek 2023 verileri üretim karması ve emisyon	**Doğrusal programlama** min $\Sigma_j c_j x_{jt}$ $\Sigma_j x_{jt} = D_t$ $0 \leq x_{jt} \leq U_{jt}$	Optimum üretim karması kömür, gaz, hidro, rüzgâr, güneş
Hedef ve kısıtlar talep, yenilenebilir payı, teknoloji üst sınırları		Sonuç göstergeleri emisyon, karbon yoğunluğu, yenilenebilir payı

Görsel 1. Elektrik üretimi optimizasyon modelinin işleyişi.

4.6. SENARYOLAR

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çizelge 2. Analiz edilecek temel senaryolar

p{3.05cm}Y Y@{}} Senaryo	**Temel varsayım**	**Kullanım amacı**
Mevcut politikaların devamı	Teknoloji dönüşüm hızları tarihsel eğilim ve ilan edilmiş yakın dönem politikalarıyla sınırlıdır.	Karşılaştırma çizgisini oluşturmak.
Hızlandırılmış dönüşüm	Yenilenebilir kapasite, enerji verimliliği ve elektrifikasyon üst sınırları artırılır.	İlave politika çabasının etkisini ölçmek.
Net sıfır	2053 net emisyon üst sınırı sıfırdır; teknik olarak gerekliyse sınırlı negatif emisyon/denkleştirme tanımlanır.	Hedefe ulaşan en düşük maliyetli bileşimi bulmak.
Kısıtlı bütçe	Dönüşüm bütçesi temel senaryoya göre düşürülür.	Finansman yetersizliğinin hedef açığını ölçmek.

4.7. DOĞRULAMA, DUYARLILIK VE BELIRSIZLIK ANALIZI

Model üç aşamada doğrulanacaktır. Boyutsal kontrolde her denklemin birimleri incelenecek; geriye dönük doğrulamada model bir tarihsel yıl için çalıştırılarak gerçekleşen teknoloji karmasına yakınlığı sınanacak; uzman kontrolünde parametre ve kısıtların sektörel gerçekçiliği değerlendirilecektir. Talebin sıfıra indirilmesi gibi mekanik olarak düşük emisyon veren fakat politika bakımından anlamsız çözümler, Denklem (4) ve kapasite kısıtlarıyla engellenecektir.

Duyarlılık analizinde ekonomik büyüme ve hizmet talebi, teknoloji maliyetleri, iskonto oranı, yakıt fiyatları, kapasite artış sınırları, yenilenebilir payı ve emisyon faktörleri ayrı ayrı değiştirilecektir. Öncelikle her parametre için temel değerin yüzde ± 10 ve ± 20 çevresi test edilecek; veri aralığı farklıysa kaynakta verilen alt ve üst sınırlar kullanılacaktır. Sonuçların sağlamlığı toplam emisyon, toplam maliyet, sektör payı ve hedef açığındaki değişimlerle değerlendirilecektir.

4.8. ETIK, ŞEFFAFLIK VE YENIDEN ÜRETILEBILIRLIK

Çalışma kişi düzeyinde veri içermediği için kişisel veri veya katılımcı riski öngörülmemektedir. Kullanılan bütün veri serileri için kurum, tablo adı, sürüm, erişim tarihi, birim dönüşümü ve yapılan düzeltmeler veri sözlüğünde tutulacaktır. Kod, mümkün olduğu

ölçüde, ham veriyi değiştirmeyen ayrı işleme ve model dosyaları biçiminde saklanacak; rastgelelik kullanılan analizlerde sabit tohum belirtilecektir. Lisans veya erişim kısıtı bulunan veri yeniden dağıtılmayacak, yalnızca kaynağı ve türetilmiş katsayılar raporlanacaktır.

5. BULGULAR

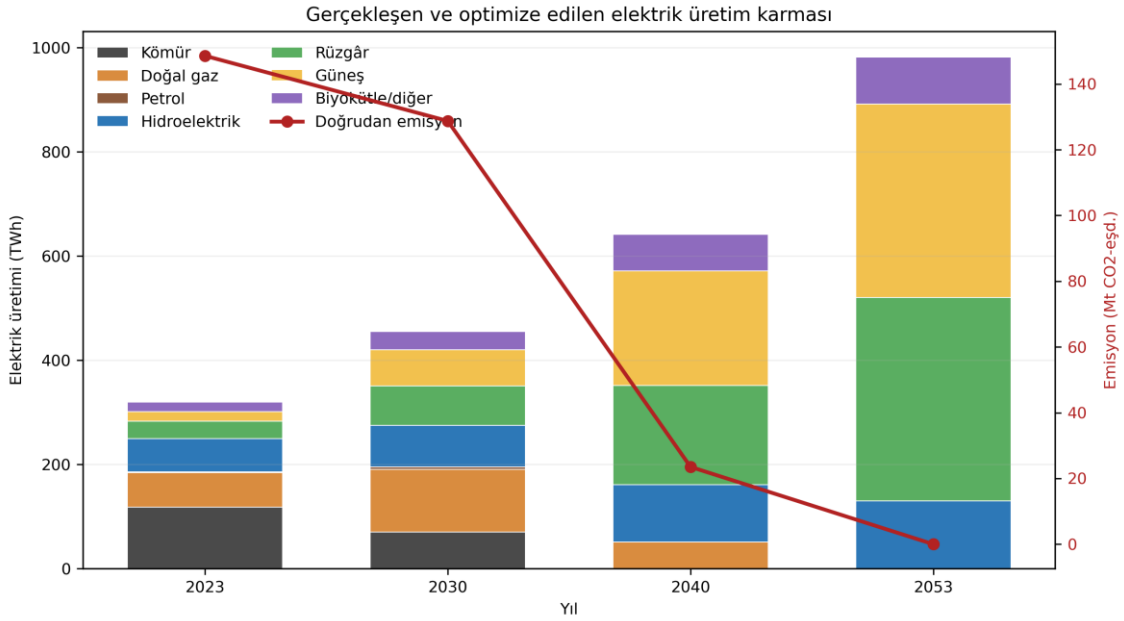
Doğrusal programlama modeli 2030, 2040 ve 2053 yılları için optimum çözüm üretmiştir. Sonuçlar Tablo \ref{tab:sonuclar} içinde gösterilmektedir. Model, 2030 yılında 455,3 TWh talebi karşılarken 260 TWh yenilenebilir elektrik üretimi seçmiştir. Yenilenebilir payı yüzde 57,11'e ulaşırken kömür üretimi 70,30 TWh, doğal gaz üretimi 120 TWh ve petrol üretimi 5 TWh olmuştur. Toplam doğrudan emisyon 128,74 Mt CO_2-eşd., karbon yoğunluğu ise 282,77 g CO_2-eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer 2023 elektrik sektörü emisyonuna göre yüzde 13,34 azalıştır.

2040 çözümünde 641,47 TWh talebin 590 TWh'si yenilenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. Kömür ve petrol üretimi sıfıra inerken kalan 51,47 TWh doğal gazdan sağlanmıştır. Böylece yenilenebilir payı yüzde 91,98'e çıkmış, emisyon 23,52 Mt CO_2-eşd. ve karbon yoğunluğu 36,66 g CO_2-eşd./kWh olmuştur. Bu sonuç 2023'e göre yüzde 84,17 emisyon azalmasına karşılık gelmektedir.

2053 çözümünde 982 TWh talebin tamamı yenilenebilir kaynaklardan karşılanmıştır. Optimum bileşim 130 TWh hidroelektrik, 390 TWh rüzgâr, 372 TWh güneş ve 90 TWh biyokütle/diğer yenilenebilir üretimden oluşmaktadır. Model sınırları altında fosil yakıtlı üretime ihtiyaç kalmadığından doğrudan işletme emisyonu sıfır bulunmuştur. Bu sonuç, tanımlanan yenilenebilir üretim üst sınırlarının bütünüyle gerçekleştirildiği koşullu bir teknik fizibilite sonucudur.

Çizelge 3. Elektrik üretimi optimizasyon sonuçları

lrrrr@{} **Yıl**	**Talep**	**Yenilenebilir payı**	**Emisyon**	**Karbon yoğunluğu**
	(TWh)	**(%)**	**(Mt CO_2-eşd.)**	**(g CO_2-eşd./kWh)**
2023 gerçekleşen	319,79	42,01	148,57	464,59
2030 optimum	455,30	57,11	128,74	282,77
2040 optimum	641,47	91,98	23,52	36,66
2053 optimum	982,00	100,00	0,00	0,00



Görsel 2. 2023 gerçekleşen üretim karması ile 2030, 2040 ve 2053 optimum çözümlerinin karşılaştırılması. Kırmızı çizgi elektrik üretiminden kaynaklanan doğrudan emisyonu göstermektedir.

Sonuçlar, elektrik talebi 2023 düzeyinin yaklaşık üç katına çıksa bile yeterli yenilenebilir üretim genişlemesiyle doğrudan emisyonun sıfıra indirilebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte model saatlik arz-talep dengesi, depolama kayıpları, şebeke yatırımı, rezerv kapasite ve maliyetleri içermemektedir. IRENA değerlendirmeleri, yenilenebilir kaynakların maliyet avantajı güçlenirken yüksek paylara ulaşmak için şebeke ve depolama yatırımlarının temel kolaylaştırıcılar olduğunu göstermektedir (irena). Dolayısıyla yıllık enerji dengesi bakımından bulunan çözüm, gerçek sistem işletimi ve yatırım planı için gerekli fakat tek başına yeterli değildir.

6. TARTIŞMA ÇERÇEVESI

Optimizasyon sonuçları, net sıfır yolunun temel olarak kömür üretiminin aşamalı biçimde sonlandırılmasına ve rüzgâr ile güneş üretiminin büyük ölçekte artırılmasına dayandığını göstermektedir. 2030 çözümünde artan talep nedeniyle doğal gaz ve kömür hâlâ gerekli görünürken, 2040 çözümünde kömür tamamen sistem dışına çıkmakta ve doğal gaz sınırlı bir dengeleme kaynağına dönüşmektedir. 2053 çözümü ise yıllık üretim dengesi bakımından tamamen yenilenebilir bir elektrik sisteminin mümkün olduğunu göstermektedir.

Model sonuçları bir tahmin veya kesin gelecek betimlemesi olarak değil, açık varsayımlar altında koşullu karar desteği olarak yorumlanacaktır. Örneğin bir teknolojinin optimum çözümde yüksek pay alması, teknolojinin her koşulda üstün olduğunu değil, tanımlanan maliyet, kapasite ve emisyon katsayıları altında seçildiğini gösterir. Politika önerileri bu koşulluluk açıkça belirtilerek geliştirilecektir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

7. SINIRLILIKLAR

Modelin doğrusal programlama yapısına dayanması nedeniyle ölçek ekonomileri, öğrenme eğrileri ve bazı teknik eşik değerleri ancak yaklaşık olarak temsil edilebilmiştir. Bununla birlikte, 2053 gibi uzun vadeli bir zaman ufkuna ilişkin teknoloji ve talep varsayımları doğası gereği belirli bir belirsizlik içermektedir.

Öte yandan, çalışmanın kapsamı yalnızca elektrik sektörünün doğrudan işletme emisyonlarıyla sınırlı tutulmuş; sanayi, ulaştırma, tarım, arazi kullanımı, atık ve bina sektörlerinden kaynaklanan emisyonlar analiz dışında bırakılmıştır. Bunun yanı sıra, yatırım ve işletme maliyetleri, enerji depolama, saatlik üretim değişkenliği, iletim kısıtları ve sistem rezerv gereksinimleri gibi unsurlar henüz modele dahil edilmemiştir.

8. SONUÇ VE POLITIKA ÇIKARIMLARI

Bu çalışma, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefini sektör ve teknoloji düzeyinde incelemek üzere doğrusal programlama tabanlı bir araştırma çerçevesi sunmaktadır. Önerilen model, emisyonların yalnızca geçmiş eğilimini incelemek yerine hizmet talebini karşılayan ve teknik sınırlar içinde kalan en düşük maliyetli dönüşüm bileşimini aramaktadır. Enerji, sanayi ve ulaştırma arasındaki bağlantıların birlikte ele alınması, tek sektörlü değerlendirmelere göre daha tutarlı politika çıkarımları üretme potansiyeli taşımaktadır.

Gerçek 2023 verileriyle kalibre edilen model, 2030 ve 2040 ara hedeflerinden geçerek 2053 yılında elektrik üretiminin doğrudan emisyonunu sıfıra indirebilen bir üretim bileşimi bulmuştur. Sonucun gerçekleşebilmesi için kömürden çıkışın, rüzgâr ve güneş üretimindeki hızlı artışın, hidroelektrik esnekliğinin ve diğer yenilenebilir kaynakların birlikte yürütülmesi gerekmektedir. Bir sonraki aşamada teknoloji bazında yatırım maliyeti, kurulu kapasite, kapasite faktörü, depolama ve saatlik yük verileri eklenerek en düşük maliyetli yol hesaplanmalıdır. Elde edilen sonuç net sıfır hedefinin yıllık elektrik dengesi bağlamında matematiksel olarak mümkün olduğunu gösteren bir çalışmadır.

9. KAYNAKÇA

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2023). *Ulusal Sera Gazı Envanteri Raporu (1990–2021)*.

Türkiye İstatistik Kurumu (2024). *Sera Gazı Emisyon İstatistikleri*.

International Energy Agency (2024). *CO$_2$ Emissions from Fuel Combustion: Highlights*.

European Environment Agency (2024). *Greenhouse Gas Data Viewer*.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IGES, Japan.

Winston, W. L. (2003). *Operations Research: Applications and Algorithms*. Thomson/Brooks/Cole.

Fishbone, L. G. ve Abilock, H. (1981). MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the BNL version. *International Journal of Energy Research*, 5(4), 353–375.

T.C. Resmî Gazete (2021). *Paris Anlaşmasının Onaylanmasının Uygun Bulunduğuna Dair Kanun*.

T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı (2019). *On Birinci Kalkınma Planı (2019–2023)*.

Our World in Data (2024). *Energy Data*. Türkiye için 2010–2023 enerji ve elektrik göstergeleri; veri sürümü 18 Ekim 2024.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2023). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. 2030 elektrik tüketimi projeksiyonu: 455,3 TWh; 2035 projeksiyonu: 510,5 TWh.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi (2023). *Net Zero 2053: A Roadmap for the Turkish Electricity Sector*. 2053 toplam elektrik talebi: 982 TWh; yenilenebilir üretim payı: yüzde 90'ın üzerinde.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.

International Energy Agency (2021). *Turkey 2021: Energy Policy Review*. Paris: IEA.

Ember (2024). *Türkiye Electricity Review 2024*. Londra: Ember.

International Renewable Energy Agency (2024). *Renewable Power Generation Costs in 2023*. Abu Dhabi: IRENA.

Özcan, E. C. ve Erol, S. (2014). A multi-objective mixed integer linear programming model for energy resource allocation problem: The case of Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 27(4), 1157–1168.

Deveci, K. ve Güler, Ö. (2020). A CMOPSO based multi-objective optimization of renewable energy planning: Case of Turkey. *Renewable Energy*, 155, 578–590. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.033.

Yörük, G., Baç, U., Yerlikaya-Özkurt, F. ve Ünlü, K. D. (2023). Strategic electricity production planning of Turkey via mixed integer programming based on time series forecasting. *Mathematics*, 11(8), 1865. DOI: 10.3390/math11081865.

Önenli, O., Ercan, H., Açıkgöz, S. ve Kat, B. (2023). Emission reduction pathways for satisfying Türkiye's future electricity demand: A cross-country dynamic panel analysis with linear programming scenarios. *Cleaner Energy Systems*, 6, 100085.

Kat, B., Şahin, Ü., Teimourzadeh, S., Tör, O. B., Voyvoda, E. ve Yeldan, A. E. (2024). A new energy-economy-environment modeling framework: Insights from decarbonization of the Turkish power sector towards net-zero emission targets. *Energy*, 302, 131760. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131760.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

HASTA BAKIM UYGULAMALARINDA MATEMATİK DESTEKLİ YAPAY ZEKA UYGULAMALARI: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLER

Dr, Ahmet YILDIRIM

Ege Üniversitesi, yildirim.ahmet@ege.edu.tr - 0000-0001-8989-4271

Dr.Ogr.Uyesi, Nilufer YILDIRIM

Erzurum Teknik Üniversitesi, nilufer.yildirim@erzurum.edu.tr - 0000-0001-8851-7044

ÖZET

Yapay zeka teknolojileri, hastanelerde çalışan doktorlara ve hemşirelere yardımcı olabilmektedir. Yapay zekanın matematiğe dayalı olarak çalışması, hastanelerde çalışan kişilere yardımcı olabilmektedir. Bu bildiride, hasta bakım uygulamalarında matematik destekli yapay zeka süreçlerinin nasıl işlediklerinin ve hangi alanlarda kullanılabileceklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Erken uyarı sistemleri, kötüleşmenin öngörülmesi, düşme riski, ilaç yönetimi, yoğun bakım alanları ve bakım planlamasında matematik destekli yapay zeka sistemlerinin etkisi incelenmektedir. Ayrıca açıklayabilir yapay zeka ve dijital sağlık sistemlerinin hemşirelikte sağladığı katkılar da tartışılmaktadır. Sonuç olarak hasta bakım alanlarında matematik destekli yapay zeka sistemlerinin, hastaların güvenliğini sağlayabilmesi, sağlık çalışanlarını destekleyebilmesi ve bakım kalitesini artırması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Matematik Destekli Yapay Zeka, Hasta Bakımı, Klinik Karar Destek Sistemleri, Hemşirelik, Dijital Sağlık.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ASTRONOMİK GÖZLEMLERDE DERİN ÖĞRENME İLE HEDEF TANIMA

Furkan Çağrı YILMAZ
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı
furkan01yilmaz07@gmail.com – ORCID: 0009-0005-8413-0885

Doç. Dr. Burak ULAŞ
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi / Fen Fakültesi / Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü
burak.ulas@comu.edu.tr – ORCID: 0000-0002-4624-3847

ÖZET

Modern astronomik gözlemlerden elde edilen geniş ölçekli dijital görüntü verilerinin yoğunluğundan dolayı oluşan temiz veri kıtlığı ve yanlış sınıflandırılan Merkezi Galaksiler (MG) ve Komşu Galaksiler (CG) gibi hedeflerin otonom tespiti için derin öğrenme tabanlı bir yazılım mimarisi geliştirmeyi odak noktasına almaktadır. Çalışma kapsamında; SSD, Faster R-CNN, YOLOv8 ve sıfırdan geliştirilen algoritmaları astronomik veri setlerine entegre edilerek, nesne tespit performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, derin öğrenme mimarilerinin büyük ölçekli gökyüzü taramalarında yüksek doğruluklu hedef tanıma potansiyelini kanıtlar niteliktedir. Gelecek çalışmalarda ise, küresel bağlamsal ilişkileri modelleyebilen Vision Transformers (ViT) yaklaşımlarının sisteme entegre edilerek sönük kaynakların ayırt edilme limitlerinin daha da geliştirilmesi öngörülmektedir. Devam projeleri olarak ise gerçek zamanlı görüntü işleme teknolojileri ile uzay teleskoplarına entegre edilen sistem geliştirme hedefleri konulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Astronomik Hedef Tanıma, Derin Öğrenme, YOLO, SSD, FasterR-CNN, Galaksi Tespiti

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. GİRİŞ

Evrenin evrimsel dinamiklerini anlamdırmak, modern gözlem teknolojilerinin sunduğu büyük ölçekli verilerin doğru ve sistematik bir biçimde analiz edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sürecin en kritik duraklarından biri ise galaksileri sınıflandırmak. Bir galaksinin dış görünüşü yani morfolojisi, aslında bize onun kütle dağılımından yıldız oluşum hızına, hatta milyonlarca yıllık evrimsel yolculuğuna dair çok değerli ipuçları vermektedir (Conselice, 2014). Ancak bugün öyle bir noktadayız ki, gelişen teknolojiyle birlikte üzerimize adeta bir veri sağanağı yağıyor. Artık teleskopların yakaladığı bu devasa görüntü yığınını insanların tek tek inceleyip sınıflandırması maalesef fiziksel olarak mümkün değil. İşte tam bu noktada yapay zekâ, özellikle de derin öğrenme algoritmaları astronomi dünyası için bir tercihten ziyade zorunluluk haline geldi (Dieleman vd., 2015). Çalışmanın temel çıkış noktası da tam olarak bu: Derin öğrenme yöntemlerini devreye sokarak galaksileri görüntüler üzerinden otomatik olarak tanımlamak ve kategorize etmek. Bu yaklaşım sadece büyük ölçekli gökyüzü taramalarında hızı ve verimliliği artırmakla kalmıyor, aynı zamanda insan gözünün yorgunluktan veya dikkatsizlikten kaynaklanan hatalarını da en aza indiriyor. Dahası, farklı morfolojik yapıdaki galaksilerin bu yöntemlerle birbirinden hassas bir şekilde ayrıştırılması, evrenin karanlıkta kalan yapısal sırlarını aydınlatmamıza olanak tanımaktadır (Huertas-Company vd., 2015). Çalışma sadece bir sınıflandırma başarısı sergilemekle kalmıyor; aynı zamanda astronomide veri bilimi odaklı yaklaşımların önünü açıyor. Özellikle önümüzdeki dönemde Vera Rubin Gözlemevi ve James Webb Uzay Teleskobu (JWST) gibi dev projelerden akacak olan karmaşık verileri işlemek için bu tür derin öğrenme modelleri en güvenilir rehberimiz olacak (Walmsley vd., 2022). Kısacası, yeni nesil gözlem projelerine hazırlanmak ve elimizdeki veriyi en verimli şekilde değerlendirmek için bu dijital dönüşüm önem taşımaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Modern astronomi çalışmaları, günümüzde büyük oranda sistematik gözlem programları kapsamında üretilen ve küresel bilim topluluğuna açık erişim modeliyle sunulan devasa astronomik veri arşivlerine dayanmaktadır. Özellikle galaksilerin karmaşık yapısal özelliklerinin, morfolojik çeşitliliklerinin ve milyarlarca yıla yayılan evrimsel süreçlerinin izini sürmek; farklı dalga boylarında, değişken uzaysal çözünürlüklerde ve farklı zaman dilimlerinde

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

elde edilmiş nitelikli astronomik görüntülerin sentezlenmesini gerektirir. Bu bağlamda, astronomik görüntü kaynakları temel olarak uzay tabanlı ve yer tabanlı gözlem programları olmak üzere iki ana eksende sınıflandırılmaktadır. Her iki gözlem metodolojisi de sahip oldukları kendine has teknik imkanlar ve fiziksel sınırlamalar doğrultusunda, galaksi araştırmalarının bütününe özgün ve birbirini tamamlayan katkılar sunmaktadır. Bir galaksi araştırmasında kullanılacak veri kaynağının seçimi, doğrudan doğruya çalışmanın bilimsel hedefleriyle ilintilidir. Galaksi tespiti, morfolojik ayrıştırma veya sınıflandırma gibi hassasiyet gerektiren çalışmalarda; görüntünün piksel çözünürlüğü, sinyal-gürültü oranı (SNR), kapsadığı dalga boyu aralığı ve gözlem alanının genişliği gibi parametreler belirleyici rol oynamaktadır (Rieke et al., 2015). Bu nedenle, analizde kullanılacak görüntü kaynaklarının teknik spesifikasyonlarının ayrıntılı bir biçimde analiz edilmesi, elde edilecek bilimsel bulguların doğruluğu ve tekrarlanabilirliği açısından vazgeçilmez bir ön koşuldur. Uzay tabanlı ve yer tabanlı gözlemler arasındaki temel ontolojik fark, Dünya atmosferinin elektromanyetik dalgalar üzerindeki bozucu etkisinden kaynaklanır. Yer tabanlı teleskoplar, her ne kadar devasa ayna çaplarına sahip olsalar da atmosferik türbülans, ışık kirliliği, soğurma ve saçılma gibi doğal engeller nedeniyle belirli bir çözünürlük sınırına ve dalga boyu kısıtlamasına mahkumdur. Buna karşın, uzay tabanlı teleskoplar atmosferin bu kaotik perdesinden tamamen bağımsız bir noktada konumlanarak, evreni en saf haliyle gözlemleme şansı bulur (Gardner et al., 2006). Bu avantaj, özellikle galaksilerin çekirdek bölgelerindeki ince ayrıntıların, sarmal kolların hassas yapılarının ve düşük yüzey parlaklığına sahip silik detayların incelenmesinde uzay tabanlı verileri paha biçilemez kılmaktadır. Ancak yer tabanlı gökyüzü taramalarının da yadsınamaz bir üstünlüğü söz konusudur: Geniş görüş alanı ve süreklilik. Yer tabanlı teleskoplar, geniş alan taramaları sayesinde evrenin devasa bir kesitini tek seferde fotoğraflayabilir ve çok büyük veri setleri üretebilir. Bu tür kapsayıcı taramalar, istatistiksel açıdan anlamlı galaksi örneklemlerinin oluşturulmasına ve evrenin büyük ölçekli kozmik ağ yapısının (cosmic web) haritalanmasına olanak tanımaktadır (York et al., 2000; Chambers et al., 2016). Dolayısıyla, çağdaş astrofizik araştırmalarında bu iki kaynak, birbirinin alternatifi değil, aksine birbirini bütünleyen unsurlar olarak değerlendirilir. Astronomik görüntü kaynaklarının bir diğer ayırt edici özelliği ise çok dalga boylu (multi-wavelength) gözlem kapasitesidir. Galaksiler, bünyelerindeki farklı fiziksel süreçlerin bir sonucu olarak elektromanyetik spektrumun hemen her bölgesinde ışınım üretirler. Örneğin, görünür dalga boyları bize yaşlı yıldız popülasyonlarının dağılımını gösterirken; kızılötesi gözlemler kozmik toz perdelerinin arkasına gizlenmiş aktif yıldız oluşum bölgelerini, morötesi veriler ise enerjik ve genç yıldızları gün yüzüne çıkarır. X-ışını gözlemleri ise aktif

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

galaktik çekirdekler (AGN) gibi yüksek enerjili olayların merkezine ışık tutar (Kennicutt, 1998; Rieke et al., 2015). Bu zengin veri çeşitliliği, galaksi tespiti ve sınıflandırması çalışmalarında hata payını minimize eden, bütüncül bir fiziksel tablo sunan vazgeçilmez bir unsurdur. Günümüzde bu veri hazineleri, uluslararası konsorsiyumlarca yönetilen ve standardize edilmiş kalibrasyon süreçlerinden geçmiş dijital arşivler (Hubble (HST), James Webb (JWST), TESS, SDSS ve Pan-STARRS gibi) aracılığıyla sunulmaktadır (Gardner et al., 2006; York et al., 2000; Chambers et al., 2016). Bu arşivlerin sağladığı görüntüler, halihazırda bilimsel kalibrasyondan geçirilmiş olmaları sebebiyle farklı araştırmalar arasında sağlıklı bir karşılaştırma yapılmasına imkân tanır. Ancak, her gözlem programının kendine özgü dedektör karakteristiği ve gürültü profili bulunduğu unutulmamalıdır. Özellikle galaksi tespiti gibi otomatik veya derin öğrenme tabanlı yöntemlerin kullanıldığı çalışmalarda, verinin homojenliği ve kalitesi, algoritmanın öğrenme performansını ve sonuçların doğruluğunu doğrudan manipüle etmektedir (Huertas-Company et al., 2015; Zhao et al., 2024). Son yıllarda astronomik veri miktarının eksponansiyel bir hızla artması, geleneksel manuel analizlerin yerini derin öğrenme tabanlı yaklaşımlara bırakmasına zemin hazırlamıştır. Bu yeni dönemde, görüntü kaynaklarının sadece optik kalitesi değil, aynı zamanda hesaplamalı analizlere ve "büyük veri" mimarilerine uygunluğu da ön plana çıkmıştır. Yüksek çözünürlüklü ve çok bantlı veriler, derin öğrenme modellerinin galaksileri ayırt etme ve sınıflama görevlerinde çok daha keskin sonuçlar vermesini sağlamaktadır (Domínguez Sánchez et al., 2018; Zhu et al., 2025). Sonuç olarak, astronomik görüntü kaynakları galaksi araştırmalarının sadece birer girdisi değil, aynı zamanda çalışmanın bilimsel derinliğini ve sınırlarını belirleyen temel bileşenleridir. Uzay ve yer tabanlı programların sunduğu bu hibrit avantajlar, galaksilerin çok boyutlu bir perspektifle incelenmesine kapı aralamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında tercih edilen veri setleri de söz konusu gözlem programlarının sunduğu bu teknik ve bilimsel olanaklar titizlikle analiz edilerek seçilmiş; galaksi tespiti problemine en yüksek katkıyı sunacak şekilde optimize edilmiştir.

2.1. Galaxy Zoo Veri Setinin Elde Edilmesi

Bu araştırmada kullanılan galaksi imgeleri, galaksi morfolojisi çalışmalarında küresel bir standart olarak kabul edilen Galaxy Zoo veri tabanından valide edilerek türetilmiştir. Galaxy Zoo projesi, büyük ölçekli gökyüzü taramalarından elde edilen milyonlarca galaksi görüntüsünün morfolojik açıdan tasnif edilmesi amacıyla hayata geçirilmiş, dünyanın en

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

başarılı "vatandaş bilimi" (citizen science) örneklerinden biridir. Projenin temel motivasyonu, bilgisayar algoritmalarının henüz yeterince olgunlaşmadığı dönemlerde, insan gözünün örüntü tanıma yeteneğinden faydalanarak spiral, eliptik ve düzensiz gibi temel morfolojik sınıflar için devasa bir etiketli veri havuzu oluşturmaktır (Lintott et al., 2008; Willett et al., 2013). Büyük ölçüde Sloan Digital Sky Survey (SDSS) verilerine dayanan bu kolektif çaba, günümüzde derin öğrenme modellerinin eğitilmesi için gereken "altın standarttaki" etiketli veriyi sağlamaktadır. Çalışma kapsamında ihtiyaç duyulan galaksi örneklemi için gerekli koordinat verileri, projenin en kapsamlı aşamalarından biri olan Galaxy Zoo 2 kataloğundan çekilmiştir. Veri seti içerisinde her bir galaksinin gökyüzündeki konumunu hassas bir biçimde tanımlayan Sağ Açıklık (Right Ascension, RA) ve Dik Açıklık (Declination, Dec) parametreleri yer almaktadır. Bu astronomik koordinatlar, hedef nesnelerin SDSS arşivindeki karşılıklarını bulmak için birer anahtar görevi görmüş; ilgili görüntüler manuel müdahale yerine geliştirilen özel bir yazılımsal iş akışı ile programatik olarak indirilmiştir. Veri toplama sürecinin otomatize edilmesi amacıyla Python programlama dili tabanlı, uçtan uca çalışan bir veri çekme (scraping) boru hattı kurgulanmıştır. Sürecin ilk adımında, Galaxy Zoo kataloğu CSV formatında okunarak sistem belleğine yüklenmiş ve her bir galaksi nesnesine ait RA ve Dec koordinatları ayrıştırılmıştır. Ardından bu koordinat çiftleri, SDSS Image Cutout servisine yönlendirilen dinamik sorgulara dönüştürülmüştür. SDSS veri servislerinin sunduğu bu imkân, araştırmacıların tüm gökyüzü haritasını indirmek yerine, sadece belirli koordinat merkezli ve istenilen piksel boyutundaki görüntü kesitlerini (cutouts) hızlıca elde etmesine olanak tanımaktadır. Görüntülerin indirilme aşamasında, SDSS servisinin URL tabanlı sorgu mimarisi kullanılarak her nesne için özelleşmiş bir talep oluşturulmuştur. Bu sorgu dizisi içerisinde koordinatların yanı sıra, görüntünün açısal çözünürlüğünü belirleyen ölçek katsayısı ile çıktının genişlik ve yükseklik parametreleri de tanımlanmıştır. Çalışmanın tutarlılığı açısından, tüm galaksiler için sabit bir ölçek parametresi ve üniform bir piksel boyutu tercih edilmiştir; böylece veri setinin çözünürlük bakımından homojen bir yapıda olması ve derin öğrenme modellerinin eğitiminde boyutsal bir sapma oluşmaması garanti altına alınmıştır. Yazılımsal uygulama tarafında, tablosal verilerin işlenmesi ve analitik yönetimi için pandas kütüphanesinden yararlanılmıştır (McKinney, 2010). Katalogdaki her bir satırın bağımsız bir galaksi nesnesi olarak ele alındığı bu süreçte, HTTP tabanlı ağ isteklerini yönetmek için ise requests kütüphanesi tercih edilmiştir. Her galaksi için oluşturulan dinamik URL adresine gönderilen GET istekleri neticesinde, servis tarafından döndürülen yüksek kaliteli JPEG formatındaki görüntüler yerel depolama birimlerine aktarılmıştır. Veri setinin sistematik bir düzende saklanabilmesi için indirme işlemi sırasında

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

otomatik bir klasör yapısı kurgulanmış ve her bir dosya, katalogdaki özgün indeks numarasına sadık kalınarak benzersiz bir isimle kaydedilmiştir. Bu yöntem, binlerce galaksiden oluşan veri havuzunun hem sonraki ön işleme adımlarında hem de modelin test safhalarında kolayca erişilebilir ve izlenebilir olmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, Galaxy Zoo kataloğundaki zengin morfolojik bilgi, modern veri madenciliği teknikleriyle birleştirilerek, yapay zekâ modellerinin eğitimi için optimize edilmiş, tekrarlanabilir ve bilimsel geçerliliği yüksek bir astronomik görüntü veri seti inşa edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

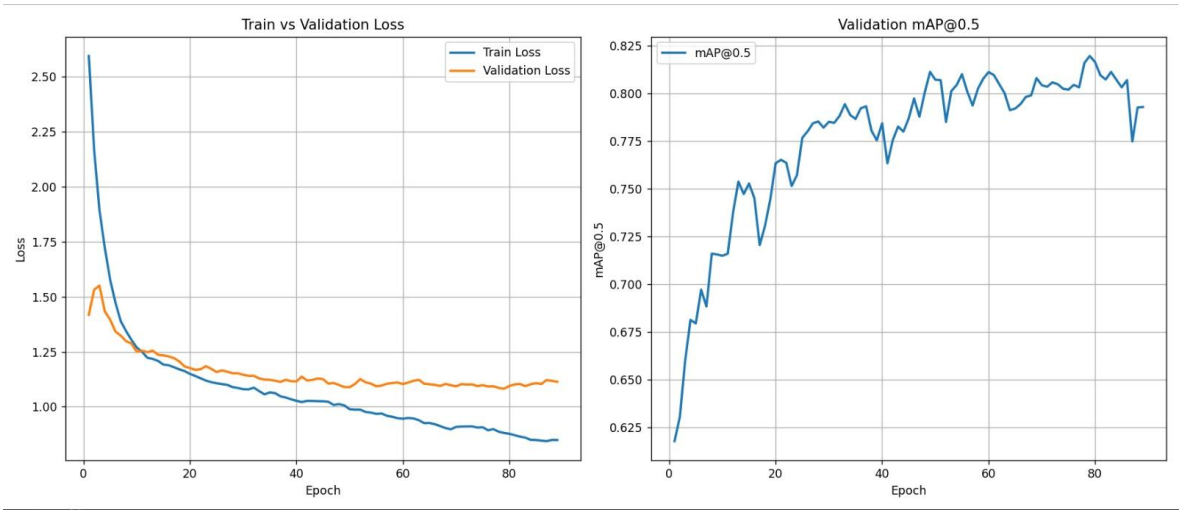
Astronomik görüntülerde galaksi tespiti amacıyla modern derin öğrenme tabanlı nesne tespit (object detection) mimarileri temel araştırma yöntemi olarak benimsenmiştir. Nesne tespit problemleri, sadece görüntü içerisindeki hedef nesnelerin sınıflandırılmasını (classification) değil, aynı zamanda bu nesnelerin uzaydaki konumlarının sınırlayıcı kutular (bounding boxes) aracılığıyla hassas bir biçimde belirlenmesini gerektiren karmaşık bir görevdir. Geleneksel bilgisayarlı görü yöntemleri olan HOG (Histogram of Oriented Gradients), SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) veya Haar-like özellik çıkarıcılar sınırlı bir temsil gücüne sahipken; Evrişimli Sinir Ağlarının (CNN) mimari olarak olgunlaşması, uçtan uca (end-to-end) öğrenme süreçlerini mümkün kılarak bu alanda bir paradigma değişimine yol açmıştır (LeCun et al., 2015). Günümüzde modern nesne tespit yaklaşımları, işlem akışlarına göre temelde iki aşamalı (two-stage) ve tek aşamalı (one-stage) dedektörler olmak üzere iki ana kategoride değerlendirilmektedir. İki aşamalı dedektörler önce nesne olabilecek bölgeleri (region proposals) belirleyip ardından sınıflandırma yaparken; tek aşamalı dedektörler tüm süreci tek bir ağ geçişinde tamamlamaktadır. Bu bölümde, literatürde yüksek performans sergileyen YOLO (You Only Look Once) ailesi, Faster R-CNN ve Feature Pyramid Network (FPN) gibi mimarilerin teorik temelleri ve astronomik veriler üzerindeki yöntemsel karşılıkları incelenmektedir.

3.1. YOLOv8 ile 1000 Görselli Veri Kümesi Sonuçları

Araştırmanın ikinci evresinde, veri hacmi 1000 görsele çıkarılarak modelin daha geniş bir varyasyon spektrumundaki davranışları incelenmiştir. Eğitim sürecine ait kayıp grafikleri; train/box_loss (1.65 --> 1.02), train/cls_loss (3.5 --> 0.7) ve train/dfl_loss (1.45 --> 1.10)

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

değerlerindeki istikrarlı düşüşle modelin hiyerarşik öznitelik çıkarımı konusundaki başarısını sürdürdüğünü kanıtlamaktadır. Doğrulama (validation) eğrilerinin eğitim eğrileriyle sergilediği paralel seyir, modelin genelleme yeteneğinin korunduğunu ve yapısal bir aşırı öğrenme (overfitting) emaresi göstermediğini doğrulamaktadır. 1000 görselli veri setinde elde edilen doğruluk metrikleri; Kesinlik (Precision) bazında ~0.74, Duyarlılık (Recall) bazında ise ~0.82 seviyelerinde realize olmuştur.



Görsel 1. YOLO sonuçları

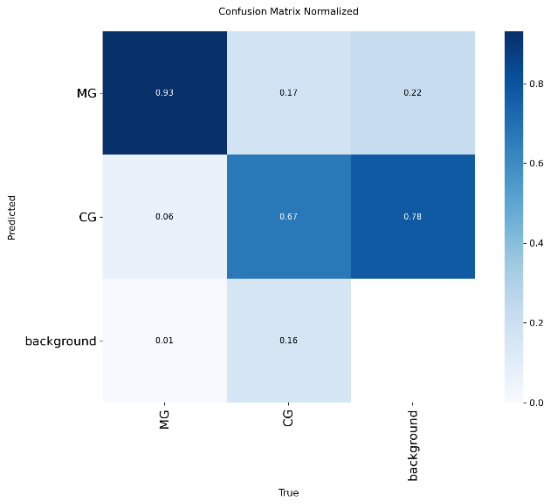
Bu sonuçlar Görsel 1.'de görüldüğü üzere modelin yüksek duyarlılıkla nesneleri yakalama kabiliyetini koruduğunu, ancak artan veri çeşitliliği ile "yanlış pozitif" (false positive) üretim oranında bir yükseliş yaşandığını ortaya koymaktadır. 500 görselli ilk deneyle mukayese edildiğinde gözlemlenen bu hafif regresyon, akademik açıdan kritik bir çıkarımı beraberinde getirmektedir: Veri seti genişledikçe modelin karşılaştığı "zor örneklerin" (hard examples) ve düşük kontrastlı arka plan gürültülerinin yoğunluğu artmış, bu da modelin karar sınırlarını daha gerçekçi bir zorluk seviyesine çekmiştir. Bütünsel performans göstergesi olan mAP@0.5 ≈ 0.81 ve mAP@0.5:0.95 ≈ 0.50 değerleri, genel tespit başarısının tatminkâr seviyede olduğunu ancak yüksek IoU eşiklerinde konumsal hassasiyetin, verideki morfolojik düzensizlikler nedeniyle baskılandığını doğrulamaktadır.

3.1.1. Kayıp Fonksiyonu, Karar Matrisi Sınıf Bazlı Karşılaştırma Analizi

İkinci deneyden elde edilen en önemli akademik sonuç, "veri seti büyüdükçe performansın düşmesi" fenomenidir. Bu durum, modelin küçük veri setinde belirli bir ölçüde

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

"lokal özniteliklere odaklanma" eğilimi gösterdiğini, veri seti büyüdüğünde ise astronomik verinin doğasında bulunan ayrıştırılabilirlik (separability) probleminin gün yüzüne çıktığını göstermektedir.



Görsel 2. YOLO karmaşıklık matrisi

MG sınıfının yüksek güven skorlarıyla (~0.8) stabilize olması, bu nesnelerin "feature representation" (öznitelik temsili) açısından güçlü olduğunu kanıtlar Görsel 2. Buna karşın CG sınıfının düşük güven skorları (~0.3-0.6) ve artan yanlış pozitif oranları, bu nesnelerin arka plan gürültüsünden ayrıştırılmasında kullanılan özniteliklerin yetersiz kaldığına işaret etmektedir. Sonuç olarak bu bulgular, gelecekteki çalışmalar için daha ileri düzey özellik çıkarım tekniklerine ve özellikle düşük kontrastlı nesneler için özelleşmiş veri artırma stratejilerine olan ihtiyacı bilimsel olarak temellendirmektedir.

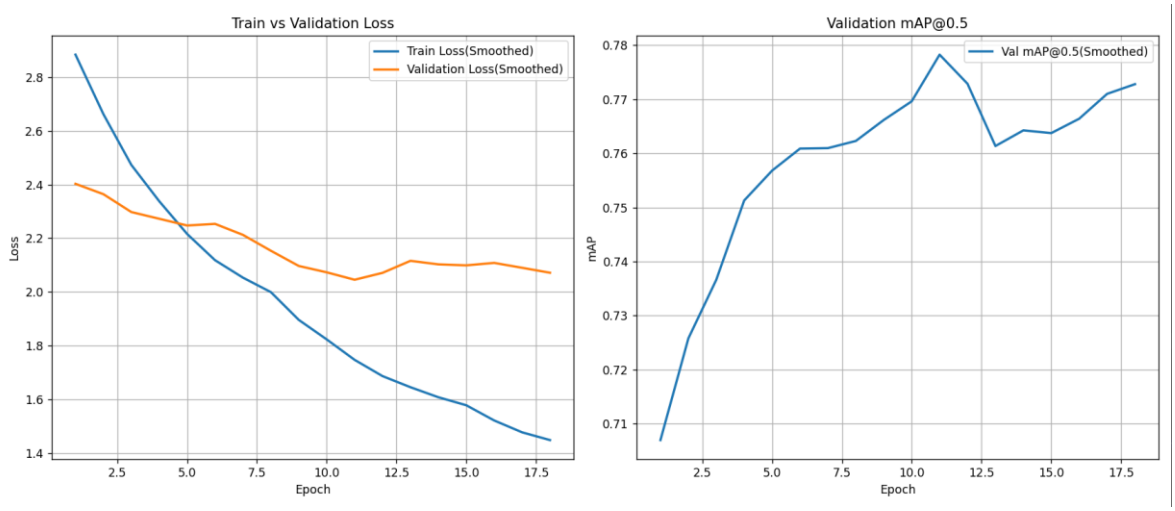
3.2. Özelleştirilmiş Faster R-CNN ve FPN Entegrasyonu

Tez çalışmasının özgün bir aşaması olarak yapılandırılan Faster R-CNN ve Feature Pyramid Network (FPN) entegrasyonuna dayalı modelin performansı; öğrenme dinamikleri, karmaşıklık matrisi ve çok ölçekli hassasiyet metrikleri üzerinden derinlemesine analiz edilmiştir. İki aşamalı (two-stage) bu mimarinin, galaksilerin yapısal özniteliklerini hiyerarşik bir düzlemde nasıl işlediği, elde edilen sayısal verilerle somutlaştırılmıştır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

3.2.1. Kayıp Fonksiyonu, Karar Matrisi Sınıf Bazlı Karşılaştırma Analizi

Modelin eğitim sürecine ait kayıp (loss) değerleri incelendiğinde, başlangıçtaki 0.21 seviyesinden 0.02 seviyesine kadar uzanan keskin ve düzenli bir düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle ilk 10 epoch içerisinde gerçekleşen yüksek ivmeli öğrenme süreci, FPN yapısının sunduğu çok ölçekli özellik haritalarının, modelin nesne karakteristiklerini hızla içselleştirmesine olanak tanıdığını göstermektedir.



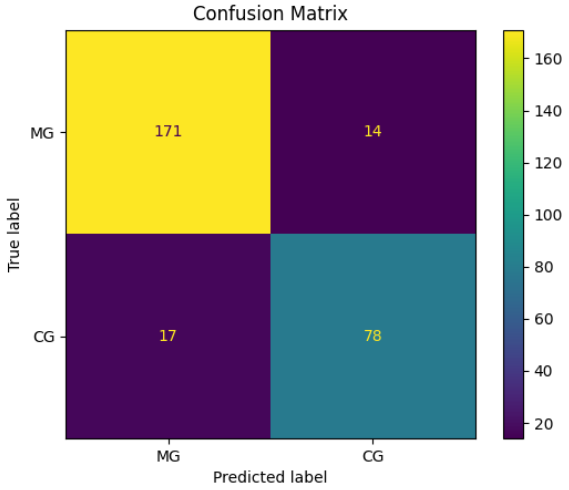
Görsel 3. Faster R-CNN sonuçları

Modelin eğitim süreci incelendiğinde, 10. epokta ulaşılan Görsel 3.'de görüldüğü üzere 0.77 mAP (mean Average Precision) değeri ile eğitimin erken aşamalarda optimize edildiği gözlemlenmiştir. Transfer öğrenme (transfer learning) metodolojisinin bir sonucu olarak, ResNet-50 omurga ağının geniş veri setlerinden elde ettiği öncül ağırlıklar, modelin sıfırdan öğrenme yerine doğrudan hedef sınıflar olan MG ve CG galaksilerinin ayırt edici morfolojik özelliklerine odaklanmasını sağlamıştır. Bu durum, yaklaşık 2.500 iterasyon gibi kısa bir sürede optimum ağırlıklara ulaşılmasını açıklamaktadır. Eğitim ve doğrulama kayıpları (loss) arasındaki ilişki değerlendirildiğinde; eğitim kaybının 0.12, doğrulama kaybının ise 0.15 seviyelerinde stabilize olduğu görülmektedir. İki değer arasındaki 0.03'lük düşük marj, modelin eğitim verisine aşırı uyum (overfitting) sağlamadan, veri setini başarılı bir şekilde genellediğini göstermektedir. Ayrıca eğitim sürecinde uygulanan rotasyon ve bulanıklaştırma (blur) gibi veri artırma (data augmentation) teknikleri, modelin gürültüye karşı direncini artırarak gerçek gök cismi özelliklerini öğrenmesine ve en yüksek performans noktasında eğitimi tamamlamasına olanak tanımıştır. Kayıp eğrisinin ilerleyen safhalarda sergilediği stabil seyir, modelin

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

parametre uzayında optimal bir yakınsama sağladığını belgelemektedir. Doğrulama kaybı verilerinin eksikliğine rağmen, eğitim kaybındaki bu kararlı düşüş profilinin literatürdeki başarılı "bölge öneri ağı" (RPN) eğitimleriyle uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. İki sınıflı galaksi tasnifinde elde edilen karmaşıklık matrisi sonuçları, modelin sınıflara yaklaşımındaki niteliksel farkı çarpıcı bir biçimde ortaya koymaktadır:

- **MG (Merkezi Galaksiler) Performansı:** Gerçek MG sınıfına ait 171 örneğin %92.4 doğruluk oranıyla tespit edilmesi, modelin kompakt ve belirgin morfolojik yapılara karşı geliştirdiği yüksek epistemik kesinliği kanıtlamaktadır.
- **CG (Komşu/Küçük Galaksiler) Performansı:** CG sınıfında %82.1 seviyesinde kalan doğruluk oranı ve 17 örneğin MG olarak hatalı etiketlenmesi, modelin bu sınıfa karşı bir "karar yanlılığı" (bias) geliştirdiğini göstermektedir.



Görsel 4. Faster R-CNN karmaşıklık matrisi

Genel doğruluk oranının %88.9 seviyesinde realize olması, iki aşamalı mimarinin astronomik nesne tespiti görevindeki genel başarısını teyit etse de sınıflar arası benzerliklerin (intra-class similarity) modelin ayırt edici gücünü sınırlayan temel faktör olduğu saptanmıştır. Modelin genel mAP@0.5 değeri 0.7765 olarak kaydedilmiştir. Ancak sınıf bazlı ayrıştırmada ortaya çıkan Görsel 4.'deki durum, mimarinin karakteristiğini yansıtmaktadır: MG sınıfı için elde edilen 0.98 AP@0.5 değeri neredeyse kusursuz bir tespite işaret ederken, CG sınıfının 0.58 AP@0.5 seviyesinde kalması dikkat çekicidir. Bu uçurum, CG nesnelerinin düşük sinyal-

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

gürültü oranı ve difüz sınır yapıları nedeniyle özellik çıkarım (feature representation) mekanizması tarafından yeterince güçlü temsil edilemediğini bilimsel olarak kanıtlamaktadır.

3.3. SSD (Single Shot Multibox Detector) Algoritması

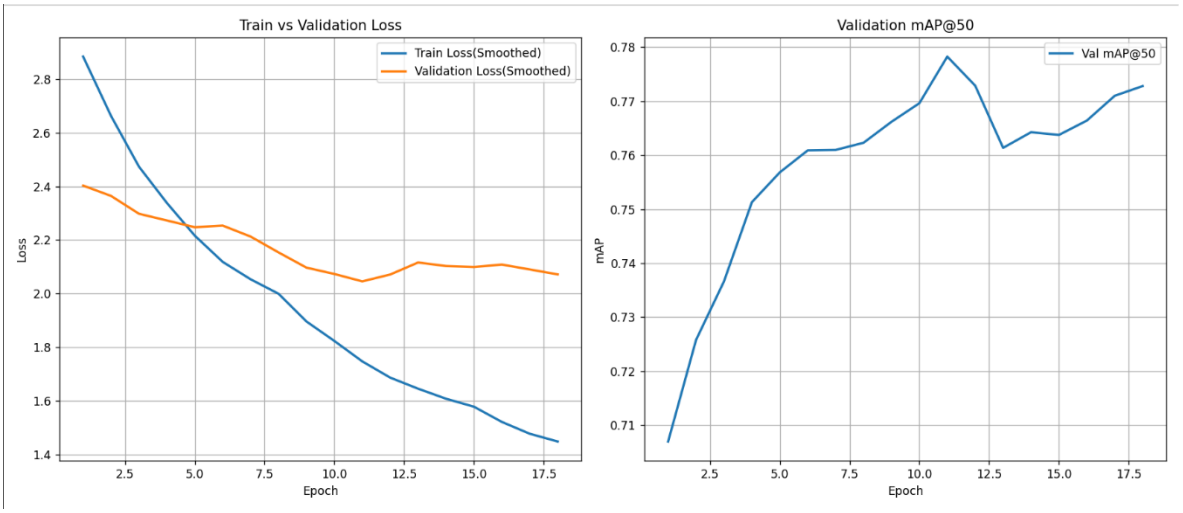
Nesne tespiti literatüründe hız odaklı mimarisiyle bilinen SSD (Single Shot Multibox Detector) algoritmasının astronomik görüntüler üzerindeki etkinliği; optimizasyon süreci, karmaşıklık matrisi tabanlı metrikler ve sınıfsal hata dağılımları üzerinden tetkik edilmiştir. SSD'nin farklı ölçeklerdeki özellik haritalarını tek bir geçişte kullanma stratejisinin, galaksi tespiti gibi düşük kontrastlı görevlerdeki yansımaları aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur. Eğitim sürecine ait toplam kayıp (loss) grafiği incelendiğinde, modelin başlangıçtaki ~2.7 seviyesindeki hata payını hızlı bir ivmeyle 0.1 bandına kadar düşürdüğü gözlemlenmiştir. Özellikle ilk 10 epoch içerisinde izlenen bu keskin düşüş, mimarinin veri setindeki temel öznitelik dağılımını hızla kavradığını göstermektedir. 10–20 epoch aralığında öğrenme hızı doğal bir doygunluğa ulaşarak daha kontrollü bir azalış sergilemiş; 20. epoch sonrasında ise loss değerleri düşük seviyelerde (~0.05–0.15) salınım yapmaya başlamıştır. Bu evrede gözlemlenen ani yükselmeler (spikes), veri setindeki "zor örneklerin" (hard samples) varlığına ve mini-batch tabanlı öğrenme sırasındaki yüksek varyansa işaret etmektedir. SSD'nin bu dalgalanmalara rağmen düşük bir hata seviyesinde kalması, optimizasyon sürecinin genel olarak başarılı bir yakınsama (convergence) sağladığını kanıtlasa da doğrulama kaybı (validation loss) verilerinin eksikliği, modelin genelleme kapasitesinin "aşırı öğrenme" (overfitting) riski açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini hatırlatır.

3.3.1. Kayıp Fonksiyonu, Karar Matrisi Sınıf Bazlı Karşılaştırma Analizi

Nesne tespiti modellerinin eğitim sürecinde gözlemlenen eğitim ve doğrulama kayıp (loss) eğrileri arasındaki ayrışma ile hata matrisinde (confusion matrix) karşılaşılan yüksek "Arka Plan" (Background) hataları, modelin yetersizliğinden ziyade kullanılan değerlendirme metriklerinin katı matematiksel doğasından kaynaklanan olağan dinamiklerdir. Kayıp eğrilerindeki sapma, optimizasyon fonksiyonunun sınıflandırma ve sınır kutusu bağlanım (bounding box regression) hatalarının birleşik bir türevi olmasının sonucudur; zira galaksiler

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

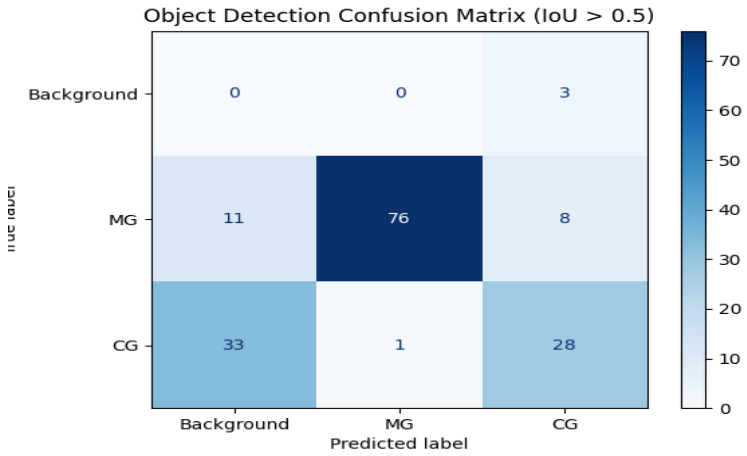
gibi optik sınırları difüz ve belirsiz olan derin uzay nesnelerinin etiketlenmesindeki doğal insan varyasyonu, modelin doğrulama setinde aşamayacağı algoritmik bir bağlanım tabanı (regression floor) oluşturur. Benzer şekilde, hata matrisi de Kesişim Üzeri Birleşim (Intersection over Union- IoU) için sabit bir eşik değeri (örn. 0.50) kullandığından, sınır kutusunda yaşanan birkaç piksellik ufak kaymalar (örn. IoU = 0.45) matris tarafından çifte cezalandırmaya tabi tutularak hem Yanlış Negatif (kaçırılan hedef) hem de Yanlış Pozitif (sahte arka plan) olarak kaydedilmekte ve hata oranını suni olarak şişirmektedir. Ayrıca SSD mimarisinin ürettiği örtüşen çoklu tespit önerileri, katı matris eşlemelerinde sahte arka plan gürültüsü olarak yansır. Bu bağlamda, modelin asıl tespit performansı ve genelleme (generalization) yeteneği Ortalama Kesinlik (Mean Average Precision- mAP) metrikleri üzerinden değerlendirilmelidir. Geliştirilen ağın mAP@50 metriğinde %83.3 gibi yüksek bir genel tespit oranına ulaşması ve %75 piksel örtüşmesi şartı koşan oldukça katı mAP@75 skorunda 0.547 gibi belirgin bir başarı göstermesi son derece kritiktir. Bu sonuçlar, modelin eğitim verisinin piksel dizilimlerini ezberlemediğini; aksine, uygulanan agresif veri artırımı (data augmentation) stratejileri sayesinde galaksilerin temel morfolojik özelliklerini sağlam (robust) bir topolojik kavrayışla öğrendiğini, uzamsal varyasyonları başarıyla tolere ettiğini ve daha önce hiç görmediği veriler üzerinde yüksek doğrulukta mekânsal tahminler üretebildiğini net bir biçimde kanıtlamaktadır.



Görsel 5. SSD sonuçları

IoU> 0.5 eşik değeri altında oluşturulan karmaşıklık matrisi, SSD modelinin sınıfsal karar mekanizmasındaki kritik zayıflıkları ve güçlü yanları deşifre etmektedir. Modelin sınıf bazlı performans metrikleri şu şekilde realize olmuştur:

- Merkezi Galaksiler (MG) Analizi: %77 Duyarlılık (Recall) ve %72 Kesinlik (Precision) oranları Görsel 5.'deki ile MG sınıfı, model tarafından orta-yüksek bir başarıyla ayırt edilmektedir. Ancak 29 adet "yanlış pozitif" (false positive) vakası, modelin bu sınıfa ait kutu regresyonunda hala belirli bir belirsizlik payı taşıdığını göstermektedir.
- Komşu/Küçük Galaksiler (CG) Analizi: CG sınıfında Duyarlılık (%73) makul seviyelerde kalsa da Kesinlik oranının %45 gibi düşük bir seviyeye gerilemesi dikkat çekicidir. Bu durum, modelin CG tespiti yaparken çok yüksek oranda hatalı alarm (55 adet FP) ürettiğini belgelemektedir.



Görsel 6. SSD karmaşıklık matrisi

Nesne tespiti algoritmalarında "Arka Plan", modelin aktif olarak atama yaptığı bir sınıf değil; aksine herhangi bir nesne özniteliği barındırmayan bölgeleri temsil eder. Karmaşıklık matrisindeki "Background" satırı incelendiğinde; modelin nesne bulunmayan 60 farklı bölgede hatalı çıkarım yaparak, bunlardan 24'ünü MG ve 36'sını CG olarak etiketlediği saptanmıştır. Matristeki bu veriler Görsel 6.'da görüldüğü üzere SSD mimarisinin bu veri seti özelinde arka

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

plan gürültüsünü (noise) etkili bir şekilde baskılayamadığını ve "boş uzay" bölgelerini yanlışlıkla galaksi yapılarıyla ilişkilendirdiğini bilimsel olarak ortaya koymaktadır. Bu durum, modelin nesne varlığına dair güven eşiğinin (objectness threshold) düşük kaldığını ve gökyüzü fonundaki flu yapıları nesne olarak yorumlayarak yüksek oranda Yanlış Pozitif (False Positive) ürettiğini kanıtlamaktadır. Arka plan satırındaki gerçek pozitif değerinin "0" olması, modelin arka planı tanıyamamasından ziyade, test edilen arka plan örneklerinin tamamında hatalı bir nesne kutusu kurguladığını göstermesi açısından kritik bir zayıflık göstergesidir. Elde edilen veriler ışığında, SSD modelinin performansı üç ana hata tipi üzerinden kategorize edilmiştir:

1. Aşırı Tespit (False Positive) Problemi: Toplamda 84 adet yanlış pozitif tespiti (MG: 29, CG: 55), modelin astronomik arka plan gürültüsünü gök cismi sanmasına yol açan düşük bir güven eşiğine (detection threshold) sahip olduğunu göstermektedir.
2. Nesne Kaybı (False Negative): MG sınıfında 22, CG sınıfında 17 nesnenin kaçırılması; özellikle düşük kontrastlı veya çok küçük galaksilerin SSD'nin özellik haritaları tarafından yakalanamadığını işaret etmektedir.
3. Sınıfsal Karışma ve Karar Yanlılığı: MG nesnelerinin CG'ye göre daha sık yanlış sınıflandırılması (19 vaka), modelin karar sınırlarının CG tarafında kontrolsüz bir şekilde genişlediğini ve özellik çıkarım (feature representation) yeteneğinin yetersizliğini ortaya koymaktadır.

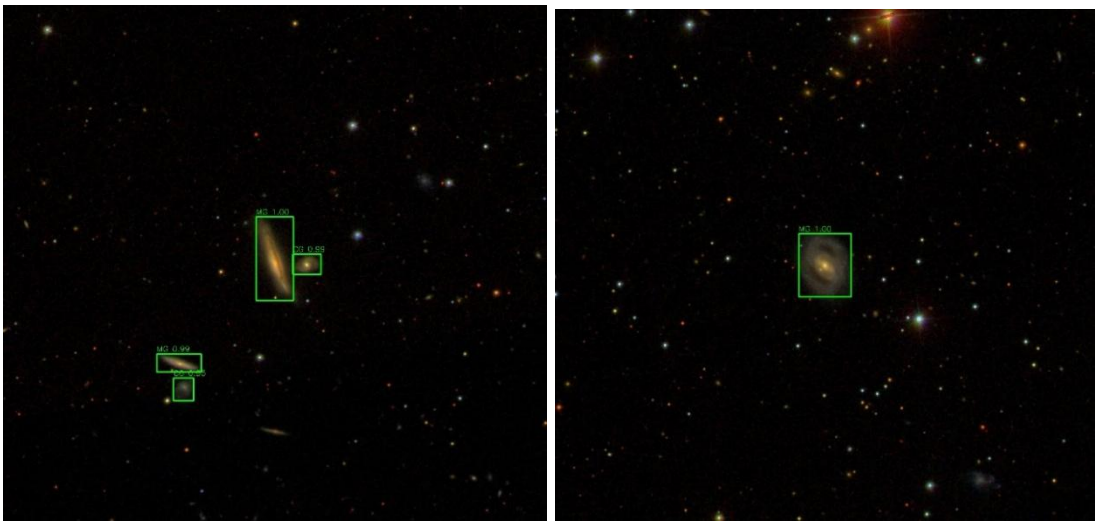
4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

.

Araştırma kapsamında elde edilen bulgular, astronomik nesne tespiti probleminin sadece algoritmik bir optimizasyon değil, aynı zamanda verinin sinyal-gürültü oranı (SNR) ve morfolojik belirsizliğiyle doğrudan ilintili olduğunu göstermiştir. Veri setinin N=500'den N=1000'e çıkarılmasıyla mAP skorunda gözlemlenen ~%4.7'lik bağıl azalış, makine öğrenmesindeki "Varyans-Yanlılık Dilemması" (Bias-Variance Tradeoff) ile açıklanabilir. Küçük veri setinde model, eğitim verisindeki lokal gürültü desenlerini (local noise patterns) birer ayırt edici öznitelik (feature) olarak ezberlemiş (overfitting), ancak veri hacmi arttıkça bu sahte öznitelikler genel dağılımda P(x) etkisizleşmiştir. 1000 görselli sette mAP@0.5 ~ 0.81 değerine yakınsama, modelin Genelleme Hatası (Generalization Error) sınırına ulaştığını ve astronomik arka planın kaotik yapısının modelin alt sınır (Lower Bound) performansını

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

belirlediğini göstermektedir. Deneyler, YOLOv8'in hız ve genel saptama başarısında (Recall) üstün olduğunu, ancak SSD mimarisinin astronomik arka plan gürültüsünü baskılamada ciddi yetersizlikler yaşadığını (yüksek False Positive) ortaya koymuştur. Buna karşın Faster R-CNN + FPN entegrasyonu, özellikle Merkezi Galaksiler (MG) sınıfında ulaştığı 0.98 AP değeriyle, iki aşamalı mimarilerin "nesne adaylığı" (region proposal) mekanizmasının konumsal kesinlikteki mutlak üstünlüğünü tescil etmiştir. Ancak her iki mimarinin de Komşu Galaksiler (CG) sınıfındaki düşük performansı, hatanın mimariden ziyade düşük yüzey parlaklığına sahip nesnelerin özellik çıkarım (feature representation) aşamasındaki zayıflığından kaynaklandığını göstermektedir.



Görsel 7. YOLO tahmin sonuçları

Derin öğrenme metodolojilerinin modern astronomik veri madenciliğinde otonom ve güvenilir birer analiz aracı olarak kullanılabilirliğini kapsamlı bir deneysel çerçevede kanıtlamıştır.

Elde edilen temel sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir:

1. Hiyerarşik Tespit Başarısı: Geliştirilen modeller, Merkezi Galaksiler (MG) sınıfında %90'ın üzerinde doğruluk oranlarına ulaşarak, belirgin morfolojik yapıların otonom tespitinde "insan gözü" hassasiyetini yakalamıştır.
2. Maliyet ve Performans Dengesi: YOLOv8 mimarisi, hesaplamalı maliyet ve doğruluk dengesi açısından geniş alan taramaları (survey) için en optimize çözüm olarak öne

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

çıkarken; Faster R-CNN, derin alan (deep field) çalışmalarında yüksek hassasiyetli konumlandırma için tercih edilmesi gereken mimari olarak saptanmıştır.

3. Arka Plan ve Gürültü Hassasiyeti: Astronomik görüntüleme süreçlerindeki kalibrasyon kalitesinin (Bias, Dark, Flat), derin öğrenme modellerinin "Yanlış Pozitif" üretme eğilimi üzerinde doğrudan belirleyici olduğu, SSD gibi mimarilerin gürültüye karşı daha kırılgan olduğu gözlemlenmiştir.
4. Asinh Ölçeklemenin Kritik Rolü: Veri hazırlık safhasında uygulanan asinh (hiperbolik sinüs tersi) ölçeklemenin, galaksilerin sönük kenar yapılarını koruyarak modellerin IoU (Intersection over Union) skorlarını stabilize ettiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

Conselice, C. J., *The Evolution of Galaxy Structure Over Cosmic Time*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 52, 291–337, 2014.

Dieleman, S., Willett, K. W. ve Dambre, J., *Rotation-invariant convolutional neural networks for galaxy morphology prediction*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 450(2), 1441–1459, 2015.

Huertas-Company, M., Gravet, R., Cabrera-Vives, G., Pérez-González, P. G., Kartaltepe, J. S., Barro, G., Bernardi, M., Mei, S., Shankar, F. ve Dimauro, P., *A catalog of visual-like morphologies in the 5 CANDELS fields using deep learning*, The Astrophysical Journal Supplement Series, 221(1), 8, 2015.

Rieke, G. H., Wright, G. S., Böker, T., Bouwman, J., Colina, L., Glasse, A., Gordon, K. D., Greene, T. P., Güdel, M., Henning, T., Justtanont, K., Lagage, P.-O., Meixner, M. E., Nørgaard-Nielsen, H.-U., Ray, T. P., Ressler, M. E., van Dishoeck, E. F. ve Waelkens, C., *The Mid-Infrared Instrument for the James Webb Space Telescope, I: Introduction*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 127, 584–594, 2015.

Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., Doyon, R., Greenhouse, M. A., Hammel, H. B., Hutchings, J. B., Jakobsen, P., Lilly, S. J., Long, K. S., Lunine, J. I., Mccaughrean, M. J.,

Mountain, M., Nella, J., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Rix, H.-W., Smith, E. P., Sonneborn, G. ve Stiavelli, M., *The James Webb Space Telescope*, Space Science Reviews, 123, 485–606, 2006.

York, D. G., Adelman, J., Anderson, J. E. Jr., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bakken, J. A., Barkhouser, R., Bastian, S., Berman, E., Boroski, W. N., Bracker, S., Briegel, C., Briggs, J. W., Brinkmann, J., Brunner, R., Burles, S., Carey, L. P., Carr, M. A., Castander, F. J. ve diğerleri, *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*, The Astronomical Journal, 120(3), 1579–1587, 2000.

Chambers, K. C., Magnier, E. A., Metcalfe, N., Flewelling, H. A., Huber, M. E., Waters, C. Z., Denneau, L., Draper, P. W., Farrow, D., Finkbeiner, D. P. ve diğerleri, *The Pan-STARRS1 Surveys*, arXiv:1612.05560, 2016.

Kennicutt, R. C. Jr., *Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 36, 189–231, 1998.

Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Land, K., Bamford, S., Thomas, D., Raddick, M. J., Nichol, R. C., Szalay, A., Andreescu, D., Murray, P. ve Vandenberg, J., *Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 389(3), 1179–1189, 2008.

Willett, K. W., Lintott, C. J., Bamford, S. P., Masters, K. L., Simmons, B. D., Casteels, K. R. V., Edmondson, E. M., Fortson, L. F., Kaviraj, S., Keel, W. C. ve diğerleri, *Galaxy Zoo 2: detailed morphological classifications for 304 122 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 435(4), 2835–2860, 2013.

McKinney, W., *Data Structures for Statistical Computing in Python*, Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 51–56, Austin, Texas, 2010.

LeCun, Y., Bengio, Y. ve Hinton, G., *Deep Learning*, Nature, 521, 436–444, 2015.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. ve Farhadi, A., *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 779–788, Las Vegas, Nevada, 2016.

Ren, S., He, K., Girshick, R. ve Sun, J., *Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 39(6), 1137–1149, 2017.

Lin, T.-Y., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B. ve Belongie, S., *Feature Pyramid Networks for Object Detection*, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2117–2125, Honolulu, Hawaii, 2017.

Domínguez Sánchez, H., Huertas-Company, M., Bernardi, M., Tuccillo, D. ve Fischer, J. L., *Improving galaxy morphologies for SDSS with Deep Learning*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 476(3), 3661–3676, 2018.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

AN APPLICATION OF THE MODIFIED EXPONENTIAL FUNCTION METHOD

Adalet ERDİNÇ

Harran University

adaleterdinc4@gmail.com– 0009-0005-6788-5872

Tanfer TANRIVERDİ

Harran University

ttanriverdi@harran.edu.tr- 0000-0003-4686-1263

ABSTRACT

Many problems are modeled as differential equations. It is important to know the solutions to these differential equations. Various methods exist for obtaining these solutions. One such method is the Modified Exponential Function Method (MEFM). In this study, the MEFM is applied to the gKdVZK equation. Wave solutions have been obtained, Graphs of these solutions are also presented.

Keywords : Modified Exp function method, gKdVZK equation, soliton solutions

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

EXTENDED HYPERBOLIC FUNCTION METHOD FOR THE $(2+1)$ DIMENSIONAL CONFORMABLE TIME-FRACTIONAL ZOOMERON EQUATION

Prof. Dr. Berat KARAAGAC
Tarsus University,
beratkaraagac@tarsus.edu.tr - 0000-0002-6020-3243

ABSTRACT

The Zoomeron equation is a well-known higher-dimensional nonlinear evolution equation with wide-ranging applications in the study of boomeron and trioron-type solitary wave phenomena. In this work, the conformable time-fractional extension of the $(2+1)$-dimensional Zoomeron equation is investigated using the extended hyperbolic function method (EHFM). A fractional complex traveling wave transformation, based on the conformable fractional derivative, reduces the governing fractional partial differential equation to a nonlinear ordinary differential equation. The extended hyperbolic function method is then applied, using both Type-1 and Type-2 auxiliary equations, to construct a family of exact closed-form solutions. Although the fractional Zoomeron equation has been previously investigated using a wide variety of analytical techniques, its treatment via the extended hyperbolic function method has not been reported. The derived solutions include singular, periodic-singular, bright/dark, and complex-valued wave structures, and are verified by direct substitution into the reduced equation

Anahtar Kelimeler Conformable Time-Fractional Zoomeron Equation, Extended Hyperbolic Function Method, Exact solutions.

1. INTRODUCTION

Nonlinear partial differential equations (NLPDEs) play a central role in modeling wave phenomena across fluid dynamics, plasma physics, optical fibers, and nonlinear dispersive media. Among the many exact-solution techniques developed for such equations, methods based on hyperbolic and trigonometric function ansätze – including the tanh method, the Jacobi elliptic function expansion method, and the extended hyperbolic function method (EHFM) – have proven particularly effective at extracting closed-form traveling wave solutions.

The Zoomeron equation, introduced by Calogero and Degasperis, is a $(2+1)$-dimensional nonlinear evolution equation reads as:

$$\frac{\partial^{2\alpha}u}{\partial t^{2\alpha}}\left[\frac{u_{xy}}{u}\right]-\frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}}\left[\frac{u_{xy}}{u}\right]+2\frac{\partial^{\alpha}u}{\partial t^{\alpha}}[u^{2}]_{x}=0,\qquad 0<\alpha\leq 1, \tag{1}$$

The equation given in (1) admits boomeron- and trioron-type solitary wave solutions, and it has attracted considerable attention in the study of higher-dimensional soliton dynamics. Its fractional-order generalization, obtained via the conformable fractional derivative, extends the model to capture memory and nonlocal effects not present in the classical integer-order formulation. The conformable time-fractional Zoomeron equation has been investigated using an extensive range of analytical methods, including the sub-equation method combined with

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

the generalized Kudryashov method [1], the auxiliary equation method [2], the $\exp(-\Phi(\varepsilon))$-expansion and novel exponential rational function technique [3], the modified trial equation method [4], bifurcation-based methods [5], and new mapping and extended auxiliary equation approaches, among others [6,7]. However, to the best of our knowledge, the extended hyperbolic function method [8] has not previously been applied to this equation.mMotivated by this gap, the present work applies the extended hyperbolic function method – using both its Type-1 and Type-2 auxiliary equation families – to derive new exact traveling wave solutions of the conformable time-fractional Zoomeron equation. The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 reviews the conformable fractional derivative and its relevant properties; Section 3 describes the extended hyperbolic function method; Section 4 applies the method to the governing equation and derives explicit solutions; Section 5 presents the results and discussion; and Section 6 concludes the study.

2. CONFORMABLE FRACTIONAL DERIVATIVE

The conformable fractional derivative, introduced by Khalil et al. [9], provides a fractional-order differential operator that retains many of the familiar properties of classical calculus, making it particularly well suited to the traveling wave reduction of fractional PDEs.

Definition. For a function $f:[0,\infty)\to \mathrm{R}$ and $0<\alpha\le 1$, the conformable fractional derivative of f of order α is defined as

$$D_t^{\alpha} f(t)=\lim_{h\to 0}\frac{f(t+ht^{1-\alpha})-f(t)}{h}. \tag{2}$$

Properties. For $\alpha\in(0,1]$ and differentiable functions f,g, the conformable derivative satisfies:

$$D_t^{\alpha}(af+bg)=aD_t^{\alpha}f+bD_t^{\alpha}g,\qquad a,b\in \mathrm{R}, \tag{3}$$

$$D_t^{\alpha}(t^{p})=pt^{p-\alpha},\qquad p\in \mathrm{R}, \tag{4}$$

$$D_t^{\alpha}(f\cdot g)=fD_t^{\alpha}g+gD_t^{\alpha}f, \tag{5}$$

$$D_t^{\alpha}f(t)=t^{1-\alpha}\frac{df}{dt},\qquad \text{whenever f(t) is differentiable.} \tag{6}$$

A property of particular importance for the traveling wave reduction used in Section 4 follows directly from Eq. (3):

$$D_t^{\alpha}\left(\frac{t^{\alpha}}{\alpha}\right)=1. \tag{7}$$

This identity allows a fractional complex transformation of the form $\xi=\cdots-\mu\omega\frac{t^{\alpha}}{\alpha}$ to reduce a conformable time-fractional PDE to an ordinary differential equation in exactly the same way that the classical transformation $\xi=\cdots-\mu\omega t$ reduces the corresponding integer-order.

3.EXTENDED HYPERBOLIC FUNCTION METHOD

In this section, the extended hyperbolic function method (EHFM) [3] is described in detail. Consider a nonlinear evolution equation that can be reduced, via a suitable traveling wave transformation, to a nonlinear ordinary differential equation in the single variable ξ.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

According to EHFM, the solution of the reduced ODE is sought in the form

$$f(\xi) = \sum_{i=0}^{M} A_i Z(\xi)^i, \qquad A_M \neq 0, \tag{8}$$

where $Z(\xi)$ is a real-valued function and M is the balancing number, determined by the homogeneous balancing rule between the highest-order derivative term and the highest-order nonlinear term in the reduced ordinary differential equation. If the reduced ODE contains a highest-order derivative term and a highest-degree nonlinear term given as following formula:

$$\left(f^p \frac{d^q f}{d\xi^q} \right)^s = (p+s)M + sq \qquad \left(\frac{d^r f}{d\xi^r} \right) = M + r, \tag{9}$$

then, we have

$$(p+s)M + sq = M + r \quad \Rightarrow \quad M = \frac{r - sq}{p + s - 1}. \tag{10}$$

The function $Z(\xi)$ satisfies one of the two following types of ordinary differential equations:

Type 1:…….. (11)	**Type 2:**……..(12)
$(Z'(\xi))^2 = lZ^2(\xi) + mZ^4(\xi), \qquad l, m \in \mathrm{R}.$	$Z'(\xi) = l + mZ^2(\xi), \qquad l, m \in \mathrm{R}.$
Case1: $l > 0, m > 0: \quad Z_1(\xi) = -\sqrt{\frac{l}{m}}\,\mathrm{csch}(\sqrt{l}\,\xi).$	Case1: $lm > 0: \quad Z_8(\xi) = \mathrm{sgn}(l)\sqrt{\frac{l}{m}}\tan(\sqrt{lm}\,\xi).$
Case2: $l < 0, m > 0: \quad Z_2(\xi) = \sqrt{\frac{-l}{m}}\sec(\sqrt{-l}\,\xi).$	Case2: $lm > 0: \quad Z_9(\xi) = -\mathrm{sgn}(l)\sqrt{\frac{l}{m}}\cot(\sqrt{lm}\,\xi).$
Case3: $l > 0, m < 0: \quad Z_3(\xi) = \sqrt{\frac{l}{-m}}\,\mathrm{sech}(\sqrt{l}\,\xi).$	Case3: $lm < 0: \quad Z_{10}(\xi) = \mathrm{sgn}(l)\sqrt{\frac{-l}{m}}\tanh(\sqrt{-lm}\,\xi).$
Case4: $l < 0, m > 0: \quad Z_4(\xi) = \sqrt{\frac{-l}{m}}\csc(\sqrt{-l}\,\xi).$	Case4: $lm < 0: \quad Z_{11}(\xi) = \mathrm{sgn}(l)\sqrt{\frac{-l}{m}}\coth(\sqrt{-lm}\,\xi).$
Case5: $l < 0, m > 0: \quad Z_5(\xi) = \cos(\sqrt{-l}\,\xi) + i\sin(\sqrt{-l}\,\xi).$	Case5: $l = 0, m > 0: \quad Z_{12}(\xi) = -\frac{1}{m\xi}.$
Case6: $l = 0, m > 0: \quad Z_6(\xi) = \frac{1}{\sqrt{m}\,\xi}.$	Case6: $l < 0, m = 0: \quad Z_{13}(\xi) = l\xi.$
Case7: $l = 0, m < 0: \quad Z_7(\xi) = \frac{i}{\sqrt{-m}\,\xi}.$	

4.APPLICATION OF EHFM TO THE TIME-FRACTIONAL ZOOMERON EQUATION

4.1. Governing Equation and Reduction

Recall $(2+1)$-dimensional conformable time-fractional Zoomeron equation is given by

$$\frac{\partial^{2\alpha} u}{\partial t^{2\alpha}}\left[\frac{u_{xy}}{u}\right] - \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[\frac{u_{xy}}{u}\right] + 2\frac{\partial^{\alpha} u}{\partial t^{\alpha}}[u^2]_x = 0, \qquad 0 < \alpha \leq 1, \tag{13}$$

which reduces to the classical $(2+1)$-dimensional Zoomeron equation when $\alpha = 1$. The fractional complex traveling wave transformation

$$u(x, y, t) = U(\xi), \qquad \xi = \mu(x + cy) - \mu\omega\frac{t^{\alpha}}{\alpha}, \tag{14}$$

together with the conformable derivative property $D_t^{\alpha}(t^{\alpha}/\alpha) = 1$ (Eq. 5), reduces Eq. (10) to the nonlinear ordinary differential equation

$$\mu^2 c(\omega^2 - 1)U'' - 2\omega U + 2\omega U^3 = 0. \tag{15}$$

4.2.Balancing and Ansatz

Applying the balancing rule (15) between the highest-order derivative term U'' and the highest-order nonlinear term U^3 gives $M = 2/(3-1) = 1$. The solution is therefore sought in the form

$$U(\xi) = A_0 + A_1 Z(\xi). \tag{16}$$

4.2.1.Type 1

Substituting Eq. (16), together with the Type-1 auxiliary relation $(Z')^2 = lZ^2 + mZ^4$, into Eq. (15), collecting the resulting expression according to powers of $Z(\xi)$, and equating each coefficient to zero yields the algebraic system

$$\begin{aligned} c_0 &: \quad 2A_0\omega(A_0^2 - 1) = 0, \\ c_1 &: \quad A_1(6A_0^2\omega + cl\mu^2\omega^2 - cl\mu^2 - 2\omega) = 0, \\ c_2 &: \quad 6A_0A_1^2\omega = 0, \\ c_3 &: \quad 2A_1(A_1^2\omega + cm\mu^2\omega^2 - cm\mu^2) = 0. \end{aligned} \tag{17}$$

Solving this system for the non-trivial branch $A_0 = 0$ gives

$$A_0 = 0, \qquad A_1 = -\frac{i\sqrt{2}\sqrt{m}}{\sqrt{l}}, \qquad \mu = \frac{\sqrt{2}\sqrt{\omega}}{\sqrt{cl(\omega^2 - 1)}}. \tag{18}$$

Substituting Eq. (16) into the Type-1 cases yields the following explicit solutions. In every case the parameters l, m cancel completely from the final coefficient, leaving a solution independent of the auxiliary parameters:

Case 1 ($l > 0, m > 0$, singular soliton):

$$u_1(x,y,t) = i\sqrt{2}\,\operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}\sqrt{\omega}(\alpha(x+cy) - \omega t^{\alpha})}{\alpha\sqrt{c(\omega^2 - 1)}}\right). \tag{19}$$

Case 2 ($l < 0, m > 0$, periodic-singular):

$$u_2(x,y,t) = -\sqrt{2}\,\sec\left(\frac{\sqrt{2}\sqrt{\omega}(\alpha(x+cy) - \omega t^{\alpha})}{\alpha\sqrt{c}\sqrt{1-\omega^2}}\right). \tag{20}$$

Case 3 ($l > 0, m < 0$, bright soliton):

$$u_3(x,y,t) = \sqrt{2}\,\operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{2}\sqrt{\omega}(\alpha(x+cy) - \omega t^{\alpha})}{\alpha\sqrt{c}\sqrt{\omega^2 - 1}}\right). \tag{21}$$

Case 4 ($l < 0, m > 0$, periodic-singular):

$$u_4(x,y,t) = -\sqrt{2}\,\csc\left(\frac{\sqrt{2}\sqrt{\omega}(\alpha(x+cy) - \omega t^{\alpha})}{\alpha\sqrt{c}\sqrt{1-\omega^2}}\right). \tag{22}$$

Case 5 ($l < 0, m > 0$, complex/periodic):

$$u_5(x,y,t) = -i\sqrt{2}\sqrt{m}\exp\left(\frac{i\sqrt{2}\sqrt{\omega}(\alpha(x+cy) - \omega t^{\alpha})}{\alpha\sqrt{cl(\omega^2 - 1)}}\right)/\sqrt{l}. \tag{23}$$

Remark (Cases 6–7). At $l = 0$, resolving the algebraic system (17) directly shows that every branch forces $A_1 = 0$, leaving only the trivial constant solutions $U = 0, \pm 1$. Cases 6 and 7 therefore yield no non-trivial traveling wave solution for this equation.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

4.2.2.Type 2

Substituting Eq. (16), together with the Type-2 auxiliary relation $Z' = l + mZ^2$, into Eq. (15), collecting the resulting expression according to powers of $Z(\xi)$, and equating each coefficient to zero yields the algebraic system

$$\begin{aligned} c_0 &: \ 2A_0\omega(A_0^2 - 1) = 0, \\ c_1 &: \ 2A_1(3A_0^2\omega + clm\mu^2\omega^2 - clm\mu^2 - \omega) = 0, \\ c_2 &: \ 6A_0A_1^2\omega = 0, \\ c_3 &: \ 2A_1(A_1^2\omega + cm^2\mu^2\omega^2 - cm^2\mu^2) = 0. \end{aligned} \tag{24}$$

Solving this system for the non-trivial branch $A_0 = 0$ gives

$$A_0 = 0, \qquad A_1 = \frac{i\sqrt{m}}{\sqrt{l}}, \qquad \mu = \frac{\sqrt{\omega}}{\sqrt{clm(\omega^2 - 1)}}. \tag{25}$$

As with Type 1, substituting Eq. (24) into the Type-2 cases shows that l, m cancel completely from every coefficient; remarkably, the resulting coefficient reduces in every non-degenerate case to the bare imaginary unit $\pm i$:

Case 1 ($lm > 0$, periodic):

$$u_8(x, y, t) = i\tan\left(\frac{\sqrt{\omega}(\alpha(x + cy) - \omega t^\alpha)}{\alpha\sqrt{c}\sqrt{\omega^2 - 1}}\right). \tag{26}$$

Case 2 ($lm > 0$, periodic):

$$u_9(x, y, t) = -i\cot\left(\frac{\sqrt{\omega}(\alpha(x + cy) - \omega t^\alpha)}{\alpha\sqrt{c}\sqrt{\omega^2 - 1}}\right). \tag{27}$$

Case 3 ($lm < 0$, kink):

$$u_{10}(x, y, t) = i\tanh\left(\frac{\sqrt{\omega}(\alpha(x + cy) - \omega t^\alpha)}{\alpha\sqrt{c}\sqrt{\omega^2 - 1}}\right). \tag{28}$$

Case 4 ($lm < 0$, singular):

$$u_{11}(x, y, t) = i\coth\left(\frac{\sqrt{\omega}(\alpha(x + cy) - \omega t^\alpha)}{\alpha\sqrt{c}\sqrt{\omega^2 - 1}}\right). \tag{29}$$

Remark (Cases 5–6). As with Type-1 Cases 6–7, resolving the algebraic system (24) directly at $l = 0$ (Case 5) and at $m = 0$ (Case 6) shows that both degenerate cases force $A_1 = 0$, yielding only the trivial constant solutions.

5. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the seven solutions selected for detailed presentation – u_1, u_2, u_3, u_5 from Type 1 and u_8, u_9, u_{10} from Type 2 – are examined graphically under representative parameter values. Since the fractional order t^α vanishes identically at $t = 0$ regardless of α, all fractional-order comparison plots use $t = 1$ rather than $t = 0$ as the reference slice; the coordinate y is held fixed at $y = 0$ throughout, without loss of generality, since y enters the solutions only through the combination $x + cy$.

5.1. u_1 – Singular Soliton (Case 1, Type 1)

With $c = 1, \omega = 2, \alpha = 1$,

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

$$u_1(x,t) = i\sqrt{2}\,\mathrm{csch}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}(x-2t)\right). \tag{30}$$

This solution is purely imaginary: since the argument of csch remains real for all real x,t under the stated parameters, $\mathrm{Re}(u_1) \equiv 0$ identically, confirmed both algebraically and by direct 3D evaluation (Fig. (1)). At $\alpha = 0.5$ the pole location shifts to $x = \omega t^{\alpha} / \alpha$, illustrating how the fractional order reshapes the wave's spatial position (Fig. (2)).

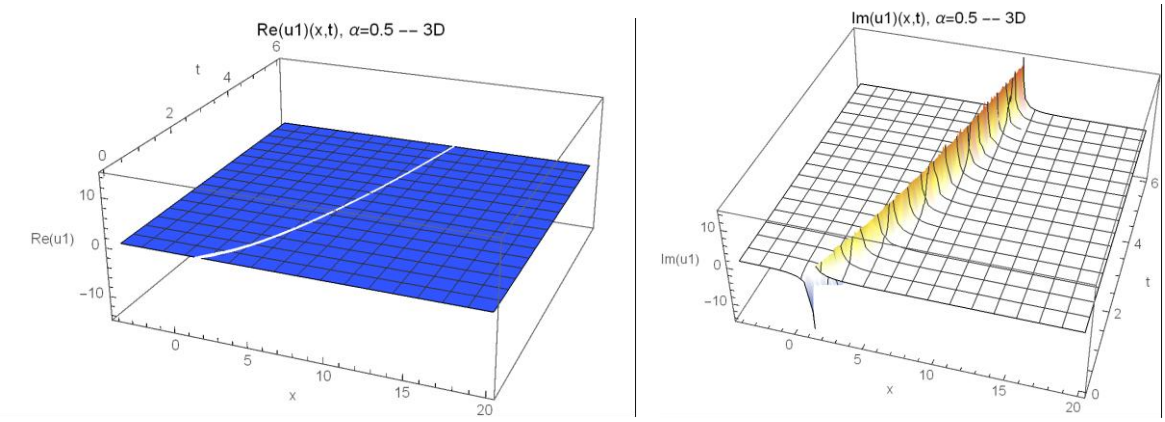


Figure 1: u_1 **: (left)** $\mathrm{Re}(u_1)$**, identically zero; (right)** $\mathrm{Im}(u_1)$**, singular soliton,** $\alpha = 0.5$**.**

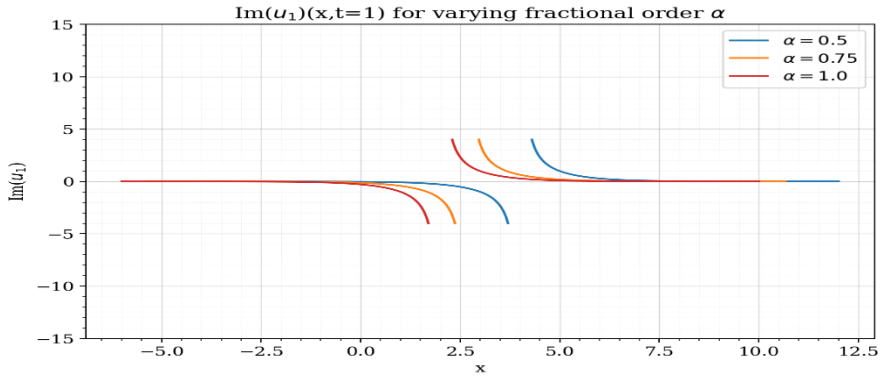


Figure 2: $\mathrm{Im}(u_1)(x, t=1)$ **for** $\alpha = 0.5, 0.75, 1.0$**, showing the pole shifting with fractional order.**

5.2. u_2 – Periodic-Singular (Case 2, Type 1)

With $c = 1, \omega = 0.5, \alpha = 1$,

$$u_2(x,t) = -\sqrt{2}\sec\left(\frac{2}{\sqrt{3}}(x-0.5t)\right), \tag{31}$$

a fully real, periodic-singular solution with poles repeating wherever $\cos(\cdot) = 0$ (Fig. (4)). The fractional-order comparison (Fig. (5)) shows the pole spacing and phase shifting systematically as α decreases from 1 toward 0.5.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

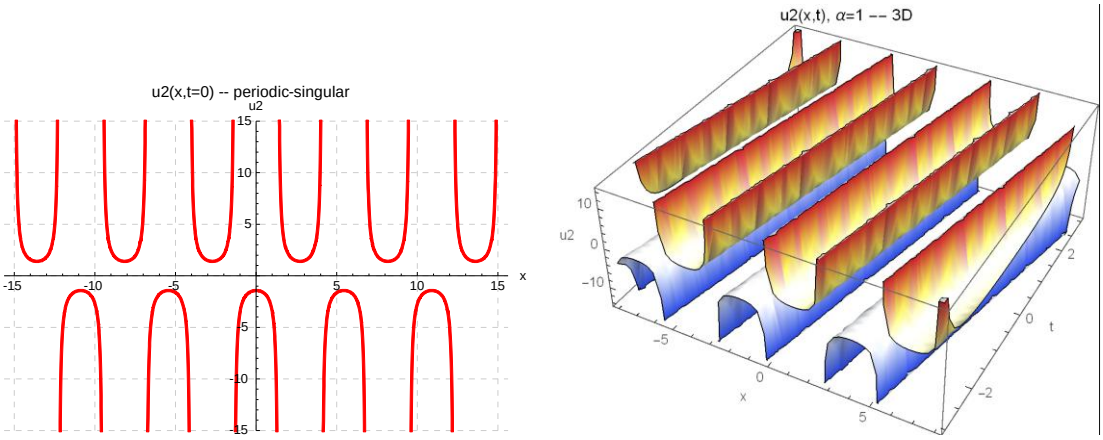


Figure 4: $u_2(x,t)$**,** $\alpha = 1$**: (a) 2D profile at** $t = 0$**; (b) 3D surface.**

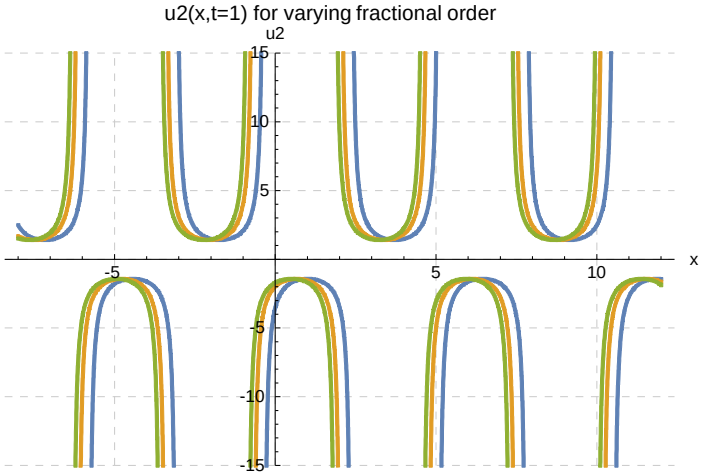


Figure 5: $u_2(x,t=1)$ **for varying fractional order** α**.**

5.3. u_3 – Bright Soliton (Case 3, Type 1)

With $c = 1, \omega = 2, \alpha = 1$,

$$u_3(x,t) = \sqrt{2}\,\mathrm{sech}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}(x-2t)\right), \tag{32}$$

a genuine bright soliton: real, bounded, and localized, with no singularities (Fig. (6)). The fractional-order comparison (Fig. (7)) shows how α reshapes the pulse width and peak location while preserving its bright, localized character.

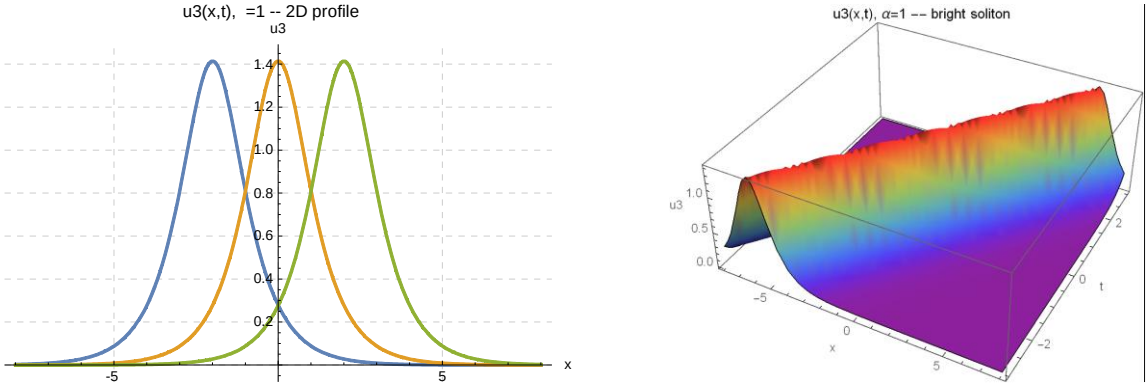


Figure 6: $u_3(x,t)$**,** $\alpha = 1$**: (a) 2D profile at several** t**; (b) 3D surface.**

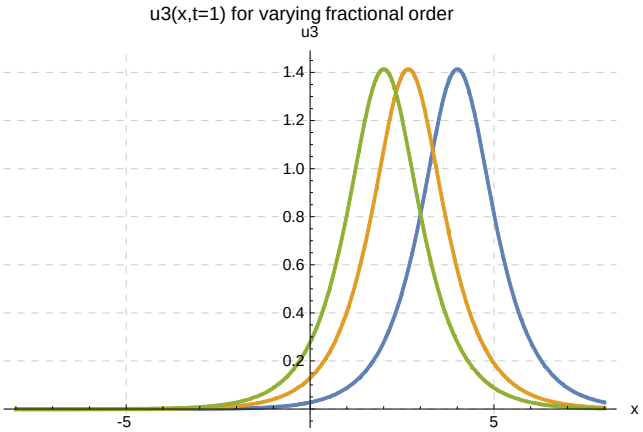


Figure 7: $u_3(x,t=1)$ **for varying fractional order** α **.**

5.4 u_5 – Complex Periodic Wave (Case 5, Type 1)

Unlike Cases 1–4, the auxiliary parameters l,m do not cancel in u_5, since Z_5 carries no $\sqrt{l/m}$ -type prefactor to cancel against A_1; with $l=-0.5, m=0.5, c=1, \omega=0.5, \alpha=1$, the solution simplifies to a clean complex exponential,

$$u_5(x,t) = -\sqrt{2}\exp\left(i\frac{2}{\sqrt{3}}(x-0.5t)\right), \tag{33}$$

a smooth, bounded, oscillatory wave with no singularities in either its real or imaginary part (Fig. (8)). The fractional-order comparison of $\mathrm{Re}(u_5)$ is shown in Fig. (9).

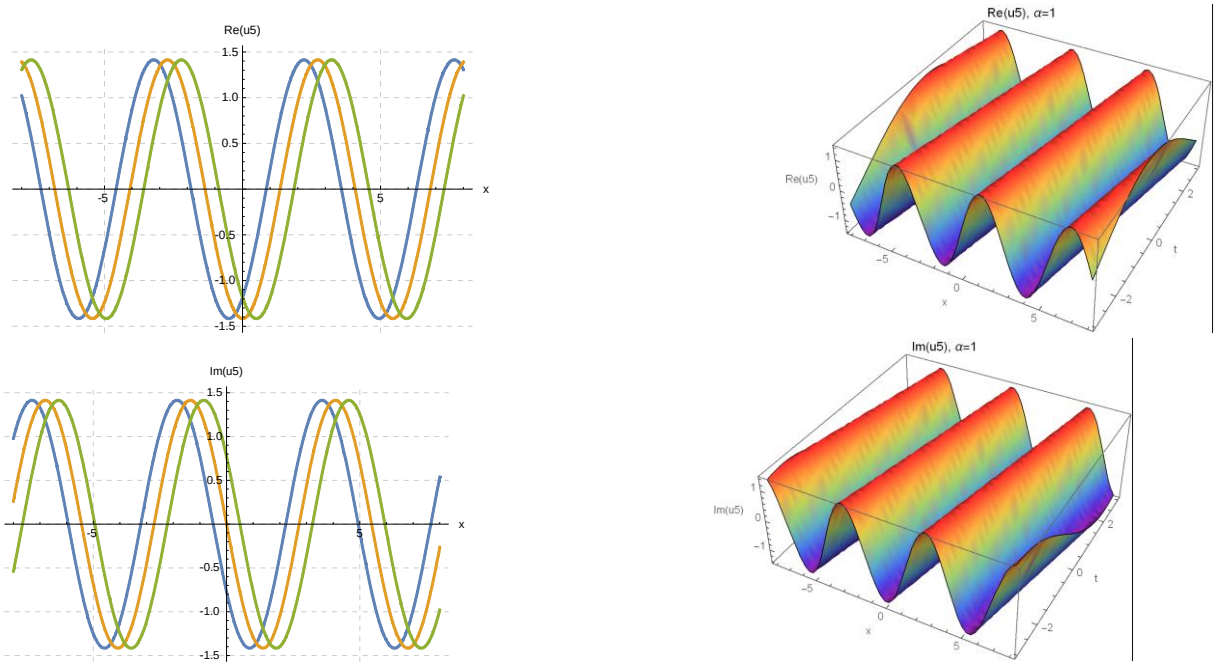


Figure 8: u_5**,** $\alpha=1$**: (a)–(b)** $\mathrm{Re}(u_5)$**, 2D and 3D; (c)–(d)** $\mathrm{Im}(u_5)$**, 2D and 3D**

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

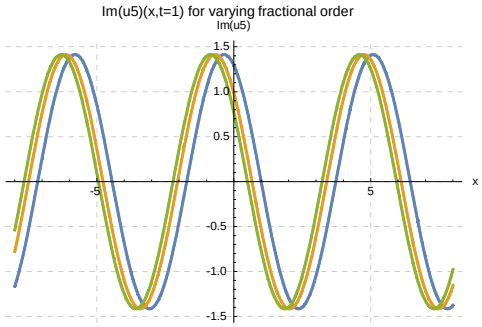


Figure 9: $\mathrm{Re}(u_5)(x,t=1)$ **for varying fractional order** α **.**

5.5 u_8, u_9, u_{10} – Type 2 Kink and Singular-Kink Pair

At $c=1, \omega=0.5, \alpha=1$, all Type-2 coefficients reduce to the bare imaginary unit, and $\mathrm{Im}(u_8) = \mathrm{Im}(u_9) = \mathrm{Im}(u_{10}) \equiv 0$, leaving purely real solutions:

$$u_8(x,t) = \tanh\big(0.816(x-0.5t)\big), \tag{34}$$

$$u_9(x,t) = \coth\big(0.816(x-0.5t)\big), \tag{35}$$

$$u_{10}(x,t) = \tanh\big(0.816(x-0.5t)\big). \tag{36}$$

This coincidence follows from the identity $\tan(iy) = i\tanh(y)$: at the only parameter regime where the Case-1/2 (tan/cot) coefficients are real ($\omega^2 < 1$), the argument of tan and cot is itself purely imaginary, and the functions analytically continue into tanh - and coth -shaped real behavior. Consequently u_8 and u_{10} – formally distinct solutions arising from different auxiliary cases (Case 1 vs. Case 3) – coincide as the same smooth kink profile at real parameter values (Fig. 10a,c), while u_9 exhibits the complementary coth-shaped singular kink (Fig. (10)(b)).

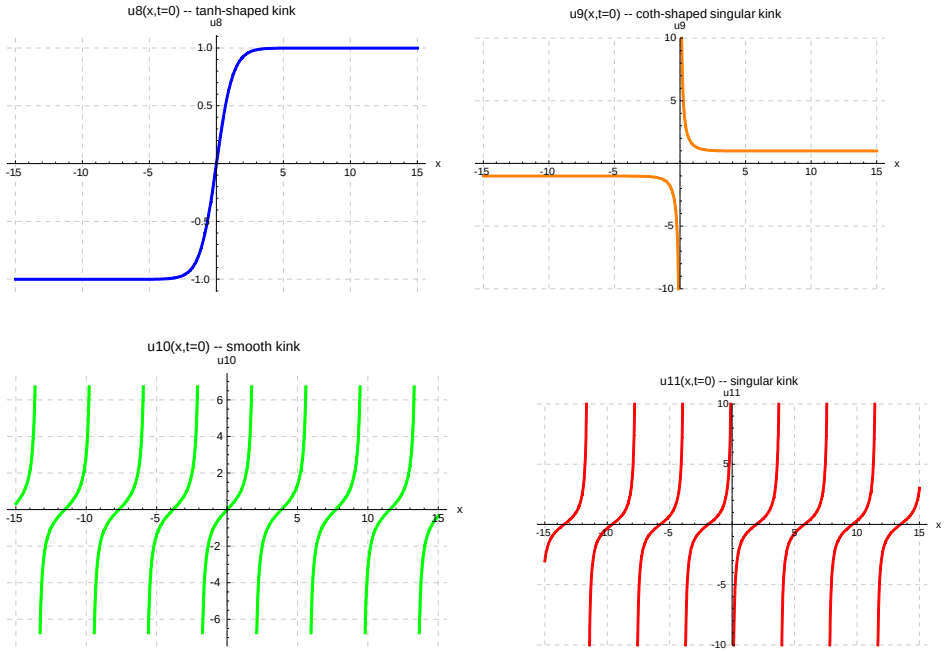


Figure 10: Type-2 real solutions at $\omega = 0.5$ **: (a)** u_8**, (b)** u_9**, (c)** u_{10}**, (d)** u_{11} **(not selected for detailed discussion, shown for comparison). Panels (a) and (c) coincide; panels (b) and (d) coincide.**

The obtained solutions reveal several structural features that extend beyond the individual solution families. First, in all Type-1 cases except Case 5, as well as in every Type-2 case, the auxiliary parameters l and m are completely eliminated from the final solution coefficients. Second, all degenerate auxiliary parameter configurations ($l = 0$ or $m = 0$ for both solution types) reduce to the trivial constant solutions $U = 0, \pm 1$, whereas every bounded auxiliary-function family produces genuine non-trivial traveling-wave solutions. Finally, although the trigonometric ($\tan$, $\cot$; Type-2, Cases 1–2) and hyperbolic ($\tanh$, $\coth$; Type-2, Cases 3–4) families appear as distinct solution classes, they become identical in form under the only parameter regime for which both are real-valued, owing to the identity $\tan(iy) = i\tanh(y)$. These observations highlight the intrinsic structural consistency of the proposed solution framework and reveal common algebraic properties shared across the different auxiliary-function families.

6. CONCLUSION

In this study, the extended hyperbolic function method was applied for the first time to the $(2+1)$-dimensional conformable time-fractional Zoomeron equation. Using the fractional complex traveling wave transformation together with the conformable derivative property $D_t^{\alpha}(t^{\alpha}/\alpha) = 1$, the governing fractional PDE was reduced to the same nonlinear ordinary differential equation as its classical integer-order counterpart, allowing the full apparatus of EHFM – both Type-1 and Type-2 auxiliary equations – to be applied directly. Several structural findings distinguish this study beyond the solution catalogue itself: the systematic cancellation of the auxiliary parameters l, m in nearly every case; the identification of u_5 as a genuine exception to this cancellation; the explicit reality conditions linking the sign of l to the required range of ω; and the previously unreported coincidence between the Type-2 tan/cot and tanh/coth solution families at real parameter values. These findings, together with the graphical illustration of the fractional order's effect on wave structure and pole location, demonstrate that EHFM remains an effective and computationally direct tool for constructing exact solutions of higher-dimensional conformable fractional evolution equations, complementing the wide range of other analytical techniques previously applied to this model.

REFERENCES

[1] Aksoy, E., Cevikel, A. C. ve Bekir, A., Soliton Solutions of $(2+1)$o-Dimensional Time-Fractional Zoomeron Equation, *Optik*, **127**(17), 6933–6942, 2016.

[2] Akbulut, A. ve Kaplan, M., Auxiliary Equation Method for Time-Fractional Differential Equations with Conformable Derivative, *Computers & Mathematics with Applications*, **75**(3), 876–882, 2018.

[3] Kumar, D. ve Kaplan, M., New Analytical Solutions of $(2+1)$-Dimensional Conformable Time Fractional Zoomeron Equation via Two Distinct Techniques, *Chinese Journal of Physics*, **53**, 2173–2185, 2018.

[4] Odabaşi, M., Traveling Wave Solutions of Conformable Time Fractional Zakharov–Kuznetsov and Zoomeron Equations, *Chinese Journal of Physics*, **64**, 194–202, 2020.

[5] Li, Z. ve Han, T., Bifurcation and Exact Solutions for the $(2+1)$-Dimensional Conformable Time-Fractional Zoomeron Equation, *Advances in Difference Equations*, **2020**, 656, 2020.

[6] Calogero, F. ve Degasperis, A., Nonlinear Evolution Equations Solvable by the Inverse Spectral Transform.–I, *Il Nuovo Cimento B*, **32**, 201–242, 1976.

[7] Eslami, M., Asghari, Y., Matinfar, M. ve Rezazadeh, H., Dynamical Exploration of Novel Soliton Solutions of the Modified Benjamin–Bona–Mahoni and Eckhaus Equations Based on the Function Method, *Alexandria Engineering Journal*, **123**, 46–54, 2025.

[8] Hong, Z., Ji-Guang, H., Wei-Tao, W. ve Hong-Yong, A., Applications of Extended Hyperbolic Function Method for Quintic Discrete Nonlinear Schrödinger Equation, *Communications in Theoretical Physics*, **47**, 474, 2007.

[9] Khalil, R., Al Horani, M., Yousef, A. ve Sababheh, M., A New Definition of Fractional Derivative, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **264**, 65–70, 2014.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

AN ADI FINITE DIFFERENCE SCHEME FOR THE (2+1)-DIMENSIONAL HUXLEY EQUATION

Prof. Dr. Berat KARAAGAC
Tarsus University,
beratkaraagac@tarsus.edu.tr - 0000-0002-6020-3243

ABSTRACT

This study presents an alternating direction implicit (ADI) finite difference scheme for the numerical solution of the $(2+1)$-dimensional Huxley equation, a nonlinear reaction–diffusion model characterized by the cubic reaction term $u^2(1-u)$. The method employs the Peaceman–Rachford operator splitting technique to decouple the multidimensional problem into two one-dimensional subproblems, while the nonlinear reaction term is handled through a frozen-coefficient linearization that preserves the tridiagonal structure of the resulting linear systems at each half-step. A von Neumann stability analysis demonstrates that the diffusion component of the ADI scheme is unconditionally stable, whereas the linearized reaction term imposes only a mild time-step restriction independent of the spatial discretization. Numerical performance is evaluated using the L_2 and L_∞ error norms. Numerical experiment confirm the accuracy, stability, and computational efficiency of the proposed method.
Anahtar Kelimeler : Huxley equation, ADI finite difference method, Stability.

1.INTRODUCTION

The Huxley equation,

$$u_t = u_{xx} + u_{yy} + u^2(1-u), \tag{1}$$

belongs to the broader family of reaction-diffusion equations with a cubic source term that arise in nerve conduction, combustion, and population genetics. Broadbridge et al. [1] derive the equation directly from Fisher's gene-transport assumptions for a sexually reproducing species, showing that the frequency of an advantageous mutant gene obeys precisely this reaction-diffusion law, with the double root at $u = 0$ reflecting the slow initial spread of a rare mutant allele. The same cubic structure – and the same qualitative picture of a front connecting two stable states – appears throughout the nerve-conduction and excitable-media models associated with Hodgkin, Huxley, and Nagumo. Most of the analytical literature on this cubic reaction term addresses it within the broader Burgers-Huxley equation, which adds a convective term $\alpha u u_x$ to Eq. (1). Wang, Zhu, and Lu [2] obtained solitary wave solutions of this generalized equation using a homogeneous balance approach, and Efimova and Kudryashov [3] later derived a broader family of exact solutions via power and power-logarithmic expansions. From the numerical aspect, existing schemes target the Burgers-Huxley equation almost exclusively, and until recently no numerical study addressed the Huxley equation (1). Zhou, Wang, and Yin [4] have obtained a multi-domain space-time spectral collocation scheme

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

for the one-dimensional problem, establishing convergence through a Petrov–Galerkin framework. However, A $(2+1)$-dimensional numerical treatment does not appear to exist, and to the authors' knowledge no ADI finite difference scheme has previously been applied to Eq. (1) in two spatial dimensions. We address this gap using the alternating direction implicit method of Peaceman and Rachford [5], later generalized by Douglas and Gunn [6], which reduces a multidimensional implicit time step to a sequence of one-dimensional tridiagonal solves and is well suited to reaction-diffusion problems of the general form $u_t = u_{xx} + u_{yy} + f(u)$ [7]. The cubic reaction term in Eq. (1) is linearized by freezing its nonlinear coefficient at each half-step, preserving the tridiagonal structure of the resulting system. An exact traveling front solution connecting the equation's two rest states is derived and used throughout to validate the scheme, and a von Neumann stability analysis establishes the conditions under which the resulting method is stable.

2. THE ALTERNATING DIRECTION IMPLICIT (ADI) METHOD

Fully implicit schemes for multidimensional parabolic problems couple all spatial directions simultaneously, leading to large, computationally expensive systems as the grid is refined. The Alternating Direction Implicit (ADI) method avoids this by splitting the multidimensional problem into a sequence of one-dimensional implicit solves, each involving only one spatial direction, substantially reducing both computational cost and memory requirements. Consider a governing equation written in operator form,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \mathrm{L}_x u + \mathrm{L}_y u + f, \tag{2}$$

where L_x and L_y are the spatial operators in the x- and y-directions. Rather than treating $\mathrm{L}_x + \mathrm{L}_y$ implicitly as a single coupled operator, the ADI method advances each time step through two half-steps, treating one direction implicitly and the other explicitly, then reversing the roles:

$$\left(I - \frac{\Delta t}{2}\mathrm{L}_x\right)u^* = \left(I + \frac{\Delta t}{2}\mathrm{L}_y\right)u^n + \frac{\Delta t}{2} f^{n+\frac{1}{2}}, \tag{3}$$

$$\left(I - \frac{\Delta t}{2}\mathrm{L}_y\right)u^{n+1} = \left(I + \frac{\Delta t}{2}\mathrm{L}_x\right)u^* + \frac{\Delta t}{2} f^{n+\frac{1}{2}}. \tag{4}$$

Because each half-step involves only one spatial direction, the resulting coefficient matrices are one-dimensional in structure and can be solved directly and efficiently, in contrast to the fully coupled system that a single, unsplit implicit step would require. This general form treats the source term f explicitly, split evenly between the two half-steps. In the scheme developed in the following section, the reaction term is instead treated implicitly, through a frozen-coefficient linearization that folds it into the diagonal of each half-step's coefficient matrix rather than into an explicit source term; the general splitting principle above nonetheless underlies the method applied throughout.

3. APPLICATION OF THE METHOD

In this section, we are going to present application of ADI method to Huxley equation. Let the domain $[x_0, x_L]\times[y_0, y_M]$ be discretized with grid points $x_i = x_0 + i\Delta x$, $y_j = y_0 + j\Delta y$, and time levels $t^n = n\Delta t$, and write $u_{i,j}^n$ for the numerical approximation to $u(x_i, y_j, t^n)$. The mesh ratios

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

$$r_x = \frac{\Delta t}{2\Delta x^2}, \qquad r_y = \frac{\Delta t}{2\Delta y^2} \tag{5}$$

appear throughout the scheme below. The reaction term $u^2(1-u)$ can be factored as $c(u)u$, with

$$c(u) = u - u^2, \tag{6}$$

isolating the nonlinearity into a single coefficient that multiplies the still-unknown u. Rather than solving the resulting nonlinear system directly, c is evaluated at the most recently computed value at each half-step so that the reaction term enters each half-step linearly in the unknown. This keeps the coefficient matrix of each half-step tridiagonal, at the cost of a first-order (in time) treatment of the nonlinearity; the diffusion terms retain their full second-order accuracy. Following Peaceman and Rachford [3], the scheme advances each time step in two half-steps, alternating which coordinate direction is treated implicitly. In the first half-step, with x implicit and y explicit, the intermediate values $u^*_{i,j}$ solve, for each row $j = 1,\dots,N_y - 1$,

$$-r_x u^*_{i-1,j} + [1 + 2r_x - \tfrac{\Delta t}{2} c(u^n_{i,j})]u^*_{i,j} - r_x u^*_{i+1,j} = r_y u^n_{i,j-1} + (1-2r_y)u^n_{i,j} + r_y u^n_{i,j+1}. \tag{7}$$

In the second half-step, with the roles reversed, $u^{n+1}_{i,j}$ solves, for each column $i = 1,\dots,N_x - 1$,

$$-r_y u^{n+1}_{i,j-1} + [1 + 2r_y - \tfrac{\Delta t}{2} c(u^*_{i,j})]u^{n+1}_{i,j} - r_y u^{n+1}_{i,j+1} = r_x u^*_{i-1,j} + (1-2r_x)u^*_{i,j} + r_x u^*_{i+1,j}. \tag{8}$$

Both systems are tridiagonal in the unknown row or column and are solved directly, giving an overall per-time-step cost of $O(N_x N_y)$ rather than the cost of a single, fully two-dimensional implicit solve.

4. STABILITY ANALYSIS

The scheme's stability is examined via the von Neumann method. As the discrete Laplacian and the frozen reaction coefficient are both linear once $c(u)$ is treated as known, it suffices to track a single Fourier mode

$$u^n_{i,j} = \xi^n e^{i(\alpha i\Delta x + \beta j\Delta y)} \tag{9}$$

and determine the conditions under which $|\xi^{n+1}/\xi^n| \le 1$ for every wavenumber pair (α, β). Applying the central-difference operator to the mode above gives $\delta_x^2 u^n_{i,j} = -\lambda_x u^n_{i,j}$ with

$$\lambda_x = (4/\Delta x^2)\sin^2(\alpha\Delta x/2) \ge 0$$

and analogously for λ_y. Writing $p_x = (\Delta t/2)\lambda_x$, $p_y = (\Delta t/2)\lambda_y$, substitution into the two half-steps and elimination of the intermediate amplitude gives the full-step amplification factor

$$G = \frac{(1-p_x)(1-p_y)}{(1+p_x)(1+p_y)}. \tag{10}$$

Since $p_x, p_y \ge 0$ for every mesh spacing and wavenumber, the inequality $|1-p| \le 1+p$ ($p \ge 0$) applied to each factor gives $|G| \le 1$ unconditionally: the diffusion part of the scheme carries no restriction on Δt. Including the frozen reaction coefficient replaces p_x in the diagonal term of the first half-step with $p_{x'} = p_x - (\Delta t/2)c$, where $c = c(u) = u - u^2$ from Eq. (6). Since c is bounded above but can be positive, $p_{x'}$ is not guaranteed non-negative, and the corresponding amplification factor can exceed unity if $(\Delta t/2)c$ approaches 1. Requiring this not to occur gives

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

the condition $\Delta t < 2/c$, which must hold for the largest value c attains. Differentiating $c(u) = u - u^2$ gives $u^* = 1/2$, and

$$c_{\max} = c(u^*) = \frac{1}{4}. \tag{11}$$

Both half-steps share the same diagonal structure, so the stability condition for the full scheme is

$$\Delta t < \frac{2}{c_{\max}} = 8. \tag{12}$$

Notably, this bound is fixed rather than parameter-dependent, since the reaction coefficient $c(u) = u - u^2$ contains no free parameter to begin with.

5. NUMERICAL RESULTS

The performance of the proposed numerical scheme is demonstrated through a representative test problem solved using the ADI formulation developed in the previous section. The accuracy of the numerical solution is assessed by means of the discrete maximum and L_2 error norms, defined as

$$\mathrm{PEP}_\infty = \max_{i,j} |u_{i,j}^n - u_{\text{exact}}(x_i, y_j, t^n)|, \qquad \mathrm{PEP}_2 = \left(\Delta x \Delta y \sum_{i,j} (u_{i,j}^n - u_{\text{exact}}(x_i, y_j, t^n))^2 \right)^{1/2}. \tag{13}$$

To obtain exact solution for the test problem, a traveling front solution of the form $u(x,y,t) = U(\xi)$, $\xi = x + ry - mt$ is used and substituted into Eq. (1). Thus, a tanh-ansatz reduction give

$$u(x,y,t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\tanh(k\xi), \qquad k = \frac{\sqrt{2}}{4\sqrt{1+r^2}}, \qquad m = -\frac{\sqrt{1+r^2}}{\sqrt{2}}, \tag{14}$$

which connects the two rest states $u = 0$ and $u = 1$ as $\xi \to \mp\infty$. For test problem, the computational domain is taken as $\Omega = [-10,10] \times [-10,10]$, and the computations are carried out until the final simulation time using different spatial and temporal discretizations.

Table 1: L_2 and L_∞ error norms together with CPU execution times for different spatial meshes and time step sizes.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

To investigate the convergence behavior of the proposed ADI collocation scheme, both the spatial mesh size and the time step are refined simultaneously. The corresponding L_2 and L_∞ error norms together with the CPU execution times are reported in Table 1.

Table 1 demonstrates that the proposed numerical method produces highly accurate approximations for all mesh resolutions. For both time step sizes, the error norms decrease as the spatial grid is refined, confirming the convergence of the proposed scheme. It can also be observed that the error reduction becomes less pronounced on the finest meshes. This behavior indicates that the spatial discretization error becomes very small and the total error is then mainly influenced by the temporal approximation and accumulated rounding errors. Consequently, further spatial refinement beyond $N_x = N_y = 320$ yields only marginal improvements in accuracy while requiring substantially higher computational cost. A detailed comparison between the analytical and numerical solutions at several representative grid points is presented in Table 2. The numerical values agree remarkably well with the exact solution throughout the computational domain. The absolute errors remain between approximately 10^{-9} and 10^{-5}, with the largest discrepancies occurring near the transition region of the traveling wave, where the solution gradient is highest. Away from the wave front, where the solution approaches its equilibrium states, the absolute errors decrease to the order of $10^{-8}-10^{-9}$. These results confirm that the proposed ADI collocation method accurately captures both the steep wave front and the asymptotic behavior of the traveling-wave solution.

Table 2: Comparison of the exact and numerical solutions at selected grid points for $N_x = N_y = 640$ and $\Delta t = 0.00625$.

$N_x = N_y$	$\Delta t = 0.0125$			$\Delta t = 0.00625$		
	L_2	L_∞	CPU (s)	L_2	L_∞	CPU (s)
40	2.768009e-03	3.663796e-04	0.361	2.478479e-03	3.017329e-04	0.595
80	1.336700e-03	1.885893e-04	0.827	8.793955e-04	1.237541e-04	1.356
160	1.109558e-03	1.443041e-04	2.249	5.860652e-04	7.945936e-05	3.863
320	1.072084e-03	1.332719e-04	7.793	5.414094e-04	6.842662e-05	12.663
640	1.064189e-03	1.305177e-04	29.348	5.330180e-04	6.567228e-05	45.484

x	y	u_{exact}	$u_{\text{numerical}}$	$\lvert u_{\text{exact}} - u_{\text{numerical}} \rvert$
-9.000	-9.000	0.0003228016	0.0003228048	3.118538841550e-09

-6.000	-6.000	0.0055295729	0.0055296411	6.821095162746e-08
-3.000	-3.000	0.0873802604	0.0873813511	1.090642570215e-06
-1.000	-1.000	0.3896738693	0.3897016151	2.774584115378e-05
0.000	0.000	0.6178035456	0.6178615750	5.802935089849e-05
1.000	1.000	0.8097957096	0.8098588814	6.317181299331e-05
3.000	3.000	0.9659752461	0.9659968861	2.164000654170e-05
6.000	6.000	0.9979586486	0.9979601960	1.547451285888e-06
9.000	9.000	0.9998812237	0.9998812878	6.415377895586e-08

Figures 1–3 provide a graphical assessment of the performance of the proposed numerical method. Figure 1 compares the exact and numerical solutions. The two curves are almost completely superimposed, indicating that the proposed ADI collocation scheme accurately reproduces the analytical traveling-wave solution even on the relatively coarse mesh $N_x = N_y = 40$. The excellent agreement between the two profiles is consistent with the small error norms reported in Table 1.

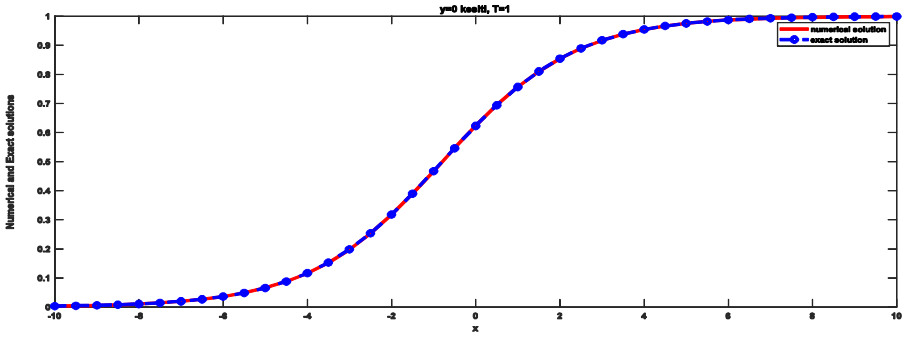


Figure 1: Comparison between the exact and numerical solutions for $N_x = N_y = 40$ and $\Delta t = 0.003125$.

Figure 2 illustrates the spatial distribution of the absolute error at the final simulation time. It is observed that the largest errors are confined to the narrow transition region of the traveling wave, where the solution exhibits its steepest gradient, while the error remains negligible over the remaining part of the computational domain. This localized error pattern demonstrates that the proposed method accurately resolves the wave front without introducing spurious oscillations.

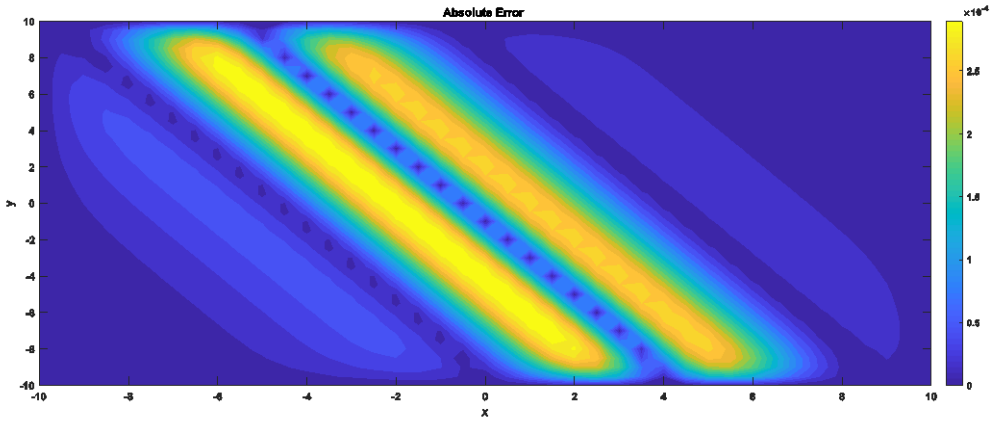


Figure 2: Distribution of the absolute error at the final time $T = 1$ for $N_x = N_y = 40$ and $\Delta t = 0.003125$.

The three-dimensional numerical solution is presented in Figure 3. The computed surface clearly captures the smooth sigmoidal structure of the traveling front connecting the two equilibrium states. These graphical results demonstrate that the proposed scheme provides accurate and reliable approximations for the two-dimensional Huxley equation.

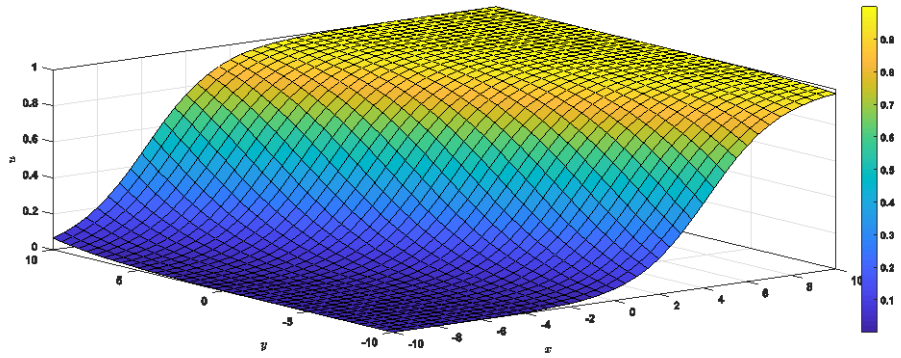


Figure 3: Three-dimensional view of the numerical solution for $N_x = N_y = 40$ and $\Delta t = 0.003125$.

6. CONCLUSION

In this study, an alternating direction implicit finite difference scheme has been proposed for the numerical solution of the $(2+1)$-dimensional Huxley equation. The combination of the Peaceman–Rachford splitting strategy and the frozen-coefficient linearization leads to an efficient solution procedure involving only tridiagonal linear systems at each half time step. Furthermore, the stability analysis provides theoretical support for the robustness of the proposed algorithm. The numerical results demonstrate that the proposed method produces accurate approximations of the traveling-wave solution. The computed L_2 and L_∞ error norms decrease with mesh refinement, while the numerical and analytical solutions remain in excellent agreement. The pointwise comparisons and graphical results further show that the largest errors are confined to the narrow transition region of the wave front, whereas the remaining computational domain is resolved with high accuracy. Overall, the proposed ADI scheme provides an accurate, stable, and computationally efficient numerical framework for solving two-dimensional nonlinear reaction–diffusion equations.

REFERENCES

[1] Broadbridge, P., Bradshaw, B. H., Fulford, G. R. ve Aldis, G. K., Huxley and Fisher Equations for Gene Propagation: An Exact Solution, *ANZIAM Journal*, **44**(1), 11–20, 2002

[2] Wang, X. Y., Zhu, Z. S. ve Lu, Y. K., Solitary Wave Solutions of the Generalised Burgers–Huxley Equation, *Journal of Physics A: Mathematical and General*, **23**, 271–274, 1990.

[3] Efimova, O. Y. ve Kudryashov, N. A., Exact Solutions of the Burgers–Huxley Equation, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, **68**(3), 413–420, 2004.

[4] Zhou, Y., Wang, T. ve Yin, R., A Multi-Domain Space-Time Spectral Collocation Method for the Huxley Equation, *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, **42**(2), e70075, 2026.
[5] Peaceman, D. W. ve Rachford, H. H., The Numerical Solution of Parabolic and Elliptic Differential Equations, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **3**, 28–41, 1955.
[6] Douglas, J. ve Gunn, J. E., A General Formulation of Alternating Direction Methods, *Numerische Mathematik*, **6**, 428–453, 1964.
[7] Craster, R. V. ve Sassi, R., Spectral Algorithms for Reaction–Diffusion Equations, *arXiv preprint*, arXiv:1810.07431, 2018.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

DEVELOPMENT AND SPATIAL ANALYSIS OF A SOCIOECONOMİC VULNERABILITY INDEX FOR TURKISH PROVİINCES USİNG PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

Dr. Cenk İÇÖZ
Eskişehir Teknik Üniversitesi/İstatistik Bölümü
cicoz@eskisehir.edu.tr - 0000-0002-0219-1088

ABSTRACT

Socioeconomic vulnerability is a multidimensional concept that cannot be suitable and adequately represented by a single indicator. Composite indices provide an effective framework for integrating multiple socioeconomic characteristics into a unified measure that supports regional comparison and spatial decision-making. This study aims to develop a Socioeconomic Vulnerability Index (SEVI) for the 81 provinces of Türkiye using Principal Component Analysis (PCA) and to investigate its spatial distribution through spatial autocorrelation analysis. Four socioeconomic indicators reflecting different dimensions of regional vulnerability were incorporated into the index, namely unemployment rate, gross domestic product (GDP) per capita, literacy rate, and dependency ratio. All variables were standardized to eliminate differences in measurement scales during the data pre-processing stage. Then, PCA was used to derive the first principal component, which was retained as the composite SEVI. The resulting index was mapped to examine the diversities of geographical distribution of socioeconomic vulnerability across Türkiye. Global Moran's I was calculated to evaluate the presence of overall spatial autocorrelation, while Local Indicators of Spatial Association (LISA) were employed to identify statistically significant local clusters and spatial outliers. The proposed framework enables both the quantification and visualization of regional socioeconomic disparities and provides an interpretable measure of multidimensional vulnerability. The combination of PCA with global and local spatial autocorrelation analyses offers a comprehensive approach for identifying geographically concentrated areas of socioeconomic disadvantage. The proposed SEVI can support evidence-based regional planning, public policy development, disaster risk reduction and disaster management, resource allocation, and future spatial analyses addressing socioeconomic inequalities in Türkiye.

Keywords: Socioeconomic Vulnerability Index (SEVI), Türkiye, Spatial Autocorrelation , Local Moran's I (LISA) , Türkiye

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. INTRODUCTION

Socioeconomic vulnerability refers to the extent to which individuals or communities may be disadvantaged by socioeconomic conditions that influence their capacity to access resources, respond to adverse circumstances, and maintain social and economic well-being. Socioeconomic conditions are multidimensional in nature and relying on a single indicator may fail to adequately represent the underlying structure of vulnerability. Therefore, composite socioeconomic indices provide a practical means of combining information from multiple dimensions into a single measure that facilitates comparisons between geographical areas. Such indices have been widely employed in health and social research, neighbourhood-level deprivation assessment, public policy, and vulnerability analysis (Braveman et al., 2005; Lalloué et al., 2013; Mah et al., 2023; Barrozo et al., 2020).

The selection of indicators is an important stage in constructing socioeconomic and social vulnerability indices, and previous studies have incorporated variables representing several dimensions of socioeconomic disadvantage, including economic conditions, education, employment, demographic characteristics, wealth, and other community-level characteristics (Park & Xu, 2021; Kim et al., 2025; Zhao et al., 2024). In the present study, a Socioeconomic Vulnerability Index (SEVI) was constructed for the 81 provinces of Türkiye using four indicators: unemployment rate, GDP per capita, literacy rate, and dependency ratio. These variables were selected to represent labour-market disadvantage, economic conditions, educational characteristics, and demographic dependency, respectively. Following index construction, spatial autocorrelation analysis was employed to determine whether socioeconomic vulnerability exhibits a geographically structured pattern across Türkiye and to identify local concentrations of relatively high and low vulnerability using Moran's I global and local statistics.

Table 1. Variables used to construct SEVI

Variable	**Dimension represented**	**Expected relationship with vulnerability**
Unemployment rate	Labour-market disadvantage	Higher → greater vulnerability
GDP per capita	Economic conditions	Higher → lower vulnerability
Literacy rate	Educational conditions	Higher → lower vulnerability
Dependency ratio	Demographic dependency	Higher → greater vulnerability

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

2. METHODS

2.1. Construction of SEVI using PCA

Following data preparation, the four socioeconomic indicators were standardized to ensure comparability between variables measured on different scales. Normalization and standardization are important considerations in constructing deprivation and socioeconomic indices because differences in measurement scales can influence the relative contribution of individual indicators (Gilthorpe, 1995). Principal Component Analysis (PCA) was subsequently used to combine the socioeconomic indicators into a composite index. PCA provides a data-driven approach for reducing multiple correlated socioeconomic indicators into a smaller number of components and has been extensively applied to the construction of socioeconomic indices (Vyas & Kumaranayake, 2006; Mazziotta & Pareto, 2024). In this study, the first principal component (PC1) was retained as SEVI. The orientation of the component was adjusted where necessary so that higher SEVI values consistently represent greater socioeconomic vulnerability.

2.2. Global Moran's I

Global Moran's I was used to evaluate whether SEVI values exhibit overall spatial autocorrelation among the 81 provinces. Moran's I measures the degree to which similar or dissimilar observations occur in neighbouring geographical units (Moran, 1950). The statistic is expressed as:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

where n denotes the number of spatial units, xi and xj represent SEVI values for provinces i and j, $\bar{x}$ is the mean SEVI value, wij represents the spatial weight between provinces i and j, and $S_0 = \sum i \sum j w i j$. Positive values indicate a tendency toward spatial clustering of similar values, whereas negative values indicate spatial dispersion of dissimilar values.

2.3 Local Moran's I (LISA)

Because Global Moran's I summarizes spatial autocorrelation for the entire study area, Local Moran's I was additionally employed to identify where statistically significant local clusters and spatial outliers occur. Local Moran's I belongs to the Local Indicators of Spatial Association (LISA) framework introduced by Anselin (1995), which enables the contribution of individual

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

spatial units to the overall pattern of spatial association to be examined. For province i, Local Moran's I can be expressed as:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{m_2} \sum_j w_{ij}(x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

where

$$m_2 = \frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

The resulting local spatial associations can be interpreted as High–High (HH) clusters, Low–Low (LL) clusters, High–Low (HL) spatial outliers, and Low–High (LH) spatial outliers. Accordingly, Local Moran's I allows the analysis to move beyond the overall level of spatial autocorrelation and identify specific geographical concentrations of high and low socioeconomic vulnerability.

3. RESULTS

The SEVI map for the provinces of Türkiye is presented in Figure 1. A clear west–east spatial pattern an d separation in socioeconomic vulnerability can be observed. **Eastern provinces generally exhibit higher levels of socioeconomic vulnerability, whereas western provinces tend to have lower levels of vulnerability.** As PCA component scores are centered around zero, SEVI can take both negative and positive values, with higher scores representing greater socioeconomic vulnerability and lower scores representing comparatively lower vulnerability.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

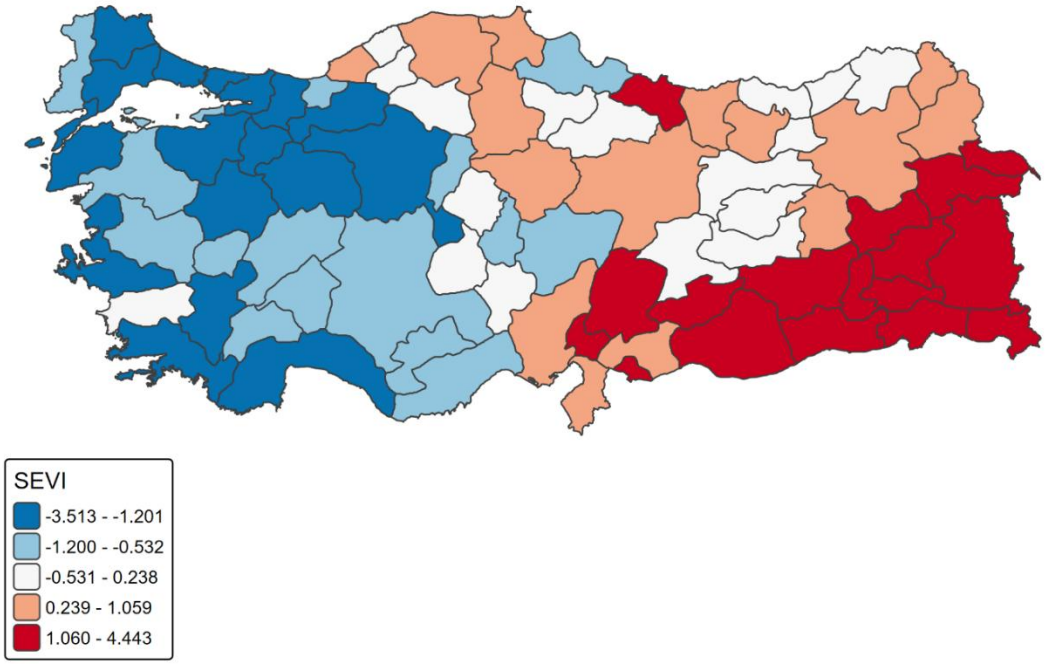
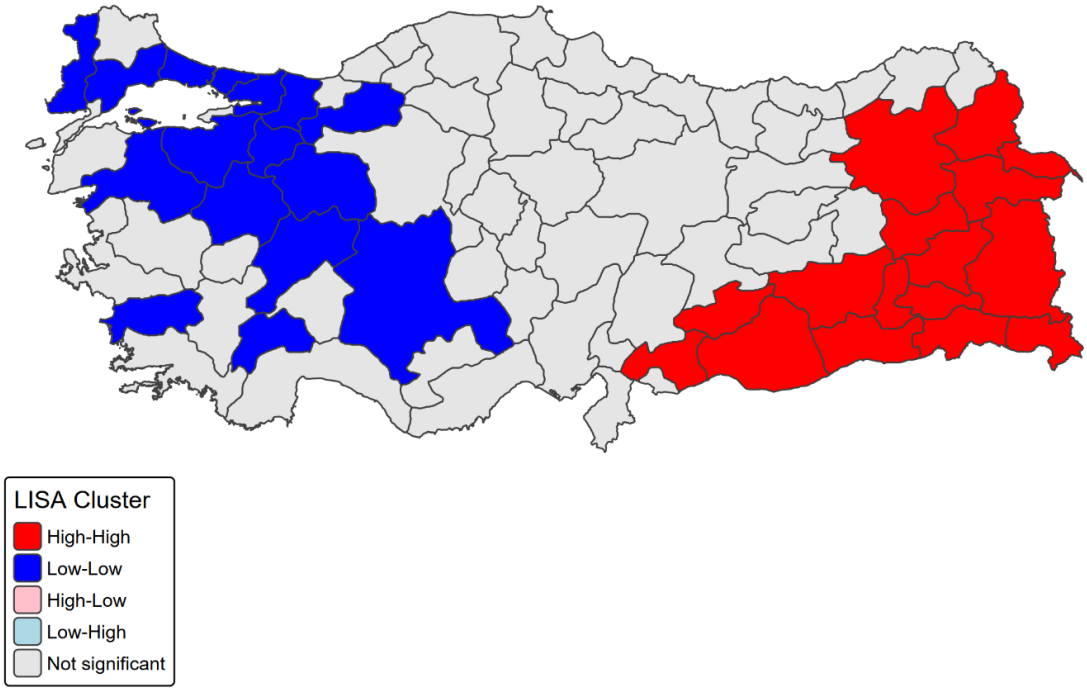


Figure 1. SEVI map of Türkiye

Global Moran's I revealed strong and statistically significant positive spatial autocorrelation in socioeconomic vulnerability across Türkiye ($I = 0.787$, $z = 9.556$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$). This finding indicates that provinces with similar SEVI values tend to be geographically clustered rather than randomly distributed.



The Local Moran's I (LISA) map is given in Figure 2. The Local Moran's I (LISA) analysis further demonstrated a distinct spatial clustering pattern in SEVI. A total of 16 provinces were classified as High–High clusters, representing provinces with relatively high socioeconomic vulnerability surrounded by provinces with similarly high vulnerability. These clusters were predominantly concentrated in eastern and southeastern Türkiye. In contrast, 15 provinces were classified as Low–Low clusters and were mainly concentrated in western Türkiye, indicating contiguous areas of relatively low socioeconomic vulnerability. The remaining 50 provinces showed no statistically significant local spatial association. No significant High–Low or Low–High spatial outliers were identified. Overall, the LISA results reinforce the Global Moran's I finding and reveal a pronounced regional pattern of socioeconomic vulnerability, characterized primarily by High–High clustering in the east and southeast and Low–Low clustering in the west.

4. CONCLUSION

This study developed a PCA-based Socioeconomic Vulnerability Index (SEVI) for the 81 provinces of Türkiye and examined its spatial distribution. The results revealed higher vulnerability in eastern and southeastern Türkiye and lower vulnerability in western provinces. Global and Local Moran's I analyses confirmed strong spatial clustering and pronounced regional disparities in socioeconomic vulnerability.

REFERENCES

Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis, 27*(2), 93–115. Original article

Barrozo, L., Fornaciali, M., De André, C. D. D., et al. (2020). GeoSES: A socioeconomic index for health and social research in Brazil. *PLoS ONE, 15*.

Braveman, P., Cubbin, C., Egerter, S., et al. (2005). Socioeconomic status in health research: One size does not fit all. *JAMA, 294*(22), 2879–2888.

Gilthorpe, M. (1995). The importance of normalisation in the construction of deprivation indices. *Journal of Epidemiology and Community Health, 49,* S45–S50.

Kim, K., Kang, J.-Y., & Hwang, C. (2025). Identifying indicators contributing to the Social Vulnerability Index via a scoping review. *Land*.

Lalloué, B., Monnez, J., Padilla, C., et al. (2013). A statistical procedure to create a neighborhood socioeconomic index for health inequalities analysis. *International Journal for Equity in Health, 12*, 21.

Mah, J., Penwarden, J., Pott, H., Theou, O., & Andrew, M. (2023). Social vulnerability indices: A scoping review. *BMC Public Health, 23*.

Mazziotta, M., & Pareto, A. (2024). Principal component analysis for constructing socio-economic composite indicators: Theoretical and empirical considerations. *SN Social Sciences, 4*.

Moran, P. A. P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika, 37*(1–2), 17–23. Original article

Park, G., & Xu, Z. (2021). The constituent components and local indicator variables of social vulnerability index. *Natural Hazards, 110*, 95–120.

Vyas, S., & Kumaranayake, L. (2006). Constructing socio-economic status indices: How to use principal components analysis. *Health Policy and Planning, 21*(6), 459–468.

Zhao, Y., Paul, R., Reid, S., et al. (2024). Constructing Social Vulnerability Indexes with increased data and machine learning highlight the importance of wealth across global contexts. *Social Indicators Research, 175*, 639–657.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

NORMALİZE HATA VE HİSTEREZİS TABANLI KAPALI ÇEVRİM KONTROL ALGORİTMASININ GÜNEŞ TAKİBİ ÜZERİNDE TASARIMI

Engin CAN

Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

engincan799@gmail.com - https://orcid.org/0009-0003-6879-0192

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR

Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

anur@beu.edu.tr - https://orcid.org/0009-0006-5671-6923

ÖZET

Düşük güçlü güneş takip sistemlerinde kontrol algoritmasının sensör gürültüsüne karşı dayanıklı, hesaplama bakımından yalın ve gereksiz servo hareketlerini sınırlayacak biçimde tasarlanması gerekir. Bu çalışmada, dört ışığa bağımlı dirençten (LDR) ve çapraz gölgeleyiciden oluşan diferansiyel algılama modülü için Arduino Uno hedefli, çift eksenli bir kapalı çevrim kontrol algoritması yeniden yapılandırılmıştır. Metod; her kanalda beş örnekli aritmetik ortalama ile kısa süreli ölçüm dalgalanmalarının azaltılmasını, sensörler arası ofsetlerin kalibrasyon katsayılarıyla düzeltilmesini, azimut ve yükseklik hatalarının işaretli ve normalize edilmiş biçimde hesaplanmasını, motor yönünün hata işaretinden belirlenmesini, ölü bantla mikro-düzeltmelerin bastırılmasını ve düşük ışık koşullarında iki eşikli histerezis mantığıyla pasif izleme durumuna geçilmesini içermektedir. Kontrol davranışı pasif izleme, güneş arama, aktif takip ve kilitli durumlarından oluşan bir durum makinesiyle tanımlanmış; servo komutları mekanik sınırlar içinde doyurulmuştur. Mevcut prototip üzerinde yürütülen laboratuvar düzeyindeki nitel testlerde ışık kaynağının dört ana yöndeki hareketine beklenen yönde tepki, merkezleme sonrasında komutların sabit kalması ve düşük ışıkta pasif duruma geçiş gözlenmiştir. Bununla birlikte açısal hata, yerleşme süresi, çevrim yürütme süresi ve enerji tüketimine ilişkin nicel kayıtlar bulunmadığından sonuçlar yalnızca fonksiyonel doğrulama kapsamında değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: LDR sensör; çift eksenli güneş takibi; kapalı çevrim kontrol; normalize hata; histerezis

NORMALIZED-ERROR AND HYSTERESIS-BASED CLOSED-LOOP CONTROL ALGORITHM FOR LDR-BASED DUAL-AXIS SOLAR TRACKING ON ARDUINO UNO

ABSTRACT

For low-power solar tracking systems, the control algorithm should be robust against sensor noise, computationally simple, and capable of limiting unnecessary servo actuation. This study

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

restructures an Arduino Uno-oriented dual-axis closed-loop controller for a differential sensing module composed of four light-dependent resistors (LDRs) and a cross-shaped baffle. The method combines five-sample arithmetic averaging, sensor offset calibration, signed and normalized azimuth/elevation errors, direction selection from the error sign, deadband-based suppression of micro-corrections, and a two-threshold hysteresis mechanism for low-light passive monitoring. The control behavior is represented by a four-state machine consisting of passıve monitorıng, sun search, active tracking, and locked states, while servo commands are saturated within the mechanical limits. Qualitative laboratory tests on the available prototype showed the expected directional response to light-source displacement, stable commands after centering, and transition to passive monitoring under low illumination. Since quantitative logs for angular error, settling time, loop execution time, and energy consumption were not available, the findings are deliberately restricted to functional verification.

Keywords: LDR sensor; dual-axis solar tracking; closed-loop control; normalized error; hysteresis

1. GİRİŞ

Fotovoltaik panel yüzeyinin güneş doğrultusuna göre yönlendirilmesi, panel üzerine düşen doğrudan ışınımın gün içindeki değişimini azaltmak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Takip mekanizmasının mekanik doğruluğu kadar sensör işleme, karar verme ve aktüatör komutlama katmanlarının tasarımı da sistemin davranışını belirlemektedir. Düşük maliyetli prototiplerde sınırlı işlem gücü ve besleme kapasitesi nedeniyle karmaşık konum hesaplamaları yerine doğrudan ışık geri beslemesi kullanan yöntemler öne çıkmaktadır. Güneş takip yöntemleri genel olarak astronomik konum hesaplamasına dayalı açık çevrim, optik sensör geri beslemeli kapalı çevrim ve her iki yaklaşımı birleştiren hibrit yapılar şeklinde sınıflandırılmaktadır. Açık çevrim yöntemler coğrafi konum ve zaman bilgisiyle güneş konumunu hesaplayabilir; ancak mekanik boşluk, kurulum hatası ve yerel gölgelenme gibi dış etkileri doğrudan ölçmez. LDR tabanlı kapalı çevrim sistemler ise yerel ışık dağılımına tepki verebilmekte, buna karşılık sensör toleransları, bulut geçişleri, gürültü ve yanlış ışık kaynaklarına duyarlılık gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir [1, 2].

Mevcut çalışmada dört LDR'nin ortalamaları karşılaştırılmış, hata büyüklüğü mutlak farkla ifade edilmiş ve düşük ışıkta tek eşikli pasif durum kullanılmıştır. Bu gösterim motor yönünün matematiksel olarak tanımlanmaması, eşik çevresinde mod titreşimi riski ve ham ADC farklarının aydınlık düzeyine bağlı olması nedeniyle eksik kalmaktadır. Çalışmanın katkıları; (i) motor yönünü koruyan işaretli hata denklemlerinin verilmesi, (ii) ortam aydınlığına daha az bağımlı normalize hata ölçütünün kullanılması, (iii) düşük ışık koşulları için histerezisli pasif izleme mantığının oluşturulması, (iv) mekanik sınırlar ve sensör bağlantı polaritesini içeren genel servo güncelleme denkleminin sunulması, (v) eksik deney kayıtlarının sonuç olarak gösterilmemesi ve fonksiyonel gözlemlerin nicel performans iddialarından ayrılmasıdır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Roth vd. doğrudan güneş ışınımının ölçümü için sensör geri beslemeli bir takip mekanizmasının tasarım ve yapımını sunmuş; Wang ve Lu optik sensör tabanlı çift eksenli bir düzenekte geri besleme ile yönlendirme yapılabileceğini göstermiştir. El Hammoumi vd., düşük maliyetli çift eksenli bir takip sisteminde LDR tabanlı algılamayı deneysel olarak değerlendirmiştir. Bu çalışmalar sensör tabanlı takibin uygulanabilirliğini desteklemekle birlikte, eşik seçimi, sensör kalibrasyonu ve düşük ışık geçişleri çoğu zaman uygulama ayrıntısı olarak kalmaktadır [2-4]. Kontrol yöntemi açısından Kiyak ve Gol, tek eksenli bir sistemde PID ve bulanık mantık denetleyicilerini karşılaştırmış; iki yaklaşımın dinamik davranış ve enerji üretimi üzerindeki farklılıklarını incelemiştir. Bu kaynak, PID'nin hesaplama yükünün mutlaka daha düşük olduğunu kanıtlayan bir çalışma olarak değil, farklı denetleyicilerin takip davranışını değiştirebildiğini gösteren karşılaştırmalı bir örnek olarak değerlendirilmiştir. Hadroug vd. ise LDR tabanlı mekanizmayı nöro-bulanık bir yapıyla karşılaştırarak daha gelişmiş kontrol stratejilerinin enerji verimliliği üzerindeki etkisini tartışmıştır. Al-Sheikh, ESP32 üzerinde Kalman filtresi, PID kontrol ve IoT izlemeyi bir araya getiren çift eksenli bir sistem sunmuştur. Bu tür yöntemler daha zengin hesaplama ve haberleşme olanakları sağlarken, Arduino Uno gibi 8-bit platformlarda bellek, yürütme süresi ve güç bütçesi daha sınırlıdır. Bu nedenle mevcut çalışmada durum makinesi, aritmetik ortalama, normalize fark ve doygunluk gibi gömülü uygulaması yalın işlemler tercih edilmiştir [5-7].

Çizelge 1. Seçili çalışmaların kontrol ve doğrulama kapsamı bakımından karşılaştırılması.

Çalışma	Algılama / denetim	Platform	Nicel doğrulama	Düşük ışık / enerji yaklaşımı
Roth vd. [2]	Optik sensör geri beslemesi	Özel prototip	Takip mekanizması deneyleri	Ayrıntı sınırlı
Wang ve Lu [3]	Optik sensör, çift eksen	Gömülü kontrol	Konum ve PV performansı	Ayrıntı sınırlı
El Hammoumi vd. [4]	LDR tabanlı çift eksen	Düşük maliyetli prototip	Enerji karşılaştırması	Doğrudan raporlanmamış
Kiyak ve Gol [5]	PID / bulanık mantık	ATmega tabanlı tek eksen	Dinamik ve enerji karşılaştırması	Denetleyici karşılaştırması
Al-Sheikh [7]	Kalman + PID + IoT	ESP32	Açısal hata ve enerji ölçütleri	Uzaktan izleme
Bu çalışma	4 LDR, normalize hata, ölü bant, histerezis	Arduino Uno	Nitel fonksiyonel doğrulama	Pasif izleme; nicel enerji ölçümü yok

3. MATERYAL VE DONANIM BAĞLAMI

3.1. Gömülü denetleyici ve aktüatörler

Algoritma Arduino Uno üzerinde hedeflenmiştir. Kart, ATmega328P mikrodenetleyiciye, 16 MHz saat frekansına ve altı analog girişe sahiptir. Dört LDR kanalı analog girişlerden okunmakta; azimut ve yükseklik eksenleri iki MG996R servo motorla yönlendirilmektedir. I2C arayüzlü 16×2 LCD, kullanıcıya sistem durumu ve açı komutlarını göstermektedir. Servo

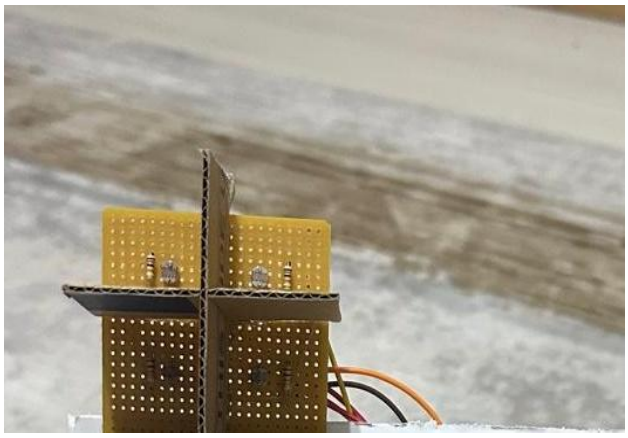
ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

motorların yüksek anlık akım gereksinimi nedeniyle haricî ve yeterli akım kapasiteli bir besleme kullanılması, Arduino ile servo kaynağının ortak toprak noktasında birleştirilmesi gerekir.

Göster 1. Kontrol algoritmasının uygulandığı çift eksenli prototipin genel görünümü.

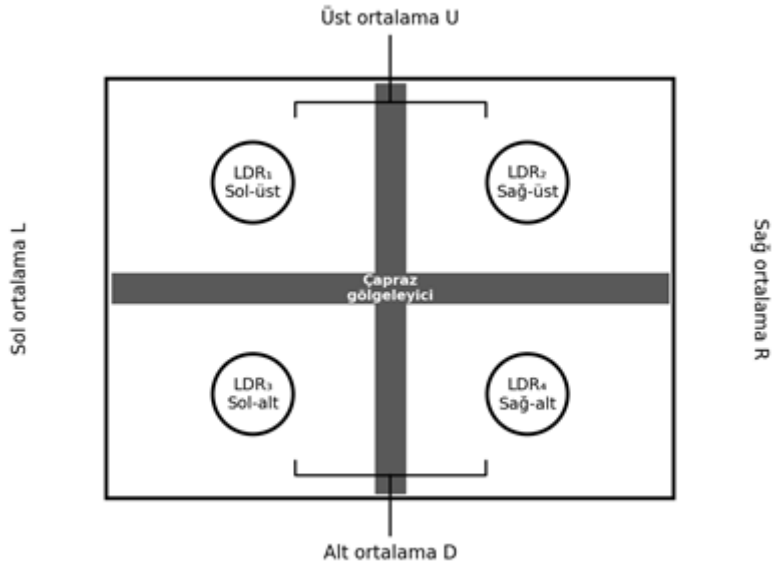
3.2. LDR sensör modülü ve gerilim bölücü davranışı

Dört LDR, artı biçimli bir gölgeleyicinin çevresinde sol-üst, sağ-üst, sol-alt ve sağ-alt bölgelerine yerleştirilmiştir. Işık doğrultusu sensör düzlemine dik olmadığında gölgeleyici bölgeler arasında aydınlık farkı oluşturur. LDR'nin aydınlıkla direnci azalır; ancak ADC değerinin aydınlıkla artması veya azalması, LDR'nin gerilim bölücünün üst ya da alt koluna bağlanmasına bağlıdır. Bu nedenle motor yönü yalnızca hata işaretinden değil, bağlantı polaritesini ifade eden $\sigma_a z$ ve $\sigma_e l$ yön katsayılarından da etkilenmektedir.



Göster 2. Dört LDR ve çapraz gölgeleyicinin prototip üzerindeki yakın görünümü.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Göster 3. Sensör bölgeleri ile üst-alt ve sol-sağ grup ortalamalarının tanımı.

3.3. Donanım-yazılım işlev zinciri

Sensör modülü ışık dağılımını dört analog kanala dönüştürür. Yazılım katmanı bu değerleri ortalama ve kalibrasyon işlemlerinden geçirdikten sonra işaretli hata üretir; durum makinesi, hata ve genel ışık düzeyine göre servo komutunu değiştirir. Panelin hareketi sensör aydınlık dağılımını yeniden değiştirerek kapalı çevrimi tamamlar.

4. GELİŞTİRİLMİŞ KONTROL ALGORİTMASI

4.1. Beş örnekli aritmetik ortalama

Her kontrol çevriminde i numaralı LDR kanalından art arda N=5 ADC örneği alınmaktadır. İşlem ADC çözünürlüğünü artıran oversampling-decimation yöntemi olarak değil, kısa süreli dalgalanmaları azaltan sonlu örnekli aritmetik ortalama olarak tanımlanmıştır. Microchip'in oversampling uygulama notunda çözünürlük artırımı için yeterli gürültü genliği ve decimation gibi ek koşullar gerektiği belirtilmektedir [8].

$$\bar{x}_i(k) = (1 / N) \cdot \Sigma_{j=1}^{N} x_i(k,j), \quad N = 5 \tag{1}$$

Örnekler arası bekleme süresi ve toplam kontrol periyodu kaynak tasarım kayıtlarında bulunmadığından sayısal değer verilmemiştir. Bu süreler, ADC yerleşme süresi, servo mekanik cevabı ve LCD güncelleme maliyeti dikkate alınarak uygulama kodunda açık sabitler şeklinde tanımlanmalıdır.

4.2. Sensör ofset ve kazanç kalibrasyonu

Aynı model LDR'ler homojen aydınlatma altında farklı ADC değerleri üretebilir. Kalıcı sensör farklarının güneş yönü hatası olarak algılanmasını önlemek amacıyla her kanal için doğrusal bir düzeltme tanımlanmıştır. Kalibrasyon sırasında sensör modülü homojen ve mümkün

olduğunca dik ışık altında tutulur; kanal ortalamaları referans değere eşlenir. Yeterli veri mevcutsa iki veya daha fazla aydınlık seviyesinde kazanç ve ofset katsayıları belirlenebilir.

$$y_i(k) = a_i \cdot \bar{x}_i(k) + b_i \tag{2}$$

Burada a_i kazanç, b_i ofset düzeltmesidir. Mevcut deney kayıtlarında a_i ve b_i değerleri bulunmadığından bunlara sayısal değer atanmadı. Kalibrasyon uygulanmayacaksa $a_i=1$ ve $b_i=0$ kabulü açıkça belirtilmeli, sensör toleransının takip hatasına etkisi sınırlılık olarak raporlanmalıdır.

4.3. Grup ortalamaları ve normalize işaretli hata

Kalibre edilmiş sensör değerleri y_1, y_2, y_3 ve y_4 sırasıyla sol-üst, sağ-üst, sol-alt ve sağ-alt sensörleri göstermektedir. Üst (U), alt (D), sol (L) ve sağ (R) grup ortalamaları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U = (y_1 + y_2)/2, \quad D = (y_3 + y_4)/2, \quad L = (y_1 + y_3)/2, \quad R = (y_2 + y_4)/2 \tag{3}$$

Mutlak fark yalnızca hata büyüklüğünü verdiği için motor yönünü belirleyemez. Bu nedenle azimut ve yükseklik hataları işaretli olarak hesaplanır. Ortam aydınlığındaki geniş değişimlerde ham farkın anlamı değişebileceğinden payda ile normalize edilmiş hata kullanılır.

$$e_az(k) = [L(k) - R(k)] / [L(k) + R(k) + \varepsilon] \tag{4}$$

$$e_el(k) = [U(k) - D(k)] / [U(k) + D(k) + \varepsilon] \tag{5}$$

ε sıfıra bölünmeyi önleyen küçük pozitif sabittir. Hesap yükünü azaltmak için oranlar kayan nokta yerine ölçeklenmiş tamsayı biçiminde uygulanabilir. Örneğin hata 1000 ile ölçeklenerek tamsayı bölmesi kullanılabilir. Böylece eşik değerleri de binde biriminde tanımlanır.

4.4. Ölü bant ve servo yön güncellemesi

Azimut ve yükseklik için ayrı ölü bant eşikleri $\delta_a z$ ve $\delta_e l$ tanımlanır. Hata büyüklüğü ilgili eşik içinde kaldığında komut değiştirilmez. Eşik aşıldığında komut, hata işareti ve mekanik bağlantı yönü dikkate alınarak bir adım güncellenir. Servo kütüphanesine verilen bir birimlik komutun fiziksel olarak tam 1° harekete karşılık geldiği doğrulanmadığından revize metinde '1°' yerine 'bir servo komut adımı' ifadesi kullanılmıştır.

$$u_az(k+1) = sat[u_az(k) + \sigma_az \cdot sgn(e_az(k)) \cdot \Delta u_az] \tag{6}$$

$$u_el(k+1) = sat[u_el(k) + \sigma_el \cdot sgn(e_el(k)) \cdot \Delta u_el] \tag{7}$$

sat[·] işlemi komutları u_min ve u_max mekanik sınırları içinde tutar. σ katsayısı +1 veya −1 seçilerek sensör polaritesi ile servo montaj yönü eşleştirilir. Δu bir servo komut adımıdır. Gerçek panel açısının komutla doğrusal olduğu ancak haricî açı sensörü veya açıölçerle kalibre edilirse söylenebilir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

4.5. Düşük ışık için histerezisli pasif izleme

Dört sensörün genel ışık göstergesi $\bar{I}=(y_1+y_2+y_3+y_4)/4$ olarak tanımlanır. Tek bir eşik kullanılması, değer eşik çevresinde dalgalandığında sistemin aktif ve pasif durumlar arasında hızlı geçiş yapmasına neden olabilir. Bu nedenle L_uyku ve L_uyanma olmak üzere iki ayrı eşik kullanılır ve L_uyku < L_uyanma koşulu sağlanır. Pasif duruma geçiş ile aktif duruma dönüşün belirli sayıda ardışık çevrim boyunca doğrulanması, kısa süreli bulut geçişlerinin yanlış mod değişimi oluşturmasını azaltır.

$$PASİF\ geçiş: \bar{I} \le L_uyku, \quad AKTİF\ dönüş: \bar{I} \ge L_uyanma \tag{8}$$

Bu durumda mikrodenetleyici gerçek donanımsal uyku moduna alınmamakta, yalnızca servo konum komutları değiştirilmemektedir. Bu nedenle 'uyku modu' yerine 'pasif izleme durumu' terimi kullanılmıştır. Servo motorların konum tutarken akım çekebileceği ve LCD ile mikrodenetleyicinin çalışmaya devam ettiği dikkate alınmalıdır.

4.6. Durum makinesi

Kontrol davranışı dört durumla tanımlanmıştır: pasif izleme düşük ışıkta servo komutunun korunmasını; güneş arama yeterli ışık bulunduğu ancak yön hatasının henüz çözümlenmediği başlangıç davranışını; aktif takip en az bir eksende ölü bandı aşan hata bulunduğunu; kilitli ise iki eksendeki hatanın da ölü bant içinde olduğunu ifade eder.

Çizelge 2. İşaretli hata ve ışık düzeyine bağlı motor karar çizelgesi.

Koşul	Komut kararı	Durum
$\lvert e_az\rvert \le \delta_az$, $\lvert e_el\rvert \le \delta_el$	Azimut ve yükseklik komutlarını koru	KİLİTLİ
$e_az > \delta_az$	u_az komutunu σ_az yönünde bir adım değiştir	AKTİF TAKİP
$e_az < -\delta_az$	u_az komutunu $-\sigma_az$ yönünde bir adım değiştir	AKTİF TAKİP
$e_el > \delta_el$ / $e_el < -\delta_el$	u_el komutunu işaret ve σ_el katsayısına göre değiştir	AKTİF TAKİP
$\bar{I} \le$ L_uyku (M↓ çevrim)	Servo komutlarını değiştirme	PASİF İZLEME

5. GÖMÜLÜ SİSTEM UYGULAMASI VE TEKRAR ÜRETİLEBİLİRLİK

5.1. Uygulama parametreleri

Bir kontrol algoritmasının yeniden üretilebilmesi için eşikler, pin eşlemeleri, zamanlamalar ve mekanik sınırlar açıkça raporlanmalıdır. Kaynak dosyada doğrulanabilen sayısal değerler N=5 örnek ve bir servo komut adımıdır. Çizelge 3'te ölçülmesi veya koddan doğrudan aktarılması gereken parametreler gösterilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çizelge 3. Algoritmanın yeniden üretilebilirliği için gerekli uygulama parametreleri.

Sembol / alan	İşlev	Bu çalışmadaki durum	Açıklama
N	Her LDR için örnek sayısı	5	Kaynak metinde mevcut
$\Delta u_a z$, $\Delta u_e l$	Servo komut adımı	1 komut birimi	Fiziksel 1° olduğu doğrulanmamıştır
$\delta_a z$, $\delta_e l$	Normalize ölü bant eşikleri	Kalibrasyonla belirlenmeli	Kod / deney kaydı gerekli
L_uyku, L_uyanma	Düşük ışık histerezis eşikleri	Kalibrasyonla belirlenmeli	L_uyku < L_uyanma
M↓, M↑	Ardışık çevrim doğrulama sayısı	Belirlenmeli	Bulut geçişlerine göre seçilmeli
u_min, u_max	Mekanik servo sınırları	Ölçülmeli	Çarpışma ve kablo gerilmesi önlenmeli
T_s	Kontrol çevrimi periyodu	Ölçülmeli	micros() veya zamanlayıcıyla kaydedilmeli
a_i, b_i	LDR kalibrasyon katsayıları	Ölçülmeli	Homojen ışık altında elde edilmeli
Pin eşlemeleri	LDR, servo ve LCD bağlantıları	Koddan aktarılmalı	Mevcut dosyada yok
$\sigma_a z$, $\sigma_e l$	Servo yön katsayıları	+1 veya −1	Donanım yön testiyle belirlenmeli

5.2. Hesaplama yükünün değerlendirilmesi

Her kontrol çevriminde dört kanal için toplam 20 ADC dönüşümü yapılmaktadır. Sonrasında dört kanal ortalaması, dört grup ortalaması, iki normalize hata ve birkaç karşılaştırma hesaplanır. İşlem sayısı düşük olmakla birlikte gerçek çevrim süresi yalnızca aritmetik işlemlere bağlı değildir; ADC okuma süresi, servo kütüphanesi ve özellikle I2C LCD güncellemesi yürütme süresini etkileyebilir. Bu nedenle 'hesaplama açısından hafif' ifadesi, yürütme süresi ve bellek kullanımı ölçülmeden nicel sonuç olarak kullanılmamıştır.

5.3. Sabah başlangıcı ve mekanik sınırlar

Yalnızca LDR geri beslemesine dayanan bir sistem akşam batı yönünde kalabilir. Ertesi sabah ışık doğu yönünden geldiğinde sensör geometrisi ve mekanik görüş alanı güneşi tekrar bulmaya yetmeyebilir. Bu nedenle başlangıç konumu, gece doğu referansına dönüş, gerçek zamanlı saat destekli kaba yönlendirme veya limit anahtarı gibi çözümler uzun süreli otonom çalışmada değerlendirilmelidir.

6. FONKSİYONEL DOĞRULAMA

6.1. Doğrulama kapsamı

Mevcut prototip gerçek donanım üzerinde çalıştırılmış, ancak açısal konum sensörü, zaman damgalı seri port kaydı ve akım ölçerle eş zamanlı nicel veri toplanmamıştır. Bu nedenle

değerlendirme, kontrol mantığının beklenen davranışı üretip üretmediğine yönelik nitel fonksiyonel testlerle sınırlandırılmıştır. 'Hızlı', 'yüksek doğruluklu', 'enerji tasarruflu' veya 'osilasyonsuz' gibi nicel çağrışım taşıyan ifadeler sonuç olarak kullanılmamıştır.

Çizelge 4. Mevcut prototip üzerinde yürütülen nitel fonksiyonel doğrulama senaryoları.

Test senaryosu	Beklenen davranış	Nitel gözlem	Ölçülmeyen büyüklük
Işık kaynağını sola taşıma	Azimut hata işaretinin değişmesi ve uygun yönde servo komutu	Beklenen yönde tepki gözlendi	Açısal hata ve tepki süresi kaydedilmedi
Işık kaynağını sağa taşıma	Ters yönde azimut komutu	Beklenen yönde tepki gözlendi	Tekrarlı istatistik yok
Işık kaynağını yukarı / aşağı taşıma	Yükseklik komutunun hata işaretine göre değişmesi	Beklenen yönde tepki gözlendi	Komut-gerçek açı kalibrasyonu yok
Kaynağı sensör eksenine yaklaştırma	İki hata ölü bant içine girdiğinde komutun korunması	Komutların sabit kaldığı gözlendi	Jitter sayısı ölçülmedi
Sensörleri karartma	Pasif izleme durumuna geçiş	LCD durum değişimi gözlendi	Geçiş süresi ve akım tüketimi ölçülmedi
Işığı yeniden sağlama	Arama / takip durumuna dönüş	Fonksiyonel dönüş gözlendi	Histerezis eşikleri nicel kayıtta yok

6.2. Nicel doğrulama için önerilen ölçütler

Algoritmanın kontrol performansını bilimsel olarak karşılaştırmak için farklı başlangıç sapmalarında tekrarlı deney yapılmalıdır. Işık kaynağının veya panelin gerçek açısı haricî bir enkoder, dijital eğimölçer veya kalibre edilmiş açıölçerle kaydedilmelidir. Her test en az birkaç tekrar içermeli; ortalama, standart sapma ve en kötü durum değeri raporlanmalıdır.

Çizelge 5. Gelecek nicel doğrulamada raporlanması gereken performans ölçütleri.

Ölçüt	Tanım
Başlangıç hatası	Test başındaki gerçek güneş-panel açısal farkı
Yerleşme süresi	Hatanın ölü bant içine girip kalmasına kadar geçen süre
Son durum hatası	Kilitli durumda mutlak azimut ve yükseklik hatası
RMSE / MAE	Takip süresince açısal hatanın istatistiksel özeti
Servo düzeltme sayısı	Birim zamanda üretilen konum komutu sayısı
Mod değiştirme sayısı	Düşük ışık eşikleri çevresindeki durum geçişleri
Çevrim süresi	ADC, hesaplama, servo ve LCD dahil yürütme zamanı
Akım / enerji	Aktif takip, kilitli ve pasif izleme durumlarında tüketim

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada dört LDR'li çapraz gölgeleyici kullanan çift eksenli güneş takip prototipi için kapalı çevrim kontrol algoritması bilimsel ve matematiksel açıdan yeniden yapılandırılmıştır. Beş örnekli ADC ortalaması doğru biçimde aritmetik ortalama olarak adlandırılmış; sensör

kalibrasyonu, işaretli ve normalize azimut-yükseklik hataları, hata işaretine bağlı servo yönü, mekanik doygunluk, ölü bant ve iki eşikli histerezis açık denklemlerle tanımlanmıştır. Kontrol mantığı pasif izleme, güneş arama, aktif takip ve kilitli durumlarından oluşan bir durum makinesiyle sunulmuştur.

Mevcut prototipte yapılan nitel testler yön değişimlerine beklenen tepkiyi, merkezleme sonrasında komutların korunmasını ve düşük ışıkta pasif duruma geçişi göstermiştir. Gelecek çalışmaların önceliği; pin ve parametre çizelgesunun gerçek koddan tamamlanması, sensör ve servo açı kalibrasyonunun yapılması, farklı ışık koşullarında tekrarlı açısal hata deneyleri, flash-SRAM-çevrim süresi ölçümü ve aktif/kilitli/pasif durum enerji tüketiminin karşılaştırılmasıdır. RTC destekli hibrit yönlendirme, uyarlanabilir ölü bant ve gerçek donanımsal düşük güç modu sonraki geliştirme adımlarıdır.

KAYNAKÇA

[1] Yilmaz, S., Ozcalik, H. R., Kesler, S., Dincer, F., Yelmen, B. The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation—A case study in Kahramanmaras, Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 1015–1024, 2015.

[2] Roth, P., Georgiev, A., Boudinov, H. Design and construction of a system for sun-tracking, Renewable Energy, 29,3, 393–402, 2004.

[3] Wang, J.-M., Lu, C.-L. Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system, Sensors, 13,3, 3157–3168, 2013.

[4] El Hammoumi, A., Motahhir, S., El Ghzizal, A., Chalh, A., Derouich, A. A simple and low-cost active dual-axis solar tracker, Energy Science & Engineering, 6,5, 607–620, 2018.

[5] Kiyak, E., Gol, G. A comparison of fuzzy logic and PID controller for a single-axis solar tracking system, Renewables: Wind, Water, and Solar, 3,7, 2016.

[6] Hadroug, N., Iratni, A., Hafaifa, A., Boudjemline, A., Alshammari, O. S., Jerbi, H., Chen, X. Energy efficiency improvement in photovoltaic installation using a twin-axis solar tracking mechanism with LDR sensors compared with neuro-fuzzy adaptive inference structure, Journal of Electrical Engineering & Technology, 18, 2943–2967, 2023.

[7] Al-Sheikh, M. A. IoT-enabled dual-axis solar tracking system using ESP32 and Blynk for real-time monitoring and energy optimization, Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro dan Informatika, 3,1, 187–204, 2025.

[8] Microchip Technology. AVR121: Enhancing ADC resolution by oversampling (Application Note AN8003), 2005.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

LDR TABANLI ÇİFT EKSENLİ BİR GÜNEŞ TAKİP PROTOTİPİNİN TASARIMI VE ENERJİ PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Engin CAN

Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

engincan799@gmail.com - https://orcid.org/0009-0003-6879-0192

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR

Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

anur@beu.edu.tr - https://orcid.org/0009-0006-5671-6923

ÖZET

Sabit açılı fotovoltaik (FV) panellerde güneş ışınlarının panel yüzey normaline göre geliş açısının gün boyunca değişmesi, özellikle sabah ve akşam saatlerinde belirgin kosinüs kayıplarına neden olmaktadır. Bu çalışmada dört ışığa bağımlı dirençten (LDR) oluşan diferansiyel algılama modülü, iki MG996R servo motor ve Arduino Uno tabanlı kapalı çevrim kontrol kullanılarak çift eksenli bir güneş takip prototipi geliştirilmiştir. Prototip; 6 W/12 V FV panel, 3S lityum-iyon pil grubu, BMS koruması ve DC-DC gerilim düzenleme kademeleriyle bütünleştirilmiştir. Enerji performansı, aynı anma değerine sahip sabit açılı bir referans panelle 08.00-20.00 arasındaki tek günlük saha kayıtları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Saatlik anlık güç değerleri doğrudan toplanmak yerine trapez integrasyonu ile enerjiye dönüştürülmüş; sabit panel için 28,04 Wh, takip paneli için 45,87 Wh ve %63,62 brüt enerji artışı hesaplanmıştır. Kontrol elektroniğinin 7,20 Wh/24 saatlik tüketiminin 12 saatlik karşılığı ile 0,19 Wh olarak tahmin edilen motor tüketimi aynı test sınırında dikkate alındığında, yardımcı tüketimlere göre düzeltilmiş takip enerjisi 42,08 Wh ve enerji artışı %50,10 olmuştur. Sonuçlar, tek günlük ve sınırlı ölçüm koşulları altında LDR tabanlı takip yaklaşımının pozitif enerji artışı sağladığını göstermekle birlikte, genellenebilirlik için çok günlü, eş zamanlı ışınım-sıcaklık ölçümlü ve belirsizlik analizli deneylere ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: güneş takip sistemi; LDR sensör; çift eksenli takip; fotovoltaik enerji; parazitik enerji tüketimi

DESIGN AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE ENERGY PERFORMANCE OF AN LDR-BASED DUAL-AXIS SOLAR TRACKING PROTOTYPE

ABSTRACT

For fixed-tilt photovoltaic (PV) modules, the variation in the incidence angle of solar radiation throughout the day causes pronounced cosine losses, particularly during morning and evening hours. This study develops a dual-axis solar tracking prototype based on a differential sensing

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

module composed of four light-dependent resistors (LDRs), two MG996R servomotors, and Arduino Uno-based closed-loop control. The prototype integrates a 6 W/12 V PV module, a 3S lithium-ion battery pack, battery-management-system protection, and DC-DC voltage-conditioning stages. Energy performance was compared with a fixed-tilt reference module of the same rated power using single-day field records collected from 08:00 to 20:00. Instead of directly summing hourly instantaneous power samples, the power-time curves were integrated using the trapezoidal rule. The calculated energies were 28.04 Wh for the fixed module and 45.87 Wh for the tracking module, corresponding to a gross increase of 63.62%. When the 12-hour equivalent of the 7.20 Wh/24 h control-electronics consumption and an estimated motor consumption of 0.19 Wh were included within the same test boundary, the auxiliary-consumption-adjusted tracking energy was 42.08 Wh and the resulting increase was 50.10%. The results demonstrate a positive energy increase under the limited single-day test conditions, while multi-day experiments with synchronized irradiance and temperature measurements and uncertainty analysis are required for generalization.

Keywords: solar tracking system; LDR sensor; dual-axis tracking; photovoltaic energy; parasitic energy consumption

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artması, fotovoltaik sistemlerin enerji verimini yükseltmeye yönelik mekanik ve elektronik iyileştirmeleri önemli bir araştırma alanı hâline getirmiştir. Türkiye'nin güneşlenme süresi ve ışınım potansiyeli, küçük ölçekli bağımsız uygulamalardan şebeke ölçekli santrallere kadar geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Bununla birlikte, bir FV modülünün anlık elektriksel çıkışı yalnızca nominal gücüne değil; gelen ışınımın büyüklüğüne, hücre sıcaklığına, elektriksel çalışma noktasına, gölgelenmeye ve güneş ışınlarının panel yüzey normaline göre geliş açısına bağlıdır. Sabit açılı bir panel belirli bir zaman diliminde güneşe yakın dik konuma gelebilir; ancak güneşin azimut ve yükseklik açılarının gün boyunca değişmesi nedeniyle sabah ve akşam saatlerinde geliş açısı büyür. Doğrudan ışınım bileşeni için alınan etkin enerji yaklaşık olarak geliş açısının kosinüsüyle değiştiğinden, bu geometrik uyumsuzluk enerji üretimini azaltır. Güneş takip sistemleri, panel yüzeyini güneş doğrultusuna yaklaştırarak geliş açısını küçültmeyi ve güç-zaman eğrisi altındaki alanı artırmayı amaçlar [1].

Takip sistemleri mekanik yapılarına göre tek eksenli ve çift eksenli; kontrol yöntemlerine göre astronomik konum hesabına dayalı açık çevrim, optik sensör geri beslemeli kapalı çevrim ve her iki yaklaşımı birleştiren hibrit sistemler olarak sınıflandırılabilir. Astronomik yöntemler konum ve zaman bilgisiyle güneş açısını hesaplayabildiğinden bulut geçişlerinden daha az etkilenir; buna karşılık gerçek zamanlı saat, koordinat bilgisi ve daha ayrıntılı yazılım gerektirir. LDR tabanlı kapalı çevrim yöntemler düşük maliyet, basitlik ve doğrudan optik hata algılama avantajı sağlar. Ancak sensör eşleşmezliği, dağınık ışınım, yerel gölgelenme ve hızlı bulut geçişleri yanlış yönlenmeye neden olabileceğinden ölü bant, filtreleme ve düşük ışık durumu gibi kontrol önlemleri gereklidir. Bir takip sisteminin başarısı yalnızca takip panelinin sabit panele göre daha yüksek brüt enerji üretmesiyle değerlendirilmemelidir. Servo motorlar,

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

mikrodenetleyici, ekran, sensör devreleri ve DC-DC dönüştürücüler tarafından tüketilen yardımcı enerji de dikkate alınmalıdır. Ayrıca anlık güç örneklerinin enerjiye dönüştürülmesinde güç-zaman integrali kullanılmalı; ölçüm aralığı ile yardımcı tüketimlerin zaman sınırı aynı olmalıdır. Bu ayrımlar yapılmadığında brüt ve net kazanç oranları olduğundan farklı hesaplanabilir.

Bu çalışmanın amacı, dört LDR'li diferansiyel algılama modülüne sahip çift eksenli bir güneş takip prototipinin mekanik ve elektronik tasarımını sunmak ve mevcut tek günlük saha kayıtlarını enerji hesabı açısından yeniden değerlendirmektir. Çalışmanın pratik katkısı; düşük maliyetli mekanik yapı, dört bölgeli LDR geri beslemesi ve enerji depolama bileşenlerinin tek bir prototipte bir araya getirilmesidir. Bilimsel katkısı ise mevcut ölçüm kayıtlarının doğrudan güç toplamı yerine trapez integrasyonu ile yeniden analiz edilmesi, yardımcı tüketimlerin 12 saatlik test ve 24 saatlik günlük işletme sınırları için ayrı ayrı gösterilmesi ve deneysel sınırlılıkların açık biçimde ortaya konulmasıdır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Güneş takip yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar, enerji artışının sistem topolojisine, iklim koşullarına, mevsime, sabit referans panelin açısına ve yardımcı enerji tüketimlerinin hesaba katılıp katılmamasına bağlı olarak geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Mousazadeh vd., farklı takip yöntemlerini inceledikleri derleme çalışmasında tek ve çift eksenli sistemlerin potansiyelini karşılaştırmış; takip mekanizmasının enerji kazancı kadar mekanik karmaşıklık ve enerji tüketimi bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır [2]. Abdallah, düzlemsel FV panellerde takip kullanımının akım-gerilim karakteristiğine etkisini deneysel olarak incelemiş ve çift eksenli yaklaşımın günün daha geniş bölümünde yüksek üretim sağlayabildiğini göstermiştir [3]. Düşük maliyetli optik sensör uygulamalarında dört bölgeli algılama düzenleri yaygındır. Roth vd. sensör geri beslemeli bir takip sisteminin tasarım ve gerçekleştirme sürecini ele almıştır [4]. Wang ve Lu, optik sensör tabanlı çift eksenli bir düzenek geliştirerek sabit sisteme göre enerji artışını deneysel olarak göstermiştir [5].

El Hammoumi vd. ise dört LDR kullanan düşük maliyetli aktif bir çift eksenli takip sistemi sunmuş ve sensör tabanlı kontrolün küçük güç düzeylerinde uygulanabilir olduğunu belirtmiştir [6]. Singh vd. ve Hadroug vd. benzer sensör mimarilerini farklı kontrol yaklaşımlarıyla incelemiştir [7, 8]. Optik geri beslemenin temel zayıflıklarından biri, doğrudan ve dağınık ışınımın hızlı değiştiği koşullarda sensörler arasında kararsız fark sinyalleri oluşabilmesidir. Kelly ve Gibson, bulutlu koşullarda takip sistemlerinin üretim avantajını tartışmış; değişken atmosferik koşullarda kontrol kararlılığının önemine dikkat çekmiştir [9]. Bu nedenle pratik LDR sistemlerinde ölü bant, zaman gecikmesi, hareket adımı sınırlaması ve düşük ışıkta bekleme gibi önlemler enerji tüketimini ve gereksiz mekanik hareketleri azaltmak için kullanılmaktadır. Daha gelişmiş sistemlerde LDR geri beslemesi astronomik konum hesabıyla birleştirilerek bulutluluk sırasında referans kaybı azaltılabilir. Enerji depolama açısından bir BMS; hücre gerilimlerinin izlenmesi, aşırı şarj/deşarj ve aşırı akım koruması ile hücre dengeleme gibi güvenlik işlevleri sağlar [10, 11]. Bununla birlikte BMS, tek başına uygun bir lityum-iyon şarj algoritmasının veya maksimum güç noktası takibinin yerini almaz. Pilde

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

depolanan net enerjinin belirlenebilmesi için şarj kademesinin CC-CV davranışı, dönüştürücü verimleri, başlangıç ve son şarj durumu ile pil akım-gerilim kayıtları ayrıca ölçülmelidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Sistem Kapsamı ve Bileşenler

İncelenen sistem, iki serbestlik dereceli bir pan-tilt mekanizmasına yerleştirilen 6 W/12 V polikristal FV panel, dört LDR'li optik algılama modülü, Arduino Uno denetleyici, iki MG996R servo motor, DC-DC gerilim düzenleme kademeleri ve BMS korumalı 3S lityum-iyon pil grubundan oluşmaktadır. Bu çalışma yeni bir pil şarj verimi testi gerçekleştirmemekte; mevcut prototip ile kaydedilmiş panel gerilim-akım verilerini yeniden analiz ederek FV üretim tarafındaki enerji performansını değerlendirmektedir. Pil kapasitesi, dönüştürücü modelleri ve şarj profiline ilişkin ayrıntılar mevcut kayıtlarda bulunmadığından, sonuçlar tam sistem veya batarya şarj verimi olarak yorumlanmamıştır.

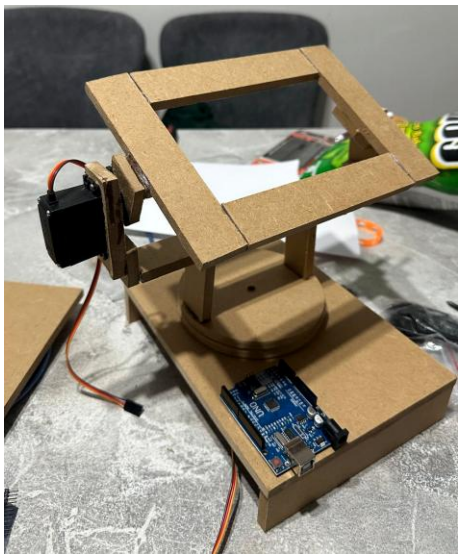
Çizelge 1. Prototipte kullanılan temel bileşenler ve değerlendirme kapsamı.

Bileşen	Tanım	İşlev	Mevcut kayıtların kapsamı
FV modül	6 W / 12 V, polikristal	Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme	Anlık V-I değerleri mevcut; üretici toleransı ve sıcaklık katsayısı kaydedilmemiştir.
Optik sensör	Dört LDR + çapraz gölgeleyici	Azimut ve yükseklik hata sinyallerini oluşturma	Sensör yerleşimi mevcut; kalibrasyon eğrileri ve sayısal eşikler kaydedilmemiştir.
Denetleyici	Arduino Uno	LDR okumaları ve servo açı komutları	Algoritma prensibi mevcut; örnekleme süresi ve eşik sayıları kaydedilmemiştir.
Aktüatörler	2 × MG996R servo	Azimut ve yükseklik yönlendirmesi	Durma torku ve tahmini hareket enerjisi kullanılmıştır.
Depolama	3S Li-ion pil + BMS	Enerji depolama ve koruma	Pil kapasitesi, SOC ve şarj verimi ölçülmemiştir.
Güç elektroniği	DC-DC gerilim düzenleme kademeleri	Gerilim uyarlama ve yük besleme	Model, anahtarlama topolojisi ve verim değerleri kaydedilmemiştir.

3.2. Mekanik Tasarım ve Çift Eksenli Yönlendirme

Taşıyıcı gövde ve alt taban, kolay işlenebilir ve rijit bir yapı sağlamak amacıyla MDF malzemeden üretilmiştir. Hareketli üst çerçeve ve panel yatağında servo yükünü azaltmak için daha hafif polistiren ve mukavva bileşenler kullanılmıştır. Alt servo üst yapıyı düşey eksen etrafında döndürerek azimut (pan) hareketini, ikinci servo ise paneli yatay dönme ekseni etrafında hareket ettirerek güneşin yükseklik açısının (tilt/elevation) izlenmesini sağlamaktadır. Böylece ikinci eksen yalnızca mevsimsel değişimi değil, gün içindeki yükseklik açısı değişimini de karşılamaktadır.

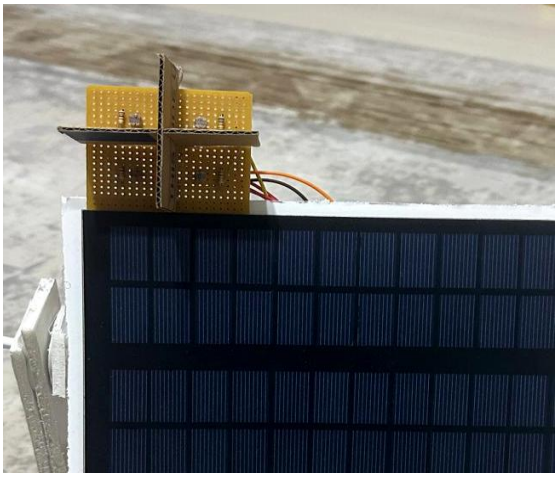
ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 1. Çift eksenli prototipin taşıyıcı gövdesi ve pan-tilt mekanizması.

3.3. LDR Sensör Mimarisi ve Hata Sinyalleri

Optik algılama modülü, dört LDR'nin artı biçimli bir gölgeleyici etrafına yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Güneş ışınları sensör düzlemine yaklaşık dik geldiğinde LDR'ler benzer aydınlık seviyeleri algılar. Işın doğrultusu sensör normalinden saptığında gölgeleyicinin oluşturduğu kısmi gölge, sol-sağ veya üst-alt sensör grupları arasında fark meydana getirir. LDR'ler referans dirençlerle gerilim bölücü olarak bağlanmış ve analog değerler Arduino'nun ADC girişlerinden okunmuştur.



Görsel 2. Panel üzerindeki dört LDR'li çapraz gölgeleme modülünün yakın görünümü.

Üst-sol, üst-sağ, alt-sol ve alt-sağ sensör okumaları sırasıyla L_US, L_UĞ, L_AS ve L_AĞ ile gösterildiğinde grup ortalamaları Denklem (1)-(4) ile tanımlanabilir:

$$L_üst = (L_US + L_UĞ) / 2 \quad (1)$$

$$L_alt = (L_AS + L_AĞ) / 2 \quad (2)$$

$$L_sol = (L_US + L_AS) / 2 \quad (3)$$

$$L_sağ = (L_UĞ + L_AĞ) / 2 \quad (4)$$

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Azimut ve yükseklik hata sinyalleri sırasıyla Denklem (5) ve (6) ile hesaplanmıştır. Gerilim bölücü bağlantısına bağlı olarak hata işaretinin motor yönüyle eşleştirilmesi deneysel kalibrasyonla yapılır.

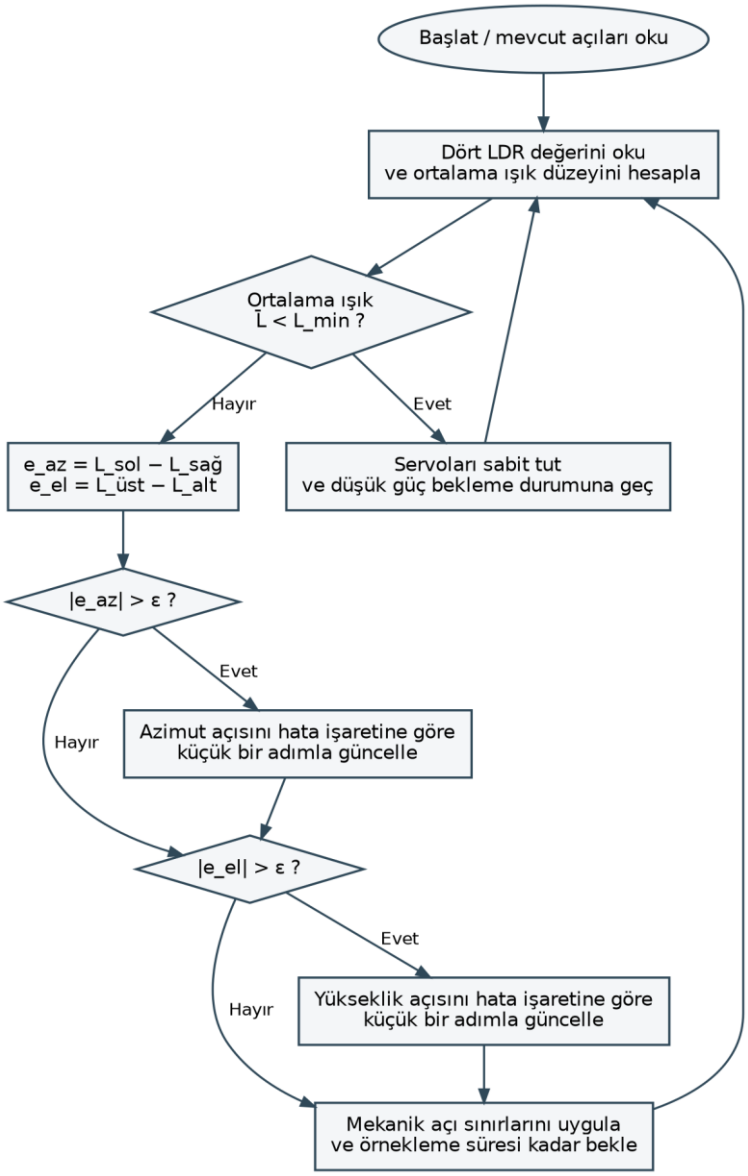
$$e_az = L_sol - L_sağ \quad (5)$$

$$e_el = L_üst - L_alt \quad (6)$$

3.4. Kapalı Çevrim Kontrol Algoritması

Denetleyici her çevrimde dört LDR değerini okuyarak ortalama ışık düzeyini ve iki eksendeki hata sinyallerini hesaplamaktadır. |e_az| veya |e_el| değeri ölü bant eşiği ε'yi aştığında ilgili servo hata işaretine göre küçük bir açısal adımla hareket ettirilir. Hata ölü bant içinde kaldığında servo komutu değiştirilmez. Böylece sensör gürültüsünün neden olduğu ileri-geri hareketlerin ve gereksiz enerji tüketiminin azaltılması amaçlanır. Dört LDR'nin ortalama değeri L_min olarak gösterilen düşük ışık eşiğinin altına düştüğünde sistem panel açısını koruyarak bekleme durumuna geçer. LDR gerilimlerinin ışıkla artıp azalması kullanılan gerilim bölücü yönüne bağlı olduğundan, düşük ışık karşılaştırmasının yazılımda uygun polariteyle gerçekleştirilmesi gerekir. Mevcut deney kayıtlarında ε, L_min, servo adım büyüklüğü ve örnekleme periyodunun sayısal değerleri bulunmamaktadır. Bu nedenle Görsel 3 algoritmanın işlevsel yapısını göstermekte, sayısal kontrol parametreleri ise tekrarlanabilirlik açısından gelecekteki deneylerde ayrıca raporlanması gereken kalibrasyon değişkenleri olarak ele alınmaktadır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 3. LDR tabanlı çift eksenli kontrol algoritmasının işlevsel akış şeması.

3.5. Servo Motor Tork Değerlendirmesi

Yükseklik eksenindeki servo için panel, çerçeve ve sensör modülünün toplam kütlesi m = 0,25 kg; ağırlık merkezinin dönme eksenine en büyük uzaklığı r = 0,05 m kabul edilmiştir. Yerçekimi ivmesi g = 9,81 m/s² alınarak statik moment Denklem (7) ile hesaplanmıştır:

$$T_s = m \cdot g \cdot r = 0{,}25 \times 9{,}81 \times 0{,}05 = 0{,}1226\ \text{N·m} \qquad (7)$$

Statik yük için S_f = 2 emniyet katsayısı kullanıldığında teorik minimum tork gereksinimi:

$$T_{gerekli} = T_s \cdot S_f = 0{,}1226 \times 2 = 0{,}2452\ \text{N·m} \qquad (8)$$

MG996R servo için belirtilen 4,8 V durma torku 0,92 N·m olduğundan, katalog değeri hesaplanan statik gereksinimin yaklaşık 3,75 katıdır. Bu karşılaştırma, servo motorun kabul edilen statik yük altında teorik olarak yeterli olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte durma

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

torku sürekli çalışma torku değildir; azimut ekseninin sürtünmesi, ivmelenme, kablo kuvvetleri, besleme gerilimi düşümü, rüzgâr momenti ve mekanik boşluklar bu basit hesapta yer almamaktadır. Bu nedenle sonuç mekanik kilitlenme riskini ortadan kaldıran kesin bir doğrulama değil, ön boyutlandırma niteliğindedir.

3.6. Enerji Toplama, Depolama ve Kontrol Mimarisi

FV panel çıkışı bir DC-DC gerilim uyarlama kademesi üzerinden BMS korumalı 3S lityum-iyon pil grubuna yönlendirilmekte; ikinci bir DC-DC regülatör kontrol elektroniği ve yük için gerekli gerilim seviyesini sağlamaktadır. BMS'nin temel rolü hücrelerin aşırı şarj, aşırı deşarj ve aşırı akıma karşı korunması ile uygun tasarımda hücre dengelemesidir. BMS'nin tek başına CC-CV şarj kontrolörü veya MPPT işlevi sunduğu varsayılmamıştır. Mevcut kayıtlarda DC-DC dönüştürücülerin marka-modeli, dönüşüm verimleri, pil kapasitesi, başlangıç ve son şarj durumu ile pilde depolanan enerji bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmada "şarj istasyonu verimi" veya "bataryaya aktarılan net enerji" hesaplanmamış; yalnızca panel üretimi ve kontrol sisteminin bildirilen tüketimi üzerinden yardımcı tüketimlere göre düzeltilmiş enerji artışı değerlendirilmiştir.

3.7. Deneysel Karşılaştırma ve Ölçüm Protokolü

Takip sisteminin performansı, aynı 6 W anma gücüne sahip sabit açılı bir referans panelle karşılaştırılmıştır. Mevcut deney kayıtlarında referans panelin bölgesel optimum açıda konumlandırıldığı belirtilmekle birlikte kesin azimut ve eğim açısı kaydedilmemiştir. Ölçümler 08.00-20.00 arasında birer saat arayla alınan gerilim ve akım örneklerinden oluşmaktadır. Her örnek için anlık güç P_k, Denklem (9) ile hesaplanmıştır:

$$P_k = V_k \cdot I_k / 1000 \quad [W] \tag{9}$$

Burada V_k volt, I_k miliamper cinsindedir. Saatlik değerler ilgili bir saatlik aralığın ortalama gücü olarak doğrulanmadığından doğrudan toplanmamıştır. Ardışık anlık güç örnekleri arasındaki enerji, $\Delta t = 1$ saat için trapez yöntemiyle hesaplanmıştır:

$$E = \Sigma[(P_k + P_{(k+1)}) / 2] \cdot \Delta t \tag{10}$$

Sabit ve takip panelinin aynı üretim toleransına sahip olduğu varsayılmıştır; ancak panellerin deney öncesi aynı açı ve aynı elektriksel yük altında çapraz kalibrasyonuna ilişkin kayıt bulunmamaktadır. Ayrıca MPPT kullanımı, bağlı yük karakteristiği, ölçüm cihazı doğruluğu ve örneklerin tam eş zamanlılığı belgelenmemiştir. Bu eksikler sonuçların yalnızca mevcut prototip kayıtları için geçerli karşılaştırmalı bir vaka analizi olarak yorumlanmasını gerektirmektedir.

3.8. Yardımcı Enerji Tüketimi ve Sistem Sınırları

Kontrol elektroniği, sensör köprüleri ve ekran için bildirilen tüketim 7,20 Wh/24 saattir; bu değer ortalama 0,30 W sürekli güce karşılık gelmektedir. Üretim deneyi 12 saat sürdüğünden, test sınırındaki elektronik tüketimi doğrusal ölçekleme varsayımıyla 3,60 Wh olarak alınmıştır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Servo motorların aynı testteki tüketimi yaklaşık 0,19 Wh olarak bildirilmiştir. Böylece 12 saatlik test sınırı için toplam yardımcı tüketim 3,79 Wh'dir. Ayrıca tam günlük otonom işletme açısından daha muhafazakâr bir duyarlılık hesabı yapılmış ve 24 saatlik elektronik tüketimi ile 0,19 Wh motor tüketimi birlikte kullanılmıştır. Bu tüketimler doğrudan bileşen bazlı akım kaydıyla doğrulanmadığı için yardımcı enerji sonuçları "ölçülen net enerji" değil, bildirilen ve tahmini tüketimlere göre düzeltilmiş enerji olarak adlandırılmıştır. Dönüştürücü kayıpları, pil şarj/deşarj kayıpları ve MPPT eksikliği hesaba katılmadığından gerçek uçtan uca enerji dengesi bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

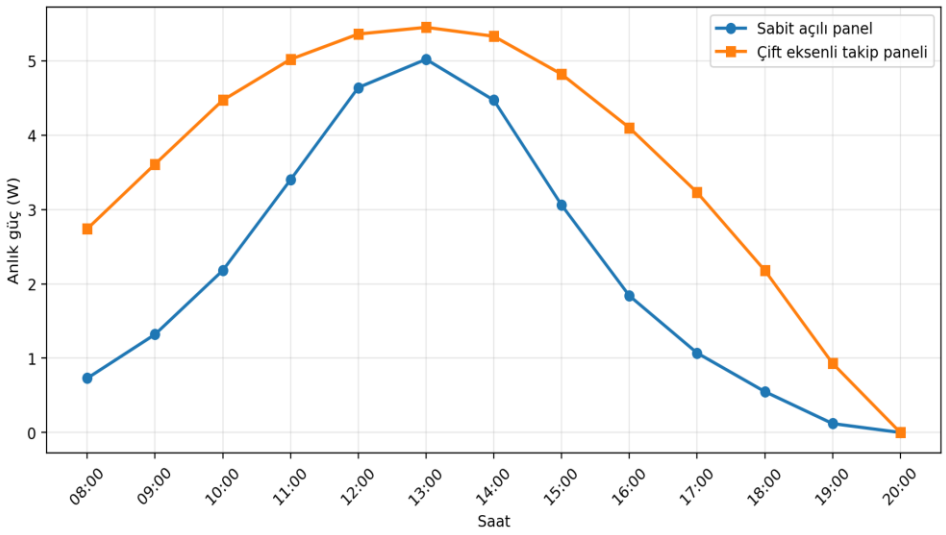
4.1. Saatlik Gerilim, Akım ve Güç Kayıtları

Sabit ve takip panellerine ait mevcut gerilim-akım kayıtları ile bunlardan hesaplanan anlık güç değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Her iki panel de öğle saatlerine doğru daha yüksek güç üretmiş; takip paneli özellikle sabah ve akşam saatlerinde sabit panele göre daha yüksek değerler göstermiştir.

Çizelge 2. Sabit açılı panel ve çift eksenli takip panelinin saatlik ölçüm kayıtları.

Saat	Sabit V (V)	Sabit I (mA)	Sabit P (W)	Takip V (V)	Takip I (mA)	Takip P (W)
08.00	16,2	45	0,73	17,1	160	2,74
09.00	16,5	80	1,32	17,2	210	3,61
10.00	16,8	130	2,18	17,2	260	4,47
11.00	17,0	200	3,40	17,3	290	5,02
12.00	17,2	270	4,64	17,3	310	5,36
13.00	17,3	290	5,02	17,3	315	5,45
14.00	17,2	260	4,47	17,2	310	5,33
15.00	17,0	180	3,06	17,2	280	4,82
16.00	16,7	110	1,84	17,1	240	4,10
17.00	16,4	65	1,07	17,0	190	3,23
18.00	15,8	35	0,55	16,8	130	2,18
19.00	12,0	10	0,12	15,5	60	0,93
20.00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 5. Sabit açılı ve çift eksenli takip panellerinin saatlik anlık güç profilleri.

Sabit panel 13.00'te 5,02 W tepe güce ulaşmış, takip paneli ise aynı saatte 5,45 W üretmiştir. Takip panelinin en belirgin üstünlüğü düşük güneş yüksekliklerinde görülmüştür. Örneğin 08.00'de takip panelinin gücü 2,74 W iken sabit panel 0,73 W; 18.00'de sırasıyla 2,18 W ve 0,55 W üretmiştir. Bu sonuç, takip mekanizmasının tepe gücü sınırlı ölçüde artırmaktan çok yüksek güç üretim süresini günün daha geniş bölümüne yaydığını göstermektedir. Bununla birlikte güç farkının tamamı yalnızca yönlendirme etkisine atfedilemez. Panel üretim toleransı, sıcaklık farkı, elektriksel yük veya dönüştürücü çalışma noktası ve sensör ölçüm belirsizliği kaydedilmediğinden, sonuçlar aynı günün mevcut ölçüm koşulları için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

4.2. Brüt Enerji Artışının Yeniden Hesaplanması

Anlık güç değerleri birer saat aralıkla kaydedildiği için enerji, güç-zaman eğrisinin trapez yaklaşımıyla integrasyonu sonucunda elde edilmiştir. Bu yöntemle sabit panel enerjisi 28,035 Wh, takip paneli enerjisi 45,870 Wh ve brüt enerji farkı 17,835 Wh olarak hesaplanmıştır. Brüt enerji artışı:

$$K_brüt = [(45{,}870 - 28{,}035) / 28{,}035] \times 100 = \%63{,}62 \qquad (11)$$

Önceki doğrudan toplama yaklaşımı, 13 anlık güç değerini 13 adet bir saatlik ortalama güç gibi değerlendirdiği için sabit paneli 28,40 Wh ve takip panelini 47,24 Wh olarak vermekteydi. Anlık örnekler için uygun trapez integrasyonu kullanıldığında her iki enerji değeri ve brüt kazanç oranı düzeltilmiştir. Test süresindeki ortalama güç sabit panel için 2,336 W, takip paneli için 3,823 W olmuştur.

4.3. Yardımcı Tüketimler ve Düzeltilmiş Enerji Artışı

Aynı 12 saatlik deney sınırında kontrol elektroniğinin tüketimi 3,60 Wh, motor tüketimi 0,19 Wh ve toplam yardımcı tüketim 3,79 Wh olarak alınmıştır. Takip panelinin yardımcı tüketimlere göre düzeltilmiş enerjisi 42,080 Wh'dir. Buna göre:

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

$$K_düz,12h = [(42,080 - 28,035) / 28,035] \times 100 = \%50,10 \qquad (12)$$

12 saatlik sınırda yardımcı tüketim, takip panelinin brüt üretiminin %8,26'sına ve brüt enerji farkının %21,25'ine karşılık gelmektedir. Bu hesapta motor enerjisinin toplam yardımcı tüketimdeki payı yaklaşık %5,01'dir. Düşük motor enerjisi ölü bantlı kontrolle uyumludur; ancak ölü bant kullanılmayan bir kontrol senaryosu ölçülmediğinden enerji tasarrufunun doğrudan ölü banda atfedilmesi mümkün değildir. Tam günlük otonom işletme açısından 7,20 Wh elektronik tüketimin tamamı ve 0,19 Wh motor tüketimi brüt üretimden düşürüldüğünde düzeltilmiş enerji 38,480 Wh, sabit panele göre artış ise %37,26 olmaktadır.

Çizelge 3. Trapez integrasyonu ve farklı yardımcı tüketim sınırlarına göre enerji bilançosu.

Değerlendirme sınırı	Sabit panel enerjisi (Wh)	Takip paneli brüt enerjisi (Wh)	Takip paneli düzeltilmiş enerjisi (Wh)	Sabit panele göre artış (%)
Brüt üretim, 12 saat	28,035	45,870	45,870	63,62
12 saatlik yardımcı tüketim: 3,60 + 0,19 Wh	28,035	45,870	42,080	50,10
24 saatlik elektronik + test motor tüketimi: 7,20 + 0,19 Wh	28,035	45,870	38,480	37,26

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada dört LDR'li diferansiyel sensör, Arduino Uno denetleyici ve iki MG996R servo motor kullanılarak çift eksenli bir güneş takip prototipi tasarlanmış ve mevcut tek günlük saha kayıtları yeniden analiz edilmiştir. Mekanik ön boyutlandırma, yükseklik ekseni servosunun kabul edilen statik yük ve emniyet katsayısı altında teorik olarak yeterli tork kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Saatlik anlık güç örneklerinin trapez integrasyonu sonucunda sabit panel için 28,035 Wh, takip paneli için 45,870 Wh enerji ve %63,62 brüt artış hesaplanmıştır. Kontrol elektroniğinin 12 saatlik eşdeğer tüketimi ile tahmini motor tüketimi aynı test sınırında çıkarıldığında takip enerjisi 42,080 Wh ve sabit panele göre artış %50,10 olmuştur. Elektroniğin 24 saatlik tüketiminin tamamının hesaba katıldığı muhafazakâr günlük sınırda artış %37,26'dır.

Gelecek çalışmalarda (i) sabit ve takip panellerinin aynı açı ve aynı yük altında ön kalibrasyonu, (ii) eş zamanlı ve daha kısa örnekleme aralıklı veri kaydı, (iii) piranometre veya referans hücre ile ışınım ve panel sıcaklığı ölçümü, (iv) azimut-yükseklik açısal takip hatası ve yerleşme süresinin belirlenmesi, (v) bileşen bazlı akım ölçümüyle gerçek yardımcı enerji hesabı, (vi) DC-DC ve 3S CC-CV şarj verimlerinin ölçülmesi, (vii) çok günlü ve mevsimsel testler ile istatistiksel belirsizlik analizi ve (viii) astronomik konum hesabı ile LDR geri beslemesini birleştiren hibrit kontrol önerilmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Raporu, Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022.

[2] Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., Sharifi, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13,8, 1800-1818, 2009.

[3] Abdallah, S. The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics, Energy Conversion and Management, 45,11-12, 1671-1679, 2004.

[4] Roth, P., Georgiev, A., Boudinov, H. Design and construction of a system for sun-tracking, Renewable Energy, 29,3, 393-402, 2004.

[5] Wang, J.-M., Lu, C.-L. Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system, Sensors, 13,3, 3157-3168, 2013.

[6] El Hammoumi, A., Motahhir, S., El Ghzizal, A., Chalh, A., Derouich, A. A simple and low-cost active dual-axis solar tracker, Energy Science & Engineering, 6,5, 607-620, 2018.

[7] Singh, P., Pahuja, R., Karwasra, M., Beniwal, S., Bansal, M., Dadhich, A. Dual axis solar tracking system for solar panel, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 5,4, 403-411, 2016.

[8] Hadroug, N., Iratni, A., Hafaifa, A., Boudjemline, A., Alshammari, O. S., Jerbi, H., Chen, X. Energy efficiency improvement in photovoltaic installation using a twin-axis solar tracking mechanism with LDR sensors compared with neuro-fuzzy adaptive inference structure, Journal of Electrical Engineering & Technology, 18, 2943-2967, 2023.

[9] Kelly, N. A., Gibson, T. L. Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system, Solar Energy, 83,11, 2092-2102, 2009.

[10] Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., Chow, M. Y. Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles, IEEE Industrial Electronics Magazine, 7,2, 4-16, 2013.

[11] Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., Mohamed, A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 834-854, 2017.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

VITALUMOS: AN STM32-BASED PORTABLE BIOMEDICAL DATA MEASUREMENT SYSTEM

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN

Samsun Üniversitesi, ahmet.turan@samsun.edu.tr - ORCID ID: 0000-0001-5653-9695

Rumeysa İRKİN

Samsun Üniversitesi, 221117020@samsun.edu.tr - ORCID ID: 0009-0001-4929-7525

ABSTRACT

In hospital emergency and triage departments, increasing patient volume and the manual measurement of basic vital signs (such as pulse oximeters, thermometers, and blood pressure cuffs) with separate devices lead to critical time losses and data inconsistencies; furthermore, most existing commercial devices do not support wireless data transmission or integration into digital systems.

This study focuses on the development of VitaLumos, a portable and low-cost biomedical measurement system built on the STM32F407 microcontroller. To overcome these problems, VitaLumos integrates the MAX30100 photoplethysmography (PPG) sensor for fingertip heart rate (BPM) and blood oxygen saturation (SpO_2) measurement, the LM35DZ analog temperature sensor for body temperature measurement, the SSD1306 OLED display for real-time visualization, and the HM-10 Bluetooth Low Energy (BLE) module for wireless data transmission.

The study; The project encompasses four main stages: hardware design, software development, PCB manufacturing, and validation tests. The software, developed in C language within the STM32CubeIDE environment, includes a moving average filter, exponential moving average (EMA) filter, dynamic thresholding algorithm, and IQR-based outlier filtering to improve measurement stability. The dual-layer PCB was designed in the Proteus 8 environment and manufactured using an LPKF S63 milling machine. System validation was performed using a comparative BPM test of 100 measurements on healthy volunteers aged 22–34, in a resting state, using a Huawei Watch 4 smartwatch as a reference. According to the validation results, the mean absolute error (MAE) was found to be 2.38 BPM, and the standard deviation was 2.00 BPM; 78% of the measurements remained within the ±3 BPM error limit. These values demonstrate that the developed system has a performance level suitable for preliminary assessment in triage areas. In conclusion, VitaLumos demonstrates that an integrated, multi-parameter biomedical measurement platform with wireless data transmission can be developed as a low-cost engineering prototype; when supported by clinical validation and certification processes, the system is envisioned to be evaluated not as a standalone diagnostic tool, but as a supporting tool aimed at accelerating triage.

Keywords: Biomedical instrumentation, Portable health monitoring, STM32, Photoplethysmography, Pulse oximetry, Bluetooth Low Energy.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

VİTALUMOS: STM32 TABANLI TAŞINABİLİR BİYOMEDİKAL VERİ ÖLÇÜM SİSTEMİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN
Samsun Üniversitesi, ahmet.turan@samsun.edu.tr - ORCID ID: 0000-0001-5653-9695
Rumeysa İRKİN
Samsun Üniversitesi, 221117020@samsun.edu.tr - ORCID ID: 0009-0001-4929-7525

ÖZET

Hastanelerin acil servis ve triyaj bölümlerinde artan hasta yoğunluğu ve temel yaşam bulgularının (nabız oksimetresi, termometre, manşonlu tansiyon aleti gibi) ayrı ayrı cihazlarla manuel olarak ölçülmesi, kritik zaman kayıplarına ve veri tutarsızlıklarına yol açmaktadır; ayrıca mevcut ticari cihazların büyük bölümü kablosuz veri aktarımını veya dijital sistemlere entegrasyonu desteklememektedir.

Bu çalışma, STM32F407 mikrodenetleyicisi üzerine inşa edilmiş, taşınabilir ve düşük maliyetli bir biyomedikal ölçüm sistemi olan VitaLumos'un(Bu şekilde isimlendirdik) geliştirilmesini konu almaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla VitaLumos; parmak ucundan kalp atış hızı (BPM) ve kandaki oksijen satürasyonu (SpO_2) ölçümü için MAX30100 fotopletismografi (PPG) sensörünü, vücut sıcaklığı ölçümü için LM35DZ analog sıcaklık sensörünü, gerçek zamanlı görüntüleme için SSD1306 OLED ekranı ve kablosuz veri iletimi için HM-10 Bluetooth Low Energy (BLE) modülünü entegre etmektedir. Çalışma; donanım tasarımı, yazılım geliştirme, PCB üretimi ve doğrulama testleri olmak üzere dört ana aşamayı kapsamaktadır.STM32CubeIDE ortamında C diliyle geliştirilen yazılıma; ölçüm kararlılığını artırmak amacıyla hareketli ortalama filtresi, üstel hareketli ortalama (EMA) filtresi, dinamik eşikleme algoritması ve IQR tabanlı aykırı değer (outlier) filtreleme eklenmiştir. Çift katmanlı PCB, Proteus 8 ortamında tasarlanmış ve LPKF S63 kazıma makinesiyle üretilmiştir. Sistemin doğrulanması, sağlıklı 22–34 yaş arası gönüllüler üzerinde, dinlenme halinde, Huawei Watch 4 akıllı saati referans alınarak gerçekleştirilen 100 ölçümlük karşılaştırmalı bir BPM testiyle yapılmıştır.

Doğrulama sonuçlarına göre ortalama mutlak hata (MAE) 2,38 BPM, standart sapma 2,00 BPM olarak bulunmuş; ölçümlerin %78'i ±3 BPM hata sınırı içinde kalmıştır. Bu değerler, geliştirilen sistemin triyaj bölgelerinde ön değerlendirme amacıyla kullanılabilecek bir performans düzeyinde olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak VitaLumos, entegre, çok parametreli ve kablosuz veri iletimine sahip bir biyomedikal ölçüm platformunun düşük maliyetle bir mühendislik prototipi olarak geliştirilebileceğini göstermektedir; klinik doğrulama ve sertifikasyon süreçleriyle desteklendiğinde, sistemin bağımsız bir tanı aracı değil, triyaj hızlandırma amaçlı destekleyici bir araç olarak değerlendirilmesi öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyomedikal enstrümantasyon, Taşınabilir sağlık izleme, STM32, Fotopletismografi, Nabız oksimetrisi, Bluetooth Low Energy.

1. GİRİŞ

Hastanelerin acil servis ve triyaj bölümlerinde hasta yoğunluğunun giderek artması, temel yaşam bulgularının hızlı ve güvenilir biçimde ölçülmesini kritik bir ihtiyaç hâline getirmektedir. Standart bir triyaj uygulamasında nabız oksimetresi, termometre ve manşonlu tansiyon aleti gibi cihazlar birbirinden bağımsız olarak kullanılmakta; bu durum özellikle hasta yoğunluğunun arttığı dönemlerde kayıt gecikmelerine ve veri tutarsızlıklarına neden olmaktadır. Acil servis yükünün giyilebilir, çok sensörlü

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

uzaktan hasta izleme sistemleriyle azaltılabileceği güncel çalışmalarda da vurgulanmıştır (Rrmoku, 2025). Pulse oksimetrenin klinik pratikte doğru ve güvenilir biçimde kullanılabilmesi için gerekli hususlar literatürde ayrıntılı biçimde tartışılmış (Akansel & Yıldız, 2010) ve bu cihazların pediatrik izlemden yoğun bakıma kadar geniş bir yelpazede hemşirelik uygulamalarının ayrılmaz bir parçası olduğu vurgulanmıştır (Çelik, 2020; Suzan & Çınar, 2019).

Bunun yanı sıra, mevcut ticari cihazların büyük bölümü kablosuz veri aktarımına izin vermemekte; ölçüm sonuçları dijital sistemlere entegre edilememektedir. Uzaktan izlenebilir hasta parametreleri üzerine yapılan çalışmalar, kablosuz veri iletiminin sağlık takibinde sunduğu esnekliğe dikkat çekmiş (Kuzu vd., 2017), mikrodenetleyici tabanlı parmak ucu nabız ölçüm devrelerinin düşük maliyetli ve erişilebilir çözümler sunabileceği gösterilmiştir (Öter vd., 2016). Benzer şekilde, MAX30100 ve MAX32664 gibi entegre biyometrik sensör hub'larının kullanıldığı pulse oksimetre tasarımları da, bu tür sensörlerin taşınabilir cihazlarda güvenilir biçimde uygulanabileceğini ortaya koymaktadır (Aydın & Özhan, 2017; Duru & Ay, 2022). Oksijen satürasyonunun değerlendirilmesinde pulse oksimetre kullanımına ilişkin daha genel bir bakış ise, bu ölçüm yönteminin sağlık hizmetlerindeki merkezi rolünü teyit etmektedir (Hakverdioğlu, 2007). Temassız ve giyilebilir çok parametreli yaşamsal bulgu izleme sistemlerine yönelik güncel derlemeler de, tekli parametre ölçen klasik yaklaşımlardan çok-modlu ve entegre sistemlere doğru bir dönüşüm olduğunu ortaya koymaktadır (Hassanpour & Yang, 2025).

Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla bu çalışmada, STM32F407 mikrodenetleyicisi tabanlı taşınabilir bir biyomedikal ölçüm sistemi (VitaLumos) geliştirilmiştir. Sistem; MAX30100 optik sensörü aracılığıyla parmak ucundan kalp atış hızı (BPM) ve kandaki oksijen satürasyonu (SpO_2) ölçümü, LM35DZ analog sıcaklık sensörü ile vücut sıcaklığı ölçümü gerçekleştirmektedir. Ölçüm sonuçları SSD1306 OLED ekranda gerçek zamanlı olarak görüntülenmekte; HM-10 BLE modülü üzerinden ise kablosuz veri iletim altyapısı oluşturulmuştur. Hastane ortamlarında giyilebilir sensörlerle sürekli yaşamsal bulgu izlemenin, hemşire gözlemlerine kıyasla kabul edilebilir bir güvenilirlik sunduğu yakın zamanlı bir çalışmada da gösterilmiştir (Joshi vd., 2025).

Bu çalışmanın temel amacı, parmak ucundan nabız ölçümü yapabilen, kan oksijen seviyesini ve vücut sıcaklığını ölçebilen, aynı zamanda tüm bu verileri kablosuz olarak aktarabilen taşınabilir bir cihaz geliştirmektir. Mevcut nabız ölçüm cihazlarının genellikle yalnızca tek bir parametreyi ölçmesi ve taşınabilirlik ya da doğruluk açısından sınırlamalara sahip olması, bu çalışmanın ele aldığı temel boşluğu oluşturmaktadır; VitaLumos, daha fazla veriyi entegre bir şekilde ölçebilme yeteneğiyle bu boşluğu gidermeyi hedeflemektedir.

Çalışmanın kapsamı; donanım tasarımı ve bileşen seçimi, breadboard üzerinde prototip doğrulama, STM32CubeIDE ortamında yazılım geliştirme, PCB tasarımı ve üretimi ile doğrulama testleri olmak üzere dört ana aşamayı içermektedir. Çalışma, klinik bir tanı cihazı geliştirmekten çok, mühendislik prototipleme ve sistem entegrasyonu niteliği taşımaktadır; düşük maliyetli, çok parametreli ve genişletilebilir bir biyomedikal ölçüm platformu geliştirme açısından somut bir mühendislik deneyimi sunmakta ve bu alandaki ticari boşluğa yönelik özgün bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

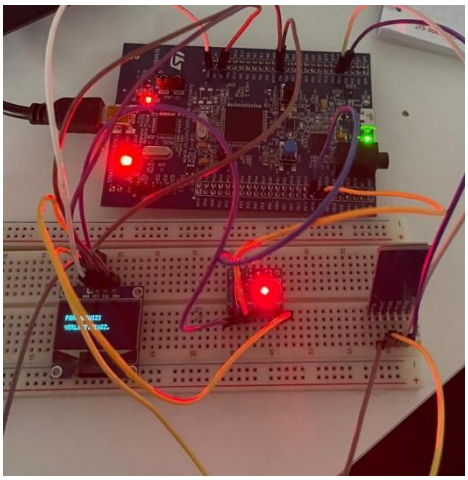
2. MATERYAL ve METOT

2.1. Donanım Tasarımı ve Bileşen Seçimi

Çalışmanın ilk aşamasında sistem gereksinimleri belirlenerek uygun bileşenler seçilmiştir. Merkezi işlem birimi olarak STM32F407 mikrodenetleyicisi tercih edilmiştir; bu tercih, kartın çoklu I^2C/UART

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

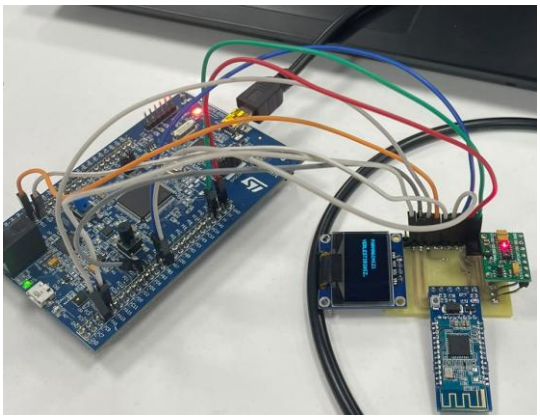
çevre birimi desteği ve gerçek zamanlı sinyal işleme için yeterli işlem gücü sunması nedeniyle yapılmıştır. Kalp atış hızı ve SpO_2 ölçümü için MAX30100 PPG sensörü, vücut sıcaklığı için LM35DZ analog sensör, görsel arayüz için SSD1306 OLED ekran ve kablosuz iletişim için HM-10 BLE modülü sisteme entegre edilmiştir. STM32 tabanlı mikrodenetleyicilerin kan oksijeni, kalp atış hızı ve benzeri biyomedikal parametrelerin ölçümünde güvenilir bir donanım altyapısı sunduğu güncel çalışmalarda da gösterilmiştir (Jin vd., 2024; Guan, 2024). Çoklu sensörlerin tek bir taşınabilir platformda birleştirilmesi yaklaşımı, yakın zamanda geliştirilen benzer giyilebilir yaşamsal bulgu izleme sistemleriyle de örtüşmektedir (Ma vd., 2024). Bileşenler arası haberleşmede I^2C ve UART protokolleri kullanılmıştır. Tüm bileşenler ilk aşamada breadboard üzerinde bir araya getirilmiş ve temel işlevsellik doğrulanmıştır. Bu aşamada sensör sürücüleri, OLED ekran kontrolü, BLE modülü haberleşmesi ve temel ölçüm döngüsü test edilmiştir. Breadboard aşaması, PCB üretimine geçilmeden önce olası tasarım hatalarının düşük maliyetle tespit edilmesini sağlamıştır. Şekil 1'de devre şeması bord üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1. VitaLumos breadboard prototip aşaması — STM32F407, MAX30100, LM35DZ, SSD1306 OLED ve HM-10 BLE modülünün breadboard üzerindeki ilk kurulumu

Proteus 8 ortamında hazırlanan şematik ve PCB tasarımı, LPKF S63 PCB kazıma makinesiyle üretilmiştir. Çift katmanlı PCB yapısı kullanılmış; iz genişlikleri optimize edilerek kısa devre riskleri giderilmiştir. Üretilen kart süreklilik (continuity) testinden geçirilmiş, bileşenler el ile lehimlenerek yerleştirilmiştir. PCB'ye geçiş, breadboard aşamasında gözlemlenen kablo kaynaklı sinyal gürültüsünü azaltarak ölçüm tekrarlanabilirliğini artırma amacı taşımaktadır. LM35DZ'nin temas tabanlı sıcaklık ölçüm yaklaşımı, düşük maliyetli giyilebilir sıcaklık sensörlerinin doğruluğunu ve sınırlılıklarını inceleyen güncel çalışmalarla da tutarlıdır (Mata-Romero vd., 2024). Şekil 2'de sensörler arası bağlantılardan gürültü eklenmesini engellemek için bir PCB üzerine yerleştirilmiş devre yapısı görülmektedir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Şekil 2. PCB üzerine yerleştirilmiş sensörlerden oluşan devre.

2.2 Yazılım Geliştirme ve Sinyal İşleme

Tüm sensör sürücüleri ve sinyal işleme algoritmaları STM32CubeIDE ortamında C diliyle sıfırdan geliştirilmiştir. Ham PPG sinyali, hareket artefaktları ve ortam ışığı kaynaklı gürültü içerdiğinden, yazılım geliştirme sürecinde sinyal kararlılığını artırmak amacıyla hareketli ortalama filtresi, üstel hareketli ortalama (EMA) filtresi ve dinamik eşikleme algoritması geliştirilip uygulanmıştır. PPG sinyallerindeki hareket artefaktlarının, giyilebilir cihazlarda kalp atış hızı tahmininin doğruluğunu etkileyen en önemli gürültü kaynağı olduğu ve bu artefaktların uyarlanabilir filtreleme yaklaşımlarıyla önemli ölçüde bastırılabileceği literatürde vurgulanmıştır (Al-Sheikh, 2023); benzer şekilde, giyilebilir cihazlardan elde edilen nabız hızı değişkenliğinin kalitesinin uyarlanabilir, spektral ve doğrusal olmayan filtreleme teknikleriyle artırılabileceği gösterilmiştir (Prucnal vd., 2025). Bunun yanı sıra, IQR (çeyrekler arası aralık) tabanlı aykırı değer (outlier) filtreleme ve çift I²C veri yolu mimarisi de sisteme entegre edilen önemli optimizasyonlar arasında yer almıştır. Bu optimizasyonların temel amacı, parmak hareketinden veya sensöre uygulanan basınç değişiminden kaynaklanan hatalı tepe (peak) tespitlerinin BPM hesaplamasına yansımasını engellemektir.

Sistemin BPM ölçüm doğruluğu, Huawei Watch 4 akıllı saati referans alınarak gerçekleştirilen 100 ölçümlük karşılaştırmalı bir test ile değerlendirilmiştir. Akıllı saatlerin klinik ortamlarda referans veya karşılaştırma cihazı olarak kullanılması, literatürde giderek yaygınlaşan bir doğrulama yaklaşımıdır; nitekim akıllı saat tabanlı nabız oksimetrisinin hastane ortamında hastalar üzerinde referans cihazlarla karşılaştırılması (Rajakariar vd., 2024) ve Apple Watch'ın oksijen satürasyonu ölçümlerinin kan gazı analizine kıyasla değerlendirilmesi (Arslan vd., 2024) benzer metodolojiler izlemektedir. Bilek tipi kalp atış hızı monitörlerinin doğruluğunun; egzersiz yoğunluğu, cihaz yerleşimi ve bireysel faktörlere bağlı olarak değiştiği kapsamlı bir derlemede de ortaya konmuştur (Paluch vd., 2024). Testler; sağlıklı, 22–34 yaş arası bireyler üzerinde, dinlenme halinde (oturur pozisyonda) ve kontrollü ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu test tasarımı, sistemin gündelik/klinik-öncesi kullanım koşullarına yakın, tekrarlanabilir bir doğrulama ortamı sağlamak amacıyla seçilmiştir.

3. BULGULAR

3.1 BPM Ölçüm Doğruluğu

100 BPM ölçümünden elde edilen istatistiksel değerlendirme sonuçlarına göre; ortalama mutlak hata (MAE) 2,38 BPM, standart sapma 2,00 BPM olarak bulunmuş ve ölçümlerin %78'i ±3 BPM hata sınırı içinde kalmıştır. Bu değerler, geliştirilen sistemin triyaj bölgelerinde ön değerlendirme amacıyla kullanılabilecek bir performans düzeyinde olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen MAE değeri, hastane ortamında akıllı saat tabanlı nabız oksimetrisi doğrulamalarında bildirilen hata düzeyleriyle

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

(Rajakariar vd., 2024) ve düşük maliyetli giyilebilir sensörlerin doğruluk değerlendirmelerinde rapor edilen bulgularla (Pereira Filgueiras vd., 2025) karşılaştırılabilir niteliktedir. Tablo 1, doğrulama testi sonuçlarını özetlemektedir.

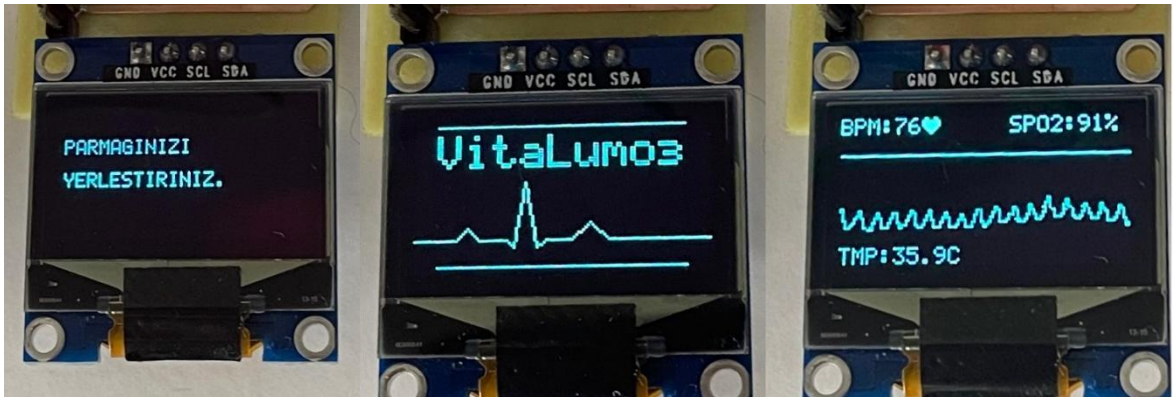
Tablo 1. BMP doğrulama testi sonuçları

Ölçüt	**Değer**
Ölçüm sayısı (n)	100
Ortalama mutlak hata (MAE)	2,38 BPM
Standart sapma	2,00 BPM
±3 BPM sınırı içinde kalan ölçüm oranı	%78
Referans cihaz	Huawei Watch 4
Test popülasyonu	22–34 yaş, sağlıklı, dinlenme hâlinde

3.2 SpO_2 Ölçüm Tutarlılığı

SpO_2 ölçümlerinde de sınırlı değişkenlik aralığı içinde tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Ölçümler, dinlenme hâlindeki sağlıklı bireylerde beklenen fizyolojik aralıkla (~%95–100) uyumlu bir dağılım göstermiştir; ancak SpO_2 doğruluğu için ayrı bir referans cihazla sistematik karşılaştırma bu aşamada gerçekleştirilmemiştir.

Çalışmada kullanılan yazılım optimizasyonları (EMA filtresi, dinamik eşikleme, IQR tabanlı aykırı değer giderme) ölçüm kararlılığı üzerinde olumlu etkiler sağlamıştır. Özellikle IQR tabanlı filtreleme, parmak hareketinden kaynaklanan ani sinyal sıçramalarının BPM hesaplamasını bozmasını büyük ölçüde engellemiştir. Bu bulgu, ham PPG sinyalinin doğrudan işlenmesi yerine çok katmanlı bir filtreleme zincirinin kullanılmasının, düşük maliyetli sensörlerle dahi kabul edilebilir bir ölçüm kararlılığı elde edilebileceğini göstermektedir. Şekil 4'de OLED ekranda ölçüm süreci ve sonuçlar için yapılan tasarım görülmektedir.



Şekil *3.* OLED ekran arayüzü*:* açılış ekranı, gerçek zamanlı ölçüm ekranı

Veri aktarımı için; BLE haberleşme altyapısı başarıyla kurulmuş olup gerçek zamanlı mobil veri gösterimi sağlanmıştır. Sistem, breadboard prototip aşamasından PCB üretimine kadar eksiksiz biçimde hayata geçirilmiş; STM32F407 mikrodenetleyicisi, MAX30100 sensörü, LM35DZ sıcaklık sensörü, SSD1306 OLED ekran ve HM-10 BLE modülünden oluşan bütünleşik bir taşınabilir ölçüm sistemi (VitaLumos) geliştirilmiştir. Sistemin modüler mimarisi, gelecekteki geliştirme aşamalarında (örn. ek sensör entegrasyonu veya mobil uygulama geliştirme) tamamlanmak üzere tasarlanmıştır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

4.TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma, parmak ucundan kalp atış hızı, kan oksijeni ve vücut sıcaklığını ölçebilen ve tüm bu verileri kablosuz olarak aktarabilen taşınabilir bir biyomedikal ölçüm sistemi (VitaLumos) geliştirilmesini konu edinmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, mikrodenetleyici tabanlı parmak ucu nabız ölçüm devrelerinin (Öter vd., 2016) ve MAX30100/MAX32664 gibi entegre sensörler kullanılarak geliştirilen pulse oksimetre tasarımlarının (Aydın & Özhan, 2017; Duru & Ay, 2022) genellikle tek bir parametreye (nabız veya SpO_2) odaklandığı ve çoğunlukla kablosuz veri aktarımı sunmadığı görülmektedir. VitaLumos, bu çalışmalardan farklı olarak nabız, oksijen satürasyonu ve vücut sıcaklığını tek bir platformda birleştirmekte; HM-10 BLE modülü aracılığıyla gerçek zamanlı kablosuz veri iletimi sağlayarak dijital sistemlere entegrasyon potansiyeli sunmaktadır. BLE teknolojisinin düşük güç tüketimi ve IoT ekosistemine entegrasyon kolaylığı, güncel derlemelerde de giyilebilir sağlık cihazları için tercih edilen bir kablosuz iletişim standardı olarak öne çıkarılmaktadır (Koulouras vd., 2025; Guo vd., 2024).

Sistemin BPM ölçüm doğruluğuna ilişkin bulgular (MAE 2,38 BPM, %78 ölçümün ±3 BPM sınırı içinde kalması), literatürde pulse oksimetre güvenilirliği için vurgulanan temel hususlarla (Akansel & Yıldız, 2010) karşılaştırılabilir düzeyde bir performans ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut sınırlılıklar arasında MAX30100 sensörünün hareket artefaktlarına karşı hassasiyeti, LM35DZ'nin temas tabanlı yapısı nedeniyle çevre koşullarından etkilenebilmesi ve sistemin henüz CE/FDA sertifikasyonuna sahip olmaması sayılabilir. Bu kısıtlamalar göz önünde bulundurulduğunda, VitaLumos doğrudan bir klinik karar verme aracı olarak değil, destekleyici bir ön izleme ve triyaj hızlandırma aracı olarak değerlendirilmelidir; bu değerlendirme, pulse oksimetrenin pediatrik ve yoğun bakım gibi farklı klinik ortamlarda oynadığı destekleyici role ilişkin bulgularla (Suzan & Çınar, 2019; Çelik, 2020) ve hastanede giyilebilir sensörlerin nöbetçi hemşire gözlemlerini tamamlayıcı bir araç olarak konumlandırılması gerektiğine dair güncel bulgularla da (Joshi vd., 2025) örtüşmektedir.

Tüm bu bulgular ışığında VitaLumos, düşük maliyetli, çok parametreli ve genişletilebilir bir biyomedikal ölçüm platformu geliştirme açısından somut bir mühendislik deneyimi sunmuş ve bu alandaki ticari boşluğa yönelik özgün bir katkı sağlamıştır. Sistem, breadboard prototip aşamasından PCB üretimine kadar eksiksiz biçimde hayata geçirilmiş olup gerçek zamanlı kablosuz veri gösterimi başarıyla kurulmuştur. İlerleyen süreçte, profesyonel klinik testler, daha geniş ve çeşitli bir katılımcı popülasyonuyla doğrulama çalışmaları, SpO_2 doğruluğunun referans bir cihazla sistematik karşılaştırılması ve CE/FDA sertifikasyon sürecine yönelik adımlarla sistemin etkisi daha geniş ölçekte değerlendirilecektir. VitaLumos'un mevcut haliyle bile, triyaj bölgelerinde hızlandırılmış ön değerlendirme ihtiyacına yanıt verebilecek güçlü bir temel sunduğu söylenebilir.

KAYNAKÇA

Akansel, N., & Yıldız, H. (2010). Pulse oksimetre değerlerinin güvenilir olması için neleri bilmeliyiz? Türkiye Klinikleri Anesteziyoloji Reanimasyon Dergisi, 8(1), 44-48.

Al-Sheikh, B. (2023). Adaptive algorithm for motion artifacts removal in wearable biomedical sensors during physical exercise. IEEE Sensors Journal, 23(9), 9491–9499. https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3256959

Arslan, B., Sener, K., Guven, R., Kapci, M., Korkut, S., Sutasir, M. N., & Tekindal, M. A. (2024). Accuracy of the Apple Watch in measuring oxygen saturation: Comparison with pulse oximetry and ABG. Irish Journal of Medical Science, 193(1), 477–483. https://doi.org/10.1007/s11845-023-03456-w

Aydın, G. B., & Özhan, O. (2017, 16 Mayıs). Pulse oksimetre tasarım ve analizinin yapılması [Bildiri]. 2. Ulusal Biyomedikal Cihaz Tasarımı ve Üretimi Sempozyumu.

Çelik, S. (2020). Pulse oksimetre ile oksijen satürasyonu izlemi ve hemşirelik yaklaşımları. Sağlık ve Toplum, 30(2), 11-15.

Duru, C., & Ay, A. N. (2022). MAX32664 ultra düşük güçlü biyometrik sensör ile parmak tipi pulse oksimetre tasarımı [Sözlü bildiri]. Kocatepe Mühendislik Bilimleri Öğrenci Sempozyumu.

Guan, W. (2024). An electrocardiogram monitoring device based on STM32 (arXiv:2411.06962). arXiv. https://arxiv.org/abs/2411.06962

Guo, N., Chen, Z., Xu, H., Liu, Y., Zhao, Z., & Xu, S. (2024). WMLinks: Wearable smart devices and mobile phones linking through Bluetooth Low Energy (BLE) and WiFi signals. Electronics, 13(16), 3268. https://doi.org/10.3390/electronics13163268

Hakverdioğlu, G. (2007). Oksijen saturasyonunun değerlendirilmesinde pulse oksimetre kullanımı. Cumhuriyet Üniversitesi Hemşirelik Yüksekokulu Dergisi, 11(3), 45-49.

Hassanpour, A., & Yang, B. (2025). Contactless vital sign monitoring: A review towards multi-modal multi-task approaches. Sensors, 25(15), 4792. https://doi.org/10.3390/s25154792

Jin, L., Mo, X., Lin, F., Ling, Z., Chen, Z., Wei, G., & Zhu, F. (2024). Design and implementation for the blood oxygen and heart rate based on STM32. Proceedings of SPIE, 13220, 1322013. https://doi.org/10.1117/12.3039411

Joshi, M., Iqbal, F. M., Sharabiani, M., Ashrafian, H., Arora, S., McAndrew, K., Khan, S., Cooke, G., & Darzi, A. (2025). Performance of continuous digital monitoring of vital signs with a wearable sensor in acute hospital settings. Sensors, 25(9), 2644. https://doi.org/10.3390/s25092644

Kaynakçı, M. Ş. (2006). Ters iyontoforez yöntemiyle non-invazif kan şekeri ölçümü [Yayımlanmamış doktora tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Koulouras, G., Katsoulis, S., & Zantalis, F. (2025). Evolution of Bluetooth technology: BLE in the IoT ecosystem. Sensors, 25(4), 996. https://doi.org/10.3390/s25040996

Kuzu, M., Taş, O., & Tulum, G. (2017). Uzaktan izlenebilir hasta parametreleri sistemi.

Ma, Y., Li, H., Huang, L., Ji, S., & Li, H. (2024). Research on a multi-sensor-based wearable system for monitoring infant vital signs. 2024 4th International Conference on Industrial Automation, Robotics and Control Engineering (IARCE), 118–122. https://doi.org/10.1109/IARCE64300.2024.00030

Mata-Romero, M. E., Simental-Martínez, O. A., Guerrero-Osuna, H. A., Luque-Vega, L. F., Lopez-Neri, E., Ornelas-Vargas, G., Castañeda-Miranda, R., Martínez-Blanco, M. D. R., Nava-Pintor, J. A., & García-Vázquez, F. (2024). A low-cost wearable device to estimate body temperature based on wrist temperature. Sensors, 24(6), 1944. https://doi.org/10.3390/s24061944

Öter, E., Demir, A. A., & Coşkun, Ö. (2016). Mikrodenetleyici temelli parmak ucundan nabız ölçer devresi tasarımı. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 4(2), 87-92.

Paluch, K., Szypuła, Z., Nowak, A., Bochenek, O., Koper, M., Kałuża, J., Konaszczuk, A., Ratyna, K., Kozyra, O., & Skarbek, M. (2024). Accuracy of wrist-worn heart rate monitors: A comprehensive review of smartwatches in exercise monitoring. Quality in Sport, 32, 55350. https://doi.org/10.12775/qs.2024.32.55350

Pereira Filgueiras, T., Bertemes-Filho, P., & Noveletto, F. (2025). Evaluating the accuracy of low-cost wearable sensors for healthcare monitoring. Micromachines, 16(7), 791. https://doi.org/10.3390/mi16070791

Prucnal, M. A., Polak, A. G., & Kazienko, P. (2025). Improving the quality of pulse rate variability derived from wearable devices using adaptive, spectrum and nonlinear filtering. Biomedical Signal Processing and Control, 102, 107336. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.107336

Rajakariar, K., Buntine, P., Ghaly, A., Zhu, Z. C., Abeygunawardana, V., Visakhamoorthy, S., Owen, P. J., Tham, S., Hackett, L., Roberts, L., Sajeev, J. K., Jones, N., & Teh, A. W. (2024). Accuracy of smartwatch pulse oximetry measurements in hospitalized patients with coronavirus disease 2019. Mayo Clinic Proceedings: Digital Health, 2(1), 92–99. https://doi.org/10.1016/j.mcpdig.2024.02.001

Rrmoku, D. (2025). Reducing emergency department strain through usable wearables: A proof-of-concept for multi-sensor remote patient monitoring. Cureus, 17(10), e95053. https://doi.org/10.7759/cureus.95053

Suzan, Ö. K., & Çınar, N. (2019). Pediatride pulse oksimetre takibi ve hemşirenin rolü. Hemşirelikte Eğitim ve Araştırma Dergisi, 16(2), 166-169.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

TURK-DOC: ARTIFICIAL INTELLIGENCE-SUPPORTED VOICE ASSISTANT SYSTEM FOR TURKISH CLINICAL DOCUMENTATION

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN
Samsun Üniversitesi, ahmet.turan@samun.edu.tr - ORCID ID: 0000-0001-5653-9695
Emirhan EDİS
Samsun Üniversitesi, 211117016@samsun.edu.tr - ORCID ID: 0009-0007-2789-0903

ABSTRACT

In today's healthcare system, doctors are forced to dedicate a significant portion of their time to medical documentation, leading to reduced patient care time and physician burnout. In this context, the integration of large language models (LLM) and automated speech recognition (ASR) technologies to create clinical documents quickly, accurately, and in a structured manner has become a crucial need.

This study focuses on the development of TURK-DOC, an AI-powered voice assistant system compatible with the Turkish language. The main objective of the study is to develop a system that transcribes conversations between doctors and patients in real time and then generates medically meaningful interpretations. The scope of the system includes all end-to-end components, such as speech transcription, text processing, AI interpretation, and database recording; its suitability for the Turkish healthcare system as a localized solution has been tested. In this study, audio data was collected using the HTML5 MediaRecorder API, the Scribe model developed by ElevenLabs was used for transcription, and the transcribed text was summarized using the GPT-3.5 language model and converted into clinically meaningful interpretations. User interaction was provided through a React-based interface, and all data was stored in three separate tables in the Supabase database. In system tests, the transcription accuracy of the Scribe model was measured at 98%; processing times of 1 second for short recordings and 3-4 seconds for longer recordings were observed. The quality of the feedback generated by GPT-3.5 was generally satisfactory, although it depended on the clarity of the input data. In user experience tests, the system interface was found to be simple and easy to understand, and could be used without requiring technical support.

In conclusion, TURK-DOC has provided a successful solution for the automatic generation of Turkish clinical documents, both in terms of technical performance and user experience. The developed system not only accelerated the document production process but also provided physicians with more opportunities for direct communication with patients. When supported by professional clinical tests, TURK-DOC is expected to make a significant contribution to the field of healthcare technologies.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Keywords: Biomedical, Artificial intelligence in healthcare, Voice assistant system, Clinical documentation, Automatic speech recognition.

TURK-DOC: TÜRKÇE KLİNİK DOKÜMANTASYON İÇİN YAPAY ZEKA DESTEKLİ SESLİ ASİSTAN SİSTEMİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN
Samsun Üniversitesi, ahmet.turan@samun.edu.tr - ORCID ID: 0000-0001-5653-9695

Emirhan EDİS
Samsun Üniversitesi, 211117016@samsun.edu.tr - ORCID ID: 0009-0007-2789-0903

ÖZET

Günümüz sağlık hizmetlerinde doktorların zamanlarının önemli bir kısmını tıbbi dokümantasyon işlemlerine ayırmak zorunda kalmaları, hasta bakım süresinin azalmasına ve hekim tükenmişliğine neden olmaktadır. Bu bağlamda, büyük dil modelleri (LLM) ve otomatik konuşma tanıma (ASR) teknolojilerinin entegrasyonu ile klinik belgelerin hızlı, doğru ve yapılandırılmış şekilde oluşturulması önemli bir ihtiyaç hâline gelmiştir.

Bu çalışma, Türkçe diline uyumlu yapay zekâ destekli bir sesli asistan sistemi olan TURK-DOC'un geliştirilmesini konu almaktadır. Çalışmanın temel amacı, doktor ile hasta arasında gerçekleşen konuşmaları gerçek zamanlı olarak yazıya döken ve ardından tıbbi olarak anlamlı yorumlar üretebilen bir sistem geliştirmektir. Kapsam olarak, sistemin konuşma transkripsiyonu, metin işleme, yapay zekâ yorumu ve veri tabanı kaydı dâhil olmak üzere uçtan uca tüm bileşenleri ele alınmış; yerelleştirilmiş bir çözüm olarak Türk sağlık sistemine uygunluğu test edilmiştir. Çalışma kapsamında, sesli veriler HTML5 MediaRecorder API ile toplanmış, transkripsiyon için ElevenLabs tarafından geliştirilen Scribe modeli kullanılmış ve transkribe edilen metin GPT-3.5 dil modeliyle özetlenip klinik açıdan anlamlı yorumlara dönüştürülmüştür. Kullanıcı etkileşimi React tabanlı arayüz ile sağlanmış, tüm veriler Supabase veri tabanında üç ayrı tablo hâlinde saklanmıştır. Sistem testlerinde Scribe modelinin transkripsiyon doğruluğu %98 olarak ölçülmüş; kısa kayıtlar için 1 saniye, uzun kayıtlar için 3–4 saniyelik işlem süreleri gözlemlenmiştir. GPT-3.5 tarafından oluşturulan yorumların kalitesi, giriş verisinin açıklığına bağlı olmakla birlikte genel olarak tatmin edici bulunmuştur. Kullanıcı deneyimi testlerinde sistemin arayüzü sade ve anlaşılır bulunmuş, teknik destek gerektirmeden kullanılabilmiştir.

Sonuç olarak TURK-DOC, Türkçe klinik belgelerin otomatik olarak üretilmesinde hem teknik performansı hem de kullanıcı deneyimi açısından başarılı bir çözüm sunmuştur. Geliştirilen sistem, yalnızca belge üretim sürecini hızlandırmakla kalmamış, aynı zamanda hekimlerin hasta ile doğrudan iletişim kurmasına daha fazla olanak tanımıştır. Profesyonel klinik testlerle desteklendiğinde, TURK-DOC'un sağlık teknolojileri alanında önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Anahtar Kelimeler: Biyomedikal, Sağlıkta yapay zekâ, Sesli asistan sistemi, Klinik dokümantasyon, Otomatik konuşma tanıma.

1. GİRİŞ

Günümüzde klinik dokümantasyon işlemlerine halen çok fazla zaman ayırılmaktadır. Yapılan araştırmalar, hekimlerin günlük çalışma sürelerinin %25'inden fazlasını dokümantasyona ayırdıklarını göstermektedir (Overhage & McCallie, 2020). Bu durum hem hekimlerin iş yükünü arttırmakta hem de hastalara ayırılan zaman azaltmaktadır. Ayrıca sağlık çalışanlarında tükenmişliğe yol açmaktadır. Elektronik sağlık kayıt (EHR) sistemlerinin yaygınlaşması, dokümantasyon sürecini kolaylaştırmayı amaçlasa da mevcut sistemlerin karmaşık arayüzleri ve manuel veri girişi gerektiren yapıları nedeniyle beklenen faydayı tam olarak sağlayamamaktadır (Muhiyaddin vd., 2022).

Kısalan muayene süresi, hastanın şikayetlerinin yeteri kadar dinlenememesini ve bu yüzden koyulan teşhisin doğruluk oranını düşebilmekte ve hasta memnuniyetini azaltmaktadır. Sağlık sektöründe teknoloji hızla gelişirken, tıbbi dokümantasyon süreçlerinin hem hızını arttırmak hem de iş yükünü azaltmak büyük bir ihtiyaç haline gelmiştir. Günümüzde hekimlerin çoğu, hastalarıyla ilgilenebilecekleri sürelerin önemli bir kısmını belgelerle uğraşarak geçirmek zorunda kalmaktadır, bu da hastalara yeteri kadar zaman ayırılmasını zorlaştırmakta ve dokümantasyon işlemleri hekim üzerinde tükenmişliği artırmaktadır (Bongurala vd., 2024).

Bu noktada, yapay zekâ teknolojileri devreye girmekte ve sağlık hizmetlerinin daha doğru şekilde ilerlemesine katkı sağlamaktadır(*Can AI Save Physicians from Burnout?*, 2024). Özellikle büyük dil modelleri (LLM), hem doktor-hasta konuşmalarını analiz etme hem de tıbbi belgeleri otomatik oluşturma gibi konularda iyi sonuçlar vermektedir (Mess vd., 2025). Örnek olarak, ChatGPT gibi modeller; ayırıcı tanı listeleri oluşturmak, radyoloji raporları yazmak ya da taburcu özetlerini düzenlemek gibi görevlerde başarılı biçimde kullanılabilmektedir (J. Liu vd., 2023).

Sağlık hizmetlerinde üretken yapay zekânın (GenAI) ve büyük dil modellerinin (LLM) giderek artan kullanımı, tanı ve bakım süreçlerini köklü bir şekilde dönüştürmektedir (Chen et al., 2025). Bu dönüşüm, doktorların bilişsel yükünü hafifleten ve hasta bakım süresini artıran klinik dokümantasyon süreçlerinin otomatikleştirilmesinden, uzmanlık gerektiren alanlara yayılmaktadır. Örneğin, Geleneksel Çin Tıbbı'nda (GÇT), çok modlu teşhis ipuçlarına (dil, nabız vb.) dayalı ve bitkiler arası uyumluluğu gözeten kişiselleştirilmiş tedavi önerileri sunan özel talimatlarla ayarlanmış LLM'ler (Xie et al., 2025; Zhang et al., 2025) geliştirilmektedir. Aynı zamanda, hastane içi bakım süreçlerinde, giyilebilir sensörlerden sürekli veri toplayarak acil durum tespiti ve ilaç yönetimi gibi görevleri yerine getiren sürü zekâsı tabanlı robotik sistemler de kullanılmaya başlanmıştır (Kalaivanan & Balasubramanian, 2025). Bu gelişmeler, yapay zekânın sağlık sektöründeki potansiyelini ve yayılım hızını açıkça göstermektedir. Nitekim ortam (ambient) yapay zekâ katiplerinin klinik dokümantasyon yükünü hafifletmedeki

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

rolü (Tierney et al., 2024) ve birinci basamak sağlık hizmetlerindeki kullanım potansiyeli (Seth et al., 2024) güncel literatürde ayrıntılı biçimde tartışılmış; bu sistemlerin hekim tükenmişliği ve kullanılabilirlik algısı üzerindeki etkisi (Shah et al., 2025) ile dokümantasyon süresine etkisi (Ma et al., 2025) sistematik olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, ortam yapay zekâ katiplerinin gerçek klinik ortamda rastgele kontrollü bir denemeyle test edildiği yakın tarihli bir çalışma da, bu teknolojinin dokümantasyon süresini ve hekim iş yükünü azaltabileceğini ortaya koymuştur (Lukac et al., 2025).

TURK-DOC çalışması, bu teknolojik gelişmeleri Türk sağlık sistemine entegre etmeyi amaçlayan bir çalışmadır. Türkçe konuşma diline uyumlu olarak geliştirilen bu sistem, doktor ile hastanın şikayetlerini dinleyerek şikâyetleri otomatik olarak yazıya döker ve ardından yapay zekâ destekli yorumlar üretir. Böylece sağlık çalışanlarının belge hazırlama süresini oldukça kısaltırken, daha yorumlanabilir hasta verileri de sunmuş olur. Ayrıca, ortamda konuşulanları anlık olarak işleyip belgeler hâline getirebilen bu tür yapay zekâ sistemlerinin, hekimlerin hastalarına daha fazla zaman ayırmasını da kolaylaştırdığı görülmektedir (Balloch vd., 2024). Sonuç olarak, TURK-DOC çalışması, sadece teknolojik bir yenilik değil; aynı zamanda hekimlerin iş yükünü azaltarak daha kaliteli bir doktor hasta ilişkisi sağlamayı hedeflemektedir.

Çalışma; klinik dokümantasyon sürecini otomatikleştirmek ve optimum hale getirmek amacıyla büyük dil modelleri (Large Language Models - LLM) destekli bir sesli asistan sistemi geliştirmeyi hedeflemektedir. Geliştirilecek sistem iki temel teknolojinin entegrasyonunu içerecektir. Birincisi Otomatik Konuşma Tanıma (ASR) teknolojisi ile hasta-hekim görüşmelerinin gerçek zamanlı transkripsiyonu, ikincisi GPT-3.5 gibi gelişmiş LLM'ler kullanılarak transkribe edilmiş metinden yapılandırılmış klinik dokümantasyon oluşturulması. Sistem, konuşmaları otomatik olarak yazıya dökecek LLM kullanarak klinik açıdan önemli bilgileri tespit edecek, yapılandırılmış SOAP (Subjective, Objective, Assessment, Plan) formatında klinik notlar oluşturacak ve EHR sistemine entegre olarak notları otomatik kaydedecektir.

Çalışmanın temel amacı, sağlık çalışanlarının dokümantasyon yükünü azaltarak hasta bakımına daha fazla zaman ayırabilmelerini sağlamak ve klinik notların kalitesini artırmaktır. LLM'lerin kullanımı, basit transkripsiyon ötesinde, klinik açıdan anlamlı ve yapılandırılmış dokümantasyon oluşturulmasını sağlayacaktır. Yakın zamanda yapılan bir araştırmada, doktorların %93,7'sinin sesli asistan teknolojilerinin kullanımına olumlu yaklaştığı belirlenmiştir. Ayrıca, yapay zekâ destekli dokümantasyon sistemlerinin hekim tükenmişliğini azalttığı ve iş akışını iyileştirdiği gösterilmiştir.

Giriş bölümünde özetlenen bu yük, somut verilerle de desteklenmektedir (Bongurala vd., 2024). Son yıllarda geliştirilen yapay zekâ tabanlı sistemler, bu sürecin daha verimli hale getirilmesi açısından umut vermektedir. Büyük dil modellerine dayalı bu araçlar, özellikle hasta şikayetlerinin yazıya dökülmesi, muayene notlarının düzenlenmesi ve raporların oluşturulması gibi işlemlerde önemli kolaylıklar sağlamaktadır (Thirunavukarasu vd., 2023). Chat GPT gibi sistemlerin, hasta mektupları ve radyoloji raporlarını kısa sürede oluşturabildiği

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ve bu belgelerin hem içerik açısından doğru hem de biçimsel olarak uygun olduğu belirlenmiştir (J. Liu vd., 2023; Thirunavukarasu vd., 2023).

Yapay zekâ temelli dokümantasyon oluşturmanın olumlu etkileri yalnızca hekimlerle sınırlı değildir. Bu sistemlerin kullanıldığı yerlerde yapılan değerlendirmelerde, hekimlerin hastalarıyla daha etkili iletişim kurabildiği, dikkatlerini belge yazımına değil doğrudan hastaya verebildiği ifade edilmiştir. Bir çalışmada, AI tabanlı belgeleme aracı kullanan klinisyenlerin tamamı hastaya tam odaklanabildiğini belirtmiş, buna karşılık klasik EHR sisteminde bu oran %66'da kalmıştır (Balloch vd., 2024). Ayrıca yapay zekâ sistemlerinin belge hazırlama süresini %70'e varan oranda azalttığı, böylece hekimlerin doğrudan hasta bakımına daha fazla zaman ayırabildiği gösterilmiştir (Bongurala vd., 2024).

Sonuç olarak, klinik dokümantasyon süreçlerinin hızlandırılması yalnızca zaman kazanımı sağlamaz; aynı zamanda hasta memnuniyetini, hekim verimliliğini ve sağlık hizmetlerinin genel kalitesini de doğrudan etkiler. Bu nedenle TURK-DOC gibi yapay zekâ destekli sistemlerin sağlık hizmetlerine entegre edilmesi, gelecekte hasta muayenesinde daha etkili ve insan odaklı bir yaklaşım sunacaktır.

2. MATERYAL ve METOT

2.1 Ses Girişi ve Ön İşleme

TURK-DOC çalışmasının ilk adımı, hasta ile doktor arasında gerçekleşen görüşmenin sesli olarak kaydedilmesidir. Web arayüzüne entegre edilen ses kayıt bileşeni, HTML5 MediaRecorder API kullanılarak tarayıcı üzerinde çalışır. Ses kaydı, hasta görüşmesi sırasında hekim tarafından manuel olarak "Dinlemeyi Başlat" ve "Dinlemeyi Durdur" butonları aracılığıyla kontrol edilmektedir. Kısa süreli bu etkileşim sayesinde sistem yalnızca istenen sesleri işlemektedir. Elde edilen ses verisi ".webm" formatında oluşturulmakta ve FormData nesnesi üzerinden Express tabanlı sunucuya iletilmektedir. Sunucu tarafında, gelen ".webm" dosyası herhangi bir format dönüşümüne uğramadan doğrudan ElevenLabs'ın Scribe modeli aracılığıyla transkribe edilmektedir.

Kayıt süreci sırasında örnekleme frekansı doğrudan ayarlanmasa da, kullanılan tarayıcı tabanlı MediaRecorder API tipik olarak 44.1kHz veya 48kHz örnekleme oranıyla ses verisi üretmektedir. ElevenLabs'ın Scribe modeli, yüksek kaliteli Türkçe transkripsiyonlar için bu örnekleme oranlarını desteklemektedir. Sistem genelinde düşük gecikme hedeflendiğinden, veri boyutu küçük olan kısa süreli kayıtlar tercih edilmiştir.

2.2 Konuşmadan Metne Dönüşüm (Speech-to-Text)

Hasta ile doktor arasındaki sesli etkileşim, ElevenLabs tarafından geliştirilen Scribe modeli ile yazıya dönüştürülmektedir. Scribe, çok dilli destek sunan gelişmiş bir otomatik konuşma tanıma (ASR) sistemidir ve 99 dili desteklemesiyle dikkat çekmektedir. Türkçe dilinde de

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

yüksek doğruluk oranı ile çalışan bu sistem, kelime düzeyinde zaman damgaları, konuşmacı ayrımı ve sesli olay etiketleme gibi özelliklere sahiptir. Express sunucusuna gönderilen ses dosyası, bu model tarafından çözümlenerek metne dönüştürülür. Transkript çıktısı, sistem arayüzünde hasta şikâyeti kutusuna otomatik olarak yazılır.

Sistem, bu şekilde manuel yazım gereksinimini ortadan kaldırmakta ve tıbbi dokümantasyon sürecinde zaman kazandırmaktadır. Türkçe gibi eklemeli (agglutinative) bir dil için otomatik konuşma tanıma sistemlerinin geliştirilmesi, İngilizce gibi yaygın dillere kıyasla daha sınırlı kaynaklarla ve daha yüksek dilsel karmaşıklıkla gerçekleştirilmektedir; bu doğrultuda geliştirilen özel derin öğrenme tabanlı Türkçe ASR sistemleri (Görmez, 2024) ve Whisper mimarisinin düşük dereceli uyarlama (LoRA) ile Türkçe için ince ayarlanmasına yönelik çalışmalar (Polat et al., 2024), kelime hata oranlarında belirgin iyileşmeler sağlanabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Whisper gibi genel amaçlı ASR modellerinin gerçek ses kayıtlarında bazen sesli girdide bulunmayan ifadeler "halüsinasyon" olarak üretebildiği; bu durumun özellikle klinik transkripsiyon gibi yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda ciddi bir güvenilirlik riski oluşturduğu da literatürde belgelenmiştir (Koenecke et al., 2024). Transkripsiyon sonucunda elde edilen metin, daha sonra yapay zekâ tarafından özetlenmek ve yorumlanmak üzere kullanılmaya hazır hale gelir.

2.3 Metin İşleme ve Yapay Zekâ Yorumu

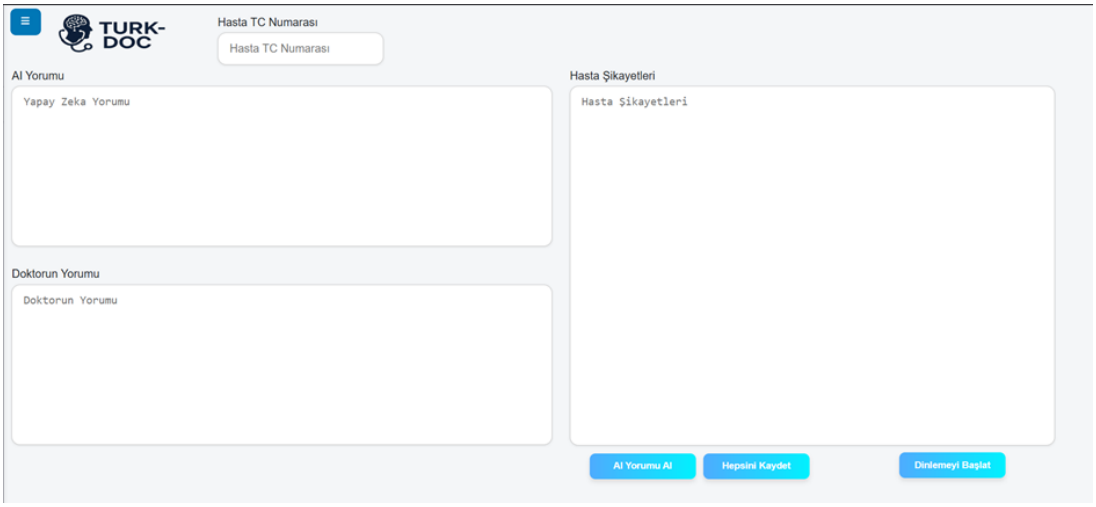
Scribe modeli tarafından oluşturulan metin, sistemin ikinci aşamasında GPT-3.5 modeli ile işlenmektedir. Bu model, hastanın şikayetlerini inceleyerek ön tanı koyabilir, ilaç tedavisi önerebilir ve hastanın takibe alınıp alınmayacağı konusunda fikir verebilir. GPT-3.5 bu çıktıların hepsini ön tanımlı bir “prompt” aracılığıyla yapar. Yapay zekâ tarafından döndürülen içerik, sistemdeki "AI Yorumu" kutusuna otomatik olarak yazılır. Model, yalnızca özetleme yapmakla kalmaz; semptomlar arasındaki ilişkileri analiz eder, olası klinik senaryoları tartışır ve hekime yorum desteği sunar. Benzer bir yaklaşımla, ses kayıtlarından ChatGPT-4 kullanılarak yapılandırılmış SOAP formatında tıbbi notlar oluşturulmasını inceleyen bir karşılaştırmalı çalışmada, üretilen notların vaka başına ortalama önemli sayıda ihmal, ekleme veya hatalı bilgi içerdiği; bu nedenle LLM tabanlı not üretiminin şu aşamada insan tarafından oluşturulan dokümantasyonun güvenli bir alternatifi olarak görülemeyeceği, ancak dikkatli bir hekim denetimiyle kullanılabileceği vurgulanmıştır (Kernberg et al., 2024).

2.4 Web Arayüzü ve Kullanıcı Etkileşimi

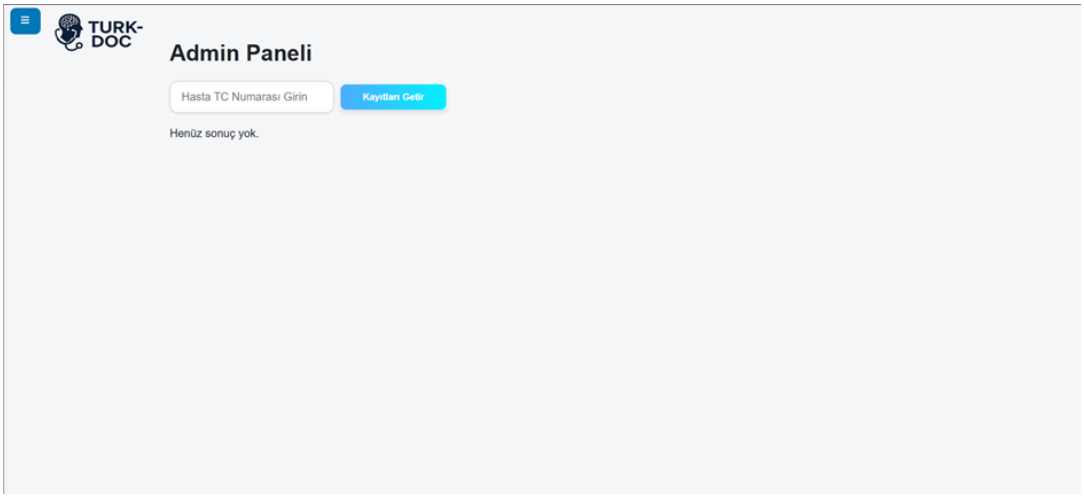
React tabanlı web arayüzü, doktorların sistemle etkileşimini kolaylaştıracak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 1-3’deki program arayüzünde hasta şikayetleri, yapay zekâ yorumu ve doktor görüşü için ayrı kutucuklar bulunur. Doktor, “Dinlemeyi Başlat” butonu ile ses kaydını başlatır; sistem bu sesi metne çevirir, AI yorumunu alır ve kullanıcı dilerse "Kaydet" butonuyla tüm verileri veri tabanına aktarabilir. Arayüz sade, okunabilir ve mobil uyumludur. "AI Yorumu Al" ve "Dinlemeyi Başlat/Durdur" gibi butonlar, kullanıcının sistem içinde kolayca gezinmesini sağlar. Sesli verinin anlık olarak kutucuğa aktarılması, kullanıcının gözlem

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

yapmasını da mümkün kılar. Sistemin kullanıcı arayüzünde yer alan “Admin Paneli” bölümü, doktorların daha önce kayıt altına alınmış hasta bilgilerine hızlıca ulaşabilmelerini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu panel üzerinden, hastaya ait şikayetler, doktorun yaptığı değerlendirme ve sistemin oluşturduğu yapay zekâ yorumu; tarih bilgileriyle birlikte kolayca görüntülenebilmektedir. Sistemde bu verilere erişim için yalnızca hastanın T.C. kimlik numarasının girilmesi yeterlidir. Bu bilgi girildiğinde, o hastaya ait tüm geçmiş kayıtlar otomatik olarak ekrana getirilir.

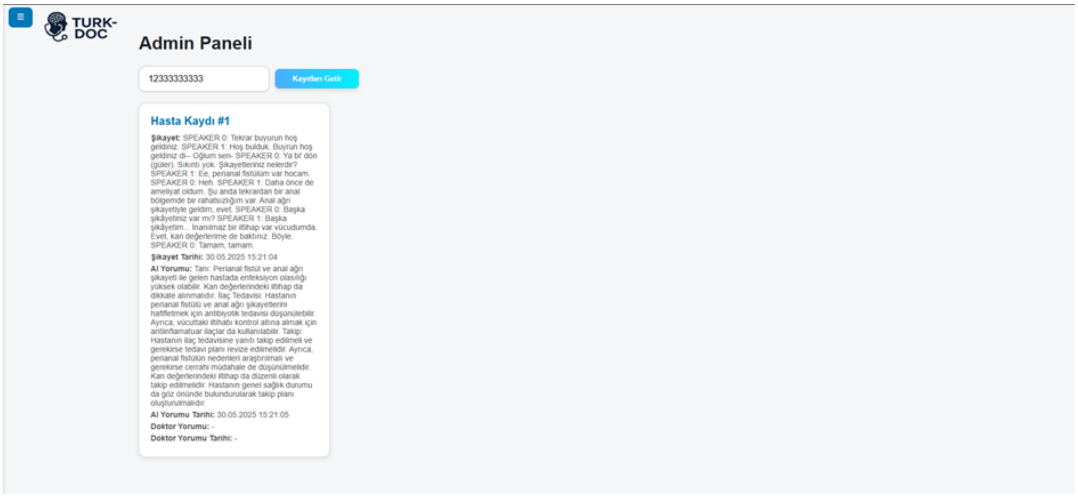


Şekil 1. TURK-DOC Web sitesi ana sayfası



Şekil 2. TURK-DOC Web sitesi admin paneli

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Şekil 3. Admin Paneli Hasta Geçmişi Gözlemleme

2.5 Veri Tabanı ve Kayıt Mekanizması

Veriler, Supabase platformu üzerinden PostgreSQL veri tabanında saklanmaktadır. Her hasta kaydı, hasta T.C. numarası ile eşleştirilmiş, "hasta şikayetleri", "AI yorumları" ve "doktor yorumları" olmak üzere üç ayrı tabloda saklanmaktadır. Bu sayede her hasta için oluşan kayıtlar zaman damgası ile sistematik şekilde arşivlenir. Veriler JSON formatında sunucuya gönderilir ve bu tablolar aracılığıyla veri tabanına kaydedilir (Şekil 4-6).

id int8	yorum text	created_at timestamp	tc_no text
4	Bu kısım yapay zeka yorumu için	NULL	xxxxxxxxxx
5	EMPTY	NULL	NULL
6	EMPTY	NULL	NULL

Şekil 4. Veri tabanı AI yorumu tablosu.

id int8	sikayet text	created_at timestamp	tc_no text
6	Hastanın sesli şikayetleri buraya yazılır.	2025-04-27 10:25:18.123382	NULL
7	EMPTY	2025-04-27 10:27:44.545391	NULL

Şekil 5. Veri tabanı hasta şikayetleri tablosu.

id int8	yorum text	created_at timestamp	tc_no text
4	Doktorun yorumları buraya kaydedilir.	NULL	NULL
5	EMPTY	NULL	NULL

Şekil 6. Veri tabanı doktor yorumları tablosu.

2.6 Sistem Mimarisi ve Entegrasyon Akışı

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

TURK-DOC Sistemi; React frontend, Express backend, Scribe, GPT-3.5 ve Supabase veri tabanından oluşan bir mimariye sahiptir. Kullanıcı ses kaydını başlattığında, ses dosyası sunucuya gönderilir ve Scribe ile metne dönüştürülür. Daha sonra sistem metin üzerinden hem yorum yapar hem de hastanın şikayetlerinin klinik terimlerle bir özetini çıkarır ve dönüş sağlar. Doktor kendi yorumlarını manuel olarak ekledikten sonra "Kaydet" komutu ile tüm veriler Supabase'de ilgili tablolara kaydedilir. Bu çok katmanlı mimari; modülerlik, sürdürülebilirlik ve kullanıcı dostu etkileşim hedefleriyle tasarlanmış, tıbbi belge oluşturma süreçlerinde zamandan ve iş gücünden tasarruf sağlamayı amaçlamaktadır.

3. BULGULAR

3.1 Transkripsiyon Doğruluğu ve Model Değişikliği

Çalışmanın başlangıç aşamasında sesli hasta şikâyetlerinin yazıya dökülmesi için OpenAI tarafından geliştirilen Whisper modeli kullanılmıştır. Ancak yapılan testler sonucunda Whisper modelinin uzun cümleli ve aksan içerebilen Türkçe konuşmalarda tutarsız çıktılar ürettiği, bazı durumlarda ise konuşmayı eksik veya yanlış algıladığı tespit edilmiştir. Ayrıca yanıt üretme süresinin uzun olması, sistemi gerçek zamanlı kullanıma uygun olmaktan uzaklaştırmıştır. Bu sebeple sistemin transkripsiyon motoru değiştirilmiş ve ElevenLabs tarafından geliştirilen Scribe modeli tercih edilmiştir.

Yapılan testlerde Scribe modelinin ortalama transkripsiyon doğruluğu %98 seviyesinde ölçülmüştür. Özellikle Türkçe konuşmalarda yüksek başarı göstermesi, sistemin yerelleştirilmiş klinik senaryolarda kullanılabilirliğini güçlendirmiştir. Modelin kısa ses kayıtlarında yaklaşık 1 saniyelik, 30–60 saniye aralığındaki uzun kayıtlar için ise ortalama 3 ila 4 saniyelik işlem süresi ile çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu süreler, sistemin hem hızlı yanıt verebilme kapasitesini hem de kullanıcı akışına uygunluk derecesini göstermektedir. Transkripsiyonların içeriği değerlendirildiğinde, modelin tıbbi terimleri ve günlük dilde ifade edilen semptomları oldukça isabetli bir biçimde yazıya dökebildiği görülmüştür.

3.2 Yapay Zekâ Yorum Kalitesi

Scribe modeli tarafından yazıya dökülen metinlerin GPT-3.5’e aktarılmasıyla başlayan ikinci aşamada, yapay zekâ yorumlarının kalitesi dikkatle değerlendirilmiştir. Sistem testlerinde görülen en belirgin bulgu, GPT-3.5’in yorum kalitesinin büyük ölçüde giriş verisinin niteliğine bağlı olduğudur. Hasta şikayetlerinin detaylı ve açık biçimde ifade edildiği durumlarda, GPT-3.5’in oldukça anlamlı ve bağlamsal olarak tutarlı metinler ürettiği gözlemlenmiştir.

Bu yorumlarda yalnızca semptomların özetlenmesi değil; aynı zamanda semptomlar arasında ilişki kurulması, olası nedenlerin belirtilmesi ve bazı durumlarda ön tanıya işaret eden ifadelerin yer aldığı görülmüştür. Buna karşılık, kısa, yüzeysel veya anlamsal bütünlükten yoksun şikayetlerde modelin daha genel ve yer yer belirsiz ifadeler ürettiği fark edilmiştir. Bu durum, modelin bilgi çıkarımı yapma kapasitesinin, konuşma içeriğinin zenginliğiyle doğrudan

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ilişkili olduğunu göstermektedir. Ancak genel değerlendirme açısından, sistemin GPT-3.5 ile güçlendirilmiş yapay zekâ yorum modülünün klinik belgelerde kullanılabilecek açıklık ve anlam düzeyine sahip içerikler üretebildiği sonucuna varılmıştır.

3.3 Sistem Performansı ve İşlem Süresi

Transkripsiyon ve yapay zekâ yorumlama aşamalarının süre açısından değerlendirilmesi sonucunda sistemin gerçek zamanlı kullanıma uygun yanıt süresi sunduğu gözlemlenmiştir. Scribe modeliyle yapılan ölçümlerde, kısa süreli ses kayıtlarında çıktının yaklaşık 1 saniye içinde, uzun süreli kayıtlarda ise ortalama 3-4 saniye içinde alındığı belirlenmiştir. Bu süre, transkriptin tamamlanması ve GPT-3.5'in yorum üretimini de kapsayan uçtan uca işlem süresidir. Çalışmanın başlangıç aşamasında kullanılan Whisper modelinde bu sürenin kimi zaman 10 saniyeyi aşabildiği dikkate alındığında, Scribe modeline geçişin performans açısından belirgin bir iyileşme sağladığı anlaşılmaktadır. Kullanıcı deneyimi açısından bu hız, özellikle arayüzde sesli etkileşim sonrasında "bekleme" hissini ortadan kaldırmakta ve sistemin daha akıcı çalışmasını mümkün kılmaktadır. Klinik gibi zamanın kritik olduğu alanlarda, işlem süresinin düşük olması, sistemin pratikte kullanılabilirliğini doğrudan etkileyen bir faktör olarak değerlendirilmiştir.

3.4 Kullanıcı Geri Bildirimleri ve Arayüz Deneyimi

Sistem, profesyonel sağlık çalışanları ile henüz sistematik olarak test edilememiş olmakla birlikte, sınırlı sayıda kullanıcılarla yapılan ön denemeler yoluyla arayüz ve genel kullanım deneyimine dair ilk geri bildirimler toplanmıştır. Kullanıcılar, sistemin sunduğu basit ve sezgisel arayüz tasarımını olumlu bulmuş; ses kaydı alma, sonuçları görüntüleme ve içerik kaydetme gibi temel işlemleri rahatlıkla gerçekleştirebildiklerini belirtmişlerdir. Sistemle ilk kez karşılaşan kullanıcılar dahi, herhangi bir teknik desteğe ihtiyaç duymadan işlevleri kullanabilmiş ve bu durum, arayüzün erişilebilirliğini artıran önemli bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yapay zekâ tarafından üretilen içeriklerin dil yapısı ve anlatım tarzı, kullanıcılar tarafından büyük ölçüde anlaşılır ve tatmin edici bulunmuştur. Özellikle GPT-3.5 modelinin oluşturduğu özetlerin açık, kısa ve semptomlarla ilişkili bilgiler içermesi, yorumların kullanışlılığını artırmıştır. Deneme sürecine katılan kişilerin çoğu, bu çıktıları gerçek doktor değerlendirmesine benzer nitelikte bulduklarını ve sistemin pratikte kullanıma uygun olduğunu düşündüklerini ifade etmiştir. Her ne kadar bu testler profesyonel ölçekte olmasa da, kullanıcı deneyimi açısından sistemin ilk izlenimlerinin oldukça olumlu olduğu söylenebilir.

3.5 Yapay Zekâ Çıktıları ile Klinik Değerlendirme Uyumu

Çalışmanın bu aşamasında, yapay zekâ tarafından oluşturulan içeriklerin gerçek doktor değerlendirmeleriyle karşılaştırılmasına yönelik sistematik bir test yapılamamıştır. Dolayısıyla, GPT-3.5'in ürettiği metinlerin klinik tutarlılığına dair kesin bir değerlendirme sunmak bu aşamada mümkün değildir. Ancak sistemin genel çıktıları incelendiğinde, özellikle

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

detaylı şikâyet verisi girildiğinde GPT-3.5'in ürettiği yorumların semptomlar arasında anlamlı bağlar kurduğu ve ön tanıya yönelik çıkarımlar yapabildiği görülmüştür. Bu da sistemin gelecekte sağlık profesyonelleri ile yapılacak doğrulama testlerine uygun bir temel sunduğunu göstermektedir.

İlerleyen aşamalarda, sistemin yorumlarıyla doktor görüşlerinin örtüşme düzeyine dair doğrudan karşılaştırmalı analizler yapılması planlanmaktadır. Bu analizler, TURK-DOC sisteminin sadece destekleyici değil, aynı zamanda aktif bir klinik karar yardımcısı olarak kullanılıp kullanılamayacağına dair daha somut sonuçlar sunacaktır.

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma, Türkçe dilinde sesli hasta şikayetlerinin hızlı, doğru ve yapılandırılmış biçimde klinik dokümantasyona dönüştürülmesini amaçlayan bir yapay zekâ destekli sesli asistan sisteminin geliştirilmesini konu edinmiştir. TURK-DOC, mevcut literatürde yer alan ve özellikle İngilizce diline odaklanmış çok sayıda benzer çalışmaya göre hem dilsel hem de sistem mimarisi açısından farklılık göstermektedir. Geliştirilen sistem, ElevenLabs'ın Scribe modeli ile yüksek doğrulukta transkripsiyon sağlarken, GPT-3.5 ile anlamlı ve bağlamsal olarak güçlü yorumlar üretmiştir. Bu yönüyle TURK-DOC, yalnızca belge üretimini hızlandırmakla kalmamış; aynı zamanda hekimin karar sürecine destek verebilecek kalitede içerikler sunmayı başarmıştır.

Benzer çalışmalar incelendiğinde, Balloch ve arkadaşlarının (2024) geliştirdiği ambient AI sisteminin özellikle belge kalitesini artırmak ve hekimlerin hastaya odaklanmasını sağlamak üzerine kurgulandığı görülmektedir. TURK-DOC, benzer şekilde hekimi belge yazım yükünden kurtararak doğrudan hasta ile etkileşime odaklanmasını desteklemektedir. Bununla birlikte, ChatGPT gibi büyük dil modellerinin klinik notlar, reçeteler ve hasta özetleri üretmede başarılı sonuçlar verdiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Liu et al., 2023; Thirunavukarasu et al., 2023). Ancak bu sistemlerin çoğu İngilizce veri üzerinden test edilmiştir. TURK-DOC'un farkı, Türkçe konuşma diline özel optimize edilmiş bir transkripsiyon ve yorumlama süreci içermesiyle öne çıkmaktadır.

Sistemin kısa ve uzun ses kayıtlarında 1 ila 4 saniyelik işlem süresiyle çıktılar üretmesi, gerçek zamanlı klinik kullanım için gerekli performans kriterlerini karşıladığını göstermektedir. Ayrıca, GPT-3.5 yorumlarının kalitesi, hasta şikayetinin ifadesine bağlı olmakla birlikte genel anlamda tatmin edici bulunmuştur. Kullanıcı geri bildirimleri de arayüzün basit ve kullanışlı olduğu yönünde şekillenmiştir. Ancak sistemin profesyonel sağlık çalışanları ile kapsamlı bir şekilde test edilememiş olması, yorumların klinik doğruluk düzeyine dair daha güçlü sonuçlara ulaşılmasını şu aşamada sınırlamaktadır. Nitekim ortam yapay zekâ katiplerine yönelik yakın tarihli bir randomize kontrollü çalışma, bu tür sistemlerin dokümantasyon süresini ve hekim tükenmişliğini azaltabildiğini; ancak etkinin cihaz ve uygulama bağlamına göre değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur (Lukac et al., 2025). Bu bulgular, TURK-DOC gibi sistemlerin klinik ortama entegrasyonundan önce, transkripsiyon, konuşmacı ayrımı ve tıbbi not üretimini

kapsayan yapılandırılmış bir değerlendirme çerçevesiyle test edilmesinin önemini vurgulamaktadır (Wang et al., 2025).

Tüm bu bulgular ışığında TURK-DOC'un, klinik belge üretimini kolaylaştırma, zaman tasarrufu sağlama ve hasta bakımına daha fazla odaklanma gibi hedeflerine büyük ölçüde ulaştığı görülmektedir. Sistem, özellikle Türk sağlık sistemine uyumlu yapısı, açık kaynak platformlara dayalı geliştirme mimarisi ve kullanıcı dostu tasarımıyla pratikte uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. İlerleyen süreçte profesyonel klinik testler, kullanıcı deneyimi çalışmaları ve entegrasyon analizleri ile sistemin etkisi daha geniş ölçekte değerlendirilecektir. TURK-DOC'un mevcut haliyle bile klinik iş akışını sadeleştirmeye aday bir yapı sunduğu ve gelecekteki sağlık teknolojilerine katkı sağlayacak güçlü bir temel oluşturduğu söylenebilir.

5. KAYNAKÇA

[1].Balloch, J., Sridharan, S., Oldham, G., Wray, J., Gough, P., Robinson, R., Sebire, N. J., Khalil, S., Asgari, E., Tan, C., Taylor, A., & Pimenta, D. (2024). Use of an ambient artificial intelligence tool to improve quality of clinical documentation. Future Healthcare Journal, 11(3), 100157. https://doi.org/10.1016/j.fhj.2024.100157

[2].Bongurala, A. R., Save, D., Virmani, A., & Kashyap, R. (2024). Transforming Health Care With Artificial Intelligence: Redefining Medical Documentation. Mayo Clinic Proceedings: Digital Health, 2(3), 342-347. https://doi.org/10.1016/j.mcpdig.2024.05.006

[3].Can AI Save Physicians from Burnout? | Working Knowledge. (2024, Ağustos 13). Harvard Business School. https://www.library.hbs.edu/working-knowledge/can-ai-save-physicians-from-burnout

[4].Kim, J. K., Chua, M., Rickard, M., & Lorenzo, A. (2023). ChatGPT and large language model (LLM) chatbots: The current state of acceptability and a proposal for guidelines on utilization in academic medicine. Journal of Pediatric Urology, 19(5), 598-604. https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2023.05.018

[5].Liu, J., Wang, C., & Liu, S. (2023). Utility of ChatGPT in Clinical Practice. Journal of Medical Internet Research, 25, e48568. https://doi.org/10.2196/48568

[6].Liu, T.-L., Hetherington, T. C., Stephens, C., McWilliams, A., Dharod, A., Carroll, T., & Cleveland, J. A. (2024). AI-Powered Clinical Documentation and Clinicians' Electronic Health Record Experience: A Nonrandomized Clinical Trial. JAMA Network Open, 7(9), e2432460. https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.32460

[7].Mess, S. A., Mackey, A. J., & Yarowsky, D. E. (2025). Artificial Intelligence Scribe and Large Language Model Technology in Healthcare Documentation: Advantages, Limitations, and Recommendations. Plastic and Reconstructive Surgery Global Open, 13(1), e6450. https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000006450

[8].Muhiyaddin, R., Elfadl, A., Mohamed, E., Shah, Z., Alam, T., Abd-Alrazaq, A., & Househ, M. (2022). Electronic Health Records and Physician Burnout: A Scoping Review. Studies in Health Technology and Informatics, 289, 481-484. https://doi.org/10.3233/SHTI210962

[9].Overhage, J. M., & McCallie, D. (2020). Physician Time Spent Using the Electronic Health Record During Outpatient Encounters: A Descriptive Study. Annals of Internal Medicine, 172(3), 169-174. https://doi.org/10.7326/M18-3684

[10].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

[11].Zhang, C., Han, W., Yang, Q., Han, C., & Wang, W. (2025). A Hierarchical Structure-Enhanced Personalized Recommendation Model for Traditional Chinese Medicine Formulas Based on KG Diffusion Guidance. arXiv preprint arXiv:2509.23560v1.

[12].Kalaivanan, N., & Balasubramanian, G. (2025). AI Enhanced Multi-Robotic Systems for inpatient care and Diagnostic support. arXiv preprint arXiv:2509.26106v1.

[13].Xie, J., Yu, Y., Chen, Y., Zhang, H., Zhao, L., He, J., ... & Xu, D. (2025). BenCao: An Instruction-Tuned Large Language Model for Traditional Chinese Medicine. arXiv preprint arXiv:2510.17415v1.

[14].Chen, G., Liu, C., Ooi, G. A., Tan, M., Xie, Z., Yin, J. W. L., ... & Ooi, B. C. (2025). Generative AI for Healthcare: Fundamentals, Challenges, and Perspectives. arXiv preprint arXiv:2510.24551v1.

[15].Görmez, Y. (2024). Customized deep learning based Turkish automatic speech recognition system supported by language model. PeerJ Computer Science, 10, e1981. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1981

[16].Kernberg, A., Gold, J. A., & Mohan, V. (2024). Using ChatGPT-4 to create structured medical notes from audio recordings of physician-patient encounters: Comparative study. Journal of Medical Internet Research, 26, e54419. https://doi.org/10.2196/54419

[17].Koenecke, A., Choi, A. S. G., Mei, K. X., Schellmann, H., & Sloane, M. (2024). Careless Whisper: Speech-to-text hallucination harms. In Proceedings of the 2024 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT '24). https://doi.org/10.1145/3630106.3658996

[18].Lukac, P. J., Turner, W., Vangala, S., Chin, A. T., Khalili, J., Shih, Y.-C. T., Sarkisian, C., Cheng, E. M., & Mafi, J. N. (2025). Ambient AI scribes in clinical practice: A randomized trial. NEJM AI, 2(12). https://doi.org/10.1056/aioa2501000

[19].Ma, S. P., Liang, A. S., Shah, S. J., Smith, M., Jeong, Y., Devon-Sand, A., Crowell, T., Delahaie, C., Hsia, C., Lin, S., Shanafelt, T., Pfeffer, M. A., Sharp, C., & Garcia, P. (2025). Ambient artificial intelligence scribes: Utilization and impact on documentation time. Journal of the American Medical Informatics Association, 32(2), 381-385. https://doi.org/10.1093/jamia/ocae304

[20].Polat, H., Turan, A. K., Koçak, C., & Ulaş, H. B. (2024). Implementation of a Whisper architecture-based Turkish automatic speech recognition (ASR) system and evaluation of the effect of fine-tuning with a low-rank adaptation (LoRA) adapter on its performance. Electronics, 13(21), 4227. https://doi.org/10.3390/electronics13214227

[21].Seth, P., Carretas, R., & Rudzicz, F. (2024). The utility and implications of ambient scribes in primary care. JMIR AI, 3, e57673. https://doi.org/10.2196/57673

[22].Shah, S. J., Devon-Sand, A., Ma, S. P., Jeong, Y., Crowell, T., Smith, M., Liang, A. S., Delahaie, C., Hsia, C., Shanafelt, T., Pfeffer, M. A., Sharp, C., Lin, S., & Garcia, P. (2025). Ambient artificial intelligence scribes: Physician burnout and perspectives on usability and documentation burden. Journal of the American Medical Informatics Association, 32(2), 375-380. https://doi.org/10.1093/jamia/ocae295

[23].Tierney, A. A., Gayre, G., Hoberman, B., Mattern, B., Ballesca, M., Kipnis, P., Liu, V., & Lee, K. (2024). Ambient artificial intelligence scribes to alleviate the burden of clinical documentation. NEJM Catalyst Innovations in Care Delivery, 5(3). https://doi.org/10.1056/CAT.23.0404

[24].Wang, H., Yang, R., Alwakeel, M., Kayastha, A., Chowdhury, A., Biro, J. M., Sorrentino, A. D., Handley, J. L., Hantzmon, S., Bessias, S., Economou-Zavlanos, N. J., Bedoya, A., Agrawal, M., Ratwani, R. M., Poon, E. G., Pencina, M. J., Pollak, K. I., & Hong, C. (2025). An evaluation framework for ambient digital scribing tools in clinical applications. npj Digital Medicine, 8, 358. https://doi.org/10.1038/s41746-025-01622-1

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ENDÜSTRİYEL KONTROL SİSTEMLERİNDE LLM TABANLI OTONOM AJANLAR İÇİN TEHDİT TAKSONOMİSİ VE GENİŞLETİLMİŞ TEHDİT MODELİ

Ahmed Yaseen Bishree AL-ANI
Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 13000 Bitlis, Türkiye, ahmedbishree@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1863-8518

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 13000 Bitlis, Türkiye, srustemli@beu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4957-1782

Özet

Endüstriyel üretim, enerji, su, petrol ve gaz, ulaştırma ve kritik bina otomasyonu gibi alanlarda fiziksel süreçlerin denetimi; programlanabilir mantık denetleyicileri, dağıtık kontrol sistemleri, SCADA/HMI bileşenleri ve süreç tarihçileri tarafından yürütülmektedir. Purdue referans modeli, bu varlıkları saha cihazlarından kurumsal BT katmanına uzanan bir hiyerarşi içinde ele almakta ve her seviyenin farklı gecikme, güvenilirlik ve güvenlik gereksinimlerine sahip olduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışma, endüstriyel kontrol sistemlerinde (ICS) büyük dil modeli (LLM) tabanlı otonom ajanların oluşturduğu özgün saldırı yüzeyini sistematik biçimde tanımlamak amacıyla yedi kategorili bir tehdit taksonomisi ve genişletilmiş tehdit modeli önermektedir. Çalışma; LLM ajan mimarileri, ICS/Purdue katmanları, mevcut siber güvenlik çerçeveleri ve LLM güvenliği literatürünün doküman analiziyle bütünleştirilmesine dayanmaktadır. Önerilen taksonomi; doğrudan istem enjeksiyonu, dolaylı istem enjeksiyonu, hedef ele geçirme ve bağlam manipülasyonu, bellek zehirleme, araç kötüye kullanımı ve yetki yükseltme, çok ajanlı kimliğe bürünme ile bağlam penceresi taşması kategorilerinden oluşmaktadır. Her kategori; saldırı giriş noktası, STRIDE eşlemesi, MITRE ATT&CK for ICS taktik ilişkisi, Purdue etki seviyesi ve dört bileşenli risk puanıyla tanımlanmıştır. Sistem modeli üzerinde 28 bileşen, 12 kritik veri akışı, dokuz saldırı giriş noktası ve 26 bileşen düzeyi zafiyet belirlenmiştir. İlk kavramsal kanıt deneylerinde korumasız ajan ortamında T1, T4 ve T6 saldırıları için sırasıyla %86.7, %90.0 ve %93.3 başarı oranı gözlenmiştir. Bulgular, mevcut ICS güvenlik standartlarının doğal dil tabanlı talimat otoritesini, kalıcı ajan belleğini, araç yürütme yetkisini ve çok ajanlı koordinasyon kanallarını yeterli düzeyde kapsamadığını göstermektedir. Çalışma, mevcut uygulayıcı terminolojisini koruyarak STRIDE ve ATT&CK for ICS çerçevelerini ajan özgü saldırılarla genişleten, savunma tasarımı ve deneysel değerlendirme için izlenebilir bir analitik temel sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel kontrol sistemleri; büyük dil modelleri; otonom ajanlar; istem enjeksiyonu; bellek zehirleme; STRIDE; MITRE ATT&CK for ICS; tehdit modelleme.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

THREAT TAXONOMY AND EXTENDED THREAT MODEL FOR LLM-BASED AUTONOMOUS AGENTS IN INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS

Abstract

The control of physical processes in domains such as industrial production, energy, water, oil and gas, transportation, and critical building automation is performed through programmable logic controllers, distributed control systems, SCADA/HMI components, and process historians. The Purdue reference model organizes these assets within a hierarchy extending from field devices to the enterprise IT layer and demonstrates that each level has distinct latency, reliability, and security requirements.

This study proposes a seven-category threat taxonomy and an extended threat model to systematically characterize the unique attack surface introduced by large language model (LLM)-based autonomous agents in industrial control systems (ICS). The study is based on the integrated document analysis of LLM agent architectures, ICS/Purdue layers, existing cybersecurity frameworks, and the LLM security literature. The proposed taxonomy comprises direct prompt injection, indirect prompt injection, goal hijacking and context manipulation, memory poisoning, tool misuse and privilege escalation, multi-agent impersonation, and context window overflow. Each category is defined according to its attack entry point, STRIDE mapping, relationship with MITRE ATT&CK for ICS tactics, Purdue impact level, and a four-component risk score. Within the system model, 28 components, 12 critical data flows, nine attack entry points, and 26 component-level vulnerabilities were identified. Initial proof-of-concept experiments conducted in an unprotected agent environment produced attack success rates of 86.7%, 90.0%, and 93.3% for T1, T4, and T6, respectively. The findings indicate that existing ICS security standards do not adequately address natural-language-based instruction authority, persistent agent memory, tool execution privileges, and multi-agent coordination channels. By preserving established practitioner terminology, this study extends the STRIDE and ATT&CK for ICS frameworks with agent-specific attacks and provides a traceable analytical foundation for defense design and experimental evaluation.

Keywords: Industrial control systems; large language models; autonomous agents; prompt injection; memory poisoning; STRIDE; MITRE ATT&CK for ICS; threat modeling.

1. GİRİŞ

Endüstriyel üretim, enerji, su, petrol ve gaz, ulaştırma ve kritik bina otomasyonu gibi alanlarda fiziksel süreçlerin denetimi; programlanabilir mantık denetleyicileri, dağıtık kontrol sistemleri, SCADA/HMI bileşenleri ve süreç tarihçileri tarafından yürütülmektedir. Purdue referans modeli, bu varlıkları saha cihazlarından kurumsal BT katmanına uzanan bir hiyerarşi içinde ele almakta ve her seviyenin farklı gecikme, güvenilirlik ve güvenlik gereksinimlerine sahip olduğunu göstermektedir [26, 27–30].

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Endüstri 4.0 ile birlikte BT/OT yakınsaması, IoT bağlantıları, bulut ve uç bilişim, dijital ikizler ve makine öğrenmesi tabanlı karar destek sistemleri ICS ortamına girmiştir [39, 44, 97–100]. Bu dönüşüm operasyonel görünürlüğü ve kestirimci bakım kapasitesini artırırken, tarihsel olarak ağ izolasyonuna dayanan savunma varsayımlarını zayıflatmış ve kontrol ağlarının saldırı yüzeyini genişletmiştir.

Transformer mimarisiyle ölçeklenen büyük dil modelleri; bağlam içinde öğrenme, talimat izleme, çok adımlı muhakeme, kod üretimi ve araç kullanımı gibi yetenekler geliştirmiştir [1–10]. ReAct, Toolformer, MRKL, AutoGen ve benzeri yaklaşımlar, dil modelini dış araçlarla kapalı çevrimli bir algı-muhakeme-eylem sistemine dönüştürmektedir [11–25]. Bu yapı, modelin yalnızca metin üretmesini değil; API çağrısı yapmasını, veri tabanı sorgulamasını, bakım kaydı oluşturmasını, alarmı onaylamasını ve uygun yetki verildiğinde SCADA setpoint değerlerini değiştirmesini mümkün kılar.

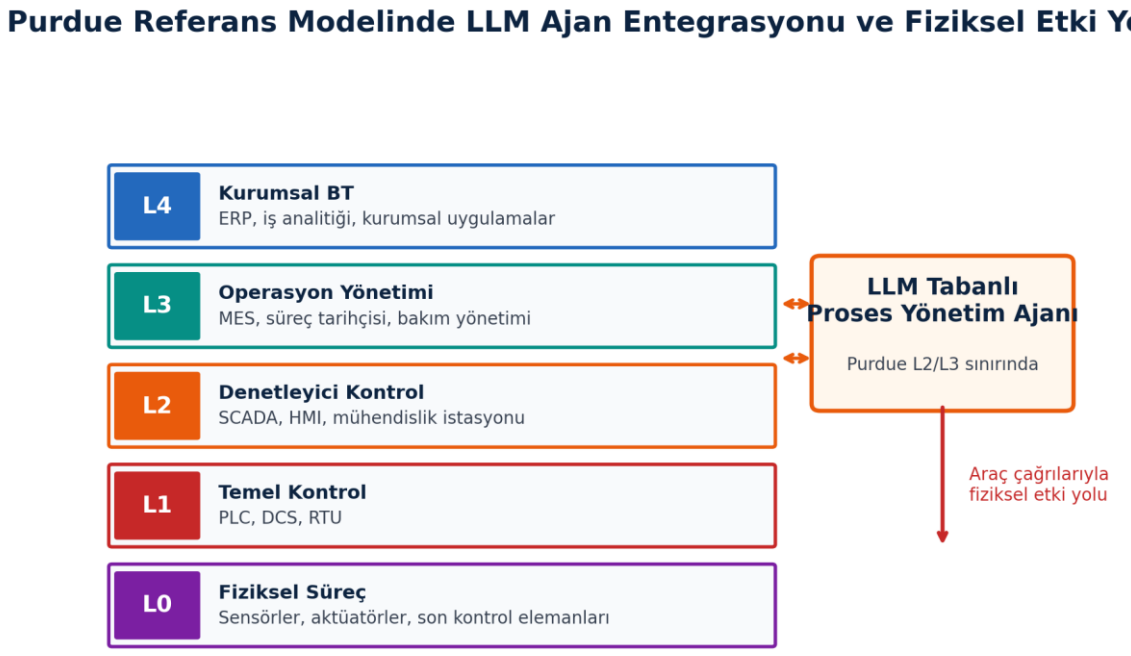
LLM ajanının ICS içinde kullanılması, klasik karar destek sistemlerinden niteliksel olarak farklıdır. Geleneksel endüstriyel yapay zekâ çoğunlukla uyarı veya öneri üretirken son karar operatöre aittir. Otonom ajan ise görevi alt adımlara ayırabilir, araç seçebilir, eylemi yürütebilir ve sonucu yeniden bağlama alarak bir sonraki kararı oluşturabilir. Bu nedenle dilsel bir manipülasyon, doğrudan OT protokol komutuna ve fiziksel sürece uzanan yeni bir saldırı yolu oluşturur.

Mevcut ICS güvenlik literatürü; Stuxnet, CRASHOVERRIDE, TRITON ve PIPEDREAM gibi olayların gösterdiği protokol, mühendislik istasyonu, güvenlik sistemi ve süreç manipülasyonu tehditlerini kapsamlı biçimde incelemektedir [31–45]. Bununla birlikte IEC 62443, NIST SP 800-82 ve ATT&CK for ICS; doğal dil istemlerinin yetki seviyesini, ajan belleğinin semantik bütünlüğünü, araç çağrılarının muhakeme bağlamını veya çok ajanlı mesaj kimliğini doğrudan modellememektedir [46–52].

LLM güvenliği alanında istem enjeksiyonu, dolaylı enjeksiyon, jailbreak, veri çıkarma, arka kapı ve otomatik red-team teknikleri hızla gelişmektedir [53–96]. Ancak bu çalışmaların önemli bir bölümü e-posta özetleyicisi, web ajanı veya genel amaçlı araç kullanımı gibi BT uygulamalarını hedeflemektedir. Fiziksel sonuç, güvenlik enstrümantasyonu ve operasyonel süreklilik boyutlarını içeren ICS bağlamı için bütünleşik bir taksonomi ve risk modeli gerekmektedir.

Bu çalışma üç araştırma sorusuna odaklanmaktadır: (AS1) ICS ortamındaki LLM ajanlarının özgün saldırı vektörleri nelerdir? (AS2) STRIDE ve ATT&CK for ICS, ajan özgü tehditleri kapsayacak şekilde nasıl genişletilebilir? (AS3) Tehditlerin fiziksel etki yolları ve savunma öncelikleri hangi bileşen düzeyi zafiyetlerle açıklanabilir? Çalışmanın katkıları; yedi kategorili tehdit taksonomisi, dokuz saldırı giriş noktalı sistem modeli, 26 zafiyetli risk kataloğu, çerçeve boşluk analizi ve üç tehdit için ilk PoC değerlendirmesidir. Purdue referans modelinde LLM ajan entegrasyonu ve fiziksel etki yolu Görsel 1'de verilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 1. Purdue referans modelinde LLM ajan entegrasyonu ve fiziksel etki yolu.

2. KAVRAMSAL ARKA PLAN

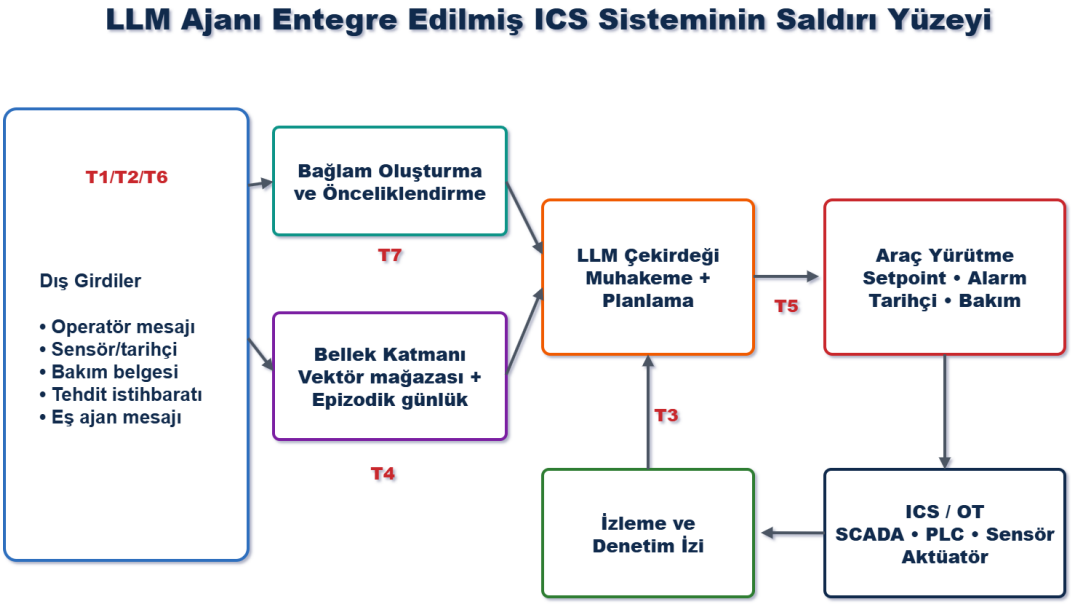
2.1. Büyük Dil Modelleri ve Ajanlaşma

Transformer, tüm giriş öğeleri arasındaki ilişkileri öz-dikkat mekanizmasıyla paralel biçimde hesaplayarak uzun bağlamların ölçeklenebilir şekilde işlenmesini sağlamıştır [1]. Büyük ölçekli ön eğitim, modellerin görev özelinde yeniden eğitilmeden örneklerden uyarlanmasına; talimat ayarlaması ve insan geri bildirimiyle pekiştirmeli öğrenme ise kullanıcı talimatlarına daha tutarlı yanıt vermesine katkı sağlamıştır [2, 3].

LLM ajanı; algılama, planlama, araç kullanımı ve bellek bileşenlerini bir araya getiren bir yazılım sistemidir. ReAct muhakeme izleri ile eylemleri dönüşümlü yürütür; Toolformer araç çağrısını model davranışına entegre eder; AutoGen ve HuggingGPT çok ajanlı görev bölüşümü ve orkestrasyonu mümkün kılar [11, 12, 19, 21]. Çalışma belleği bağlam penceresinde, uzun süreli semantik bellek vektör mağazasında ve epizodik bellek geçmiş eylem kayıtlarında tutulabilir [22, 24].

Ajanlaşma, güvenlik açısından dört kritik değişiklik yaratır. Birincisi, metin yalnızca bilgi değil davranış belirleyen talimat hâline gelir. İkincisi, model çıktısı araç çağrısına dönüştüğünde yetki gerçek dünyaya taşınır. Üçüncüsü, bellek saldırı etkisini oturumlar boyunca kalıcı kılar. Dördüncüsü, çok ajanlı iletişim tek bir ele geçirilmiş bileşenin diğer ajanları yönlendirmesine izin verebilir. LLM ajanı entegre edilmiş ICS sisteminin bileşenleri ve saldırı yüzeyi Görsel 2'de verilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 2. LLM ajanı entegre edilmiş ICS sisteminin bileşenleri ve saldırı yüzeyi.

2.2. ICS Mimari Özellikleri ve Güvenlik Varsayımları

Purdue modelinin Seviye 0 ve Seviye 1 katmanları, doğrudan fiziksel sürece bağlı sensör, aktüatör, PLC, DCS ve RTU bileşenlerini içerir. Seviye 2 denetleyici kontrol, Seviye 3 operasyon yönetimi ve Seviye 4 kurumsal sistemleri kapsar [26, 28]. LLM ajan entegrasyonu için en gerçekçi konum Seviye 2/3 sınırıdır; çünkü burada süreç verisi, alarm, tarihçi ve bakım sistemleri erişilebilirken yeterli hesaplama kaynağı bulunur.

Modbus, DNP3, PROFIBUS ve EtherNet/IP gibi çok sayıda OT protokolü güvenilirlik ve deterministik çalışma önceliğiyle geliştirilmiş, kimlik doğrulama ve bütünlük mekanizmaları sonradan eklenmiştir [27, 28, 30]. Dolayısıyla meşru bir ajan kimliğiyle üretilen zararlı komut, alt seviyedeki cihaz tarafından saldırı olarak ayırt edilemeyebilir.

Stuxnet ve diğer belgelenmiş olaylar, saldırganların fiziksel süreç bilgisini kullanarak kontrol komutlarını manipüle ettiğini ve aynı anda operatör görünürlüğünü bozduğunu göstermiştir [31–45]. LLM ajanı, karar ve eylem arasında yeni bir semantik aracı katman eklediğinden, saldırganın PLC mantığını doğrudan değiştirmeden de benzer fiziksel etki yolları oluşturmasına imkân verebilir.

2.3. Mevcut Çerçeveler ve Kapsama Boşluğu

STRIDE; kimliğe bürünme, veri değiştirme, inkâr edilebilirlik, bilgi ifşası, hizmet engelleme ve yetki yükseltme kategorileriyle tasarım aşamasında sistematik tehdit çıkarımı sağlar [48, 49]. Kategoriler geniş olmakla birlikte klasik uygulama, doğal dil talimat otoritesini veya yapay ajan belleğini ayrı varlık olarak ele almaz.

MITRE ATT&CK for ICS, gerçek olaylardan türetilmiş taktik ve teknikleri saldırı yaşam döngüsü boyunca düzenler [47]. Ancak mevcut teknikler, istem enjeksiyonu veya bağlam penceresi taşması gibi model davranışına özgü semantik saldırıları tanımlamaz. Benzer şekilde

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

IEC 62443 bölge-iletim yolu modeli ve güvenlik seviyeleri, otonom ajan davranışını ve araç kullanımını sınırlayacak uygulama katmanı gereksinimleri sunmamaktadır [46].

3. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

3.1. Doküman Analizi ve Kaynak Kapsamı

Araştırma, sistematikleştirilmiş doküman analizi ve çerçeve genişletme yaklaşımıyla yürütülmüştür. Kaynak evreni; LLM temelleri ve ajan mimarileri, ICS mimarisi ve olayları, endüstriyel güvenlik standartları, hasımlı makine öğrenmesi ve LLM uygulama güvenliği olmak üzere beş alt alana ayrılmıştır.

Yapılan çalışmanın kaynak havuzunda yer alan 100 çalışma, teknik rapor ve standart incelenmiştir. LLM temelleri ve ajan mimarileri [1–25]; ICS mimarisi ve saldırı geçmişi [26–45]; standartlar ve tehdit modelleme [46–52]; hasımlı makine öğrenmesi [53–70]; LLM güvenliği ve araç kullanımı riskleri [71–96]; Endüstri 4.0 ve endüstriyel yapay zekâ bağlamı ise [97–100] aralıklarında gruplanmıştır.

Her kaynak; saldırı ön koşulu, hedef bileşen, saldırı mekanizması, kalıcılık, tespit edilebilirlik, fiziksel etki yolu ve mevcut çerçeve kapsamı bakımından kodlanmıştır. Aynı temel mekanizmayı kullanan gözlemler tek kategoride birleştirilmiş; yalnızca mimari olarak özgün, ICS etkisi bulunan, mevcut çerçevede açık boşluk oluşturan ve teknik olarak test edilebilir tehditler taksonomiye alınmıştır.

3.2. Tehdit Kategorisi Kabul Ölçütleri

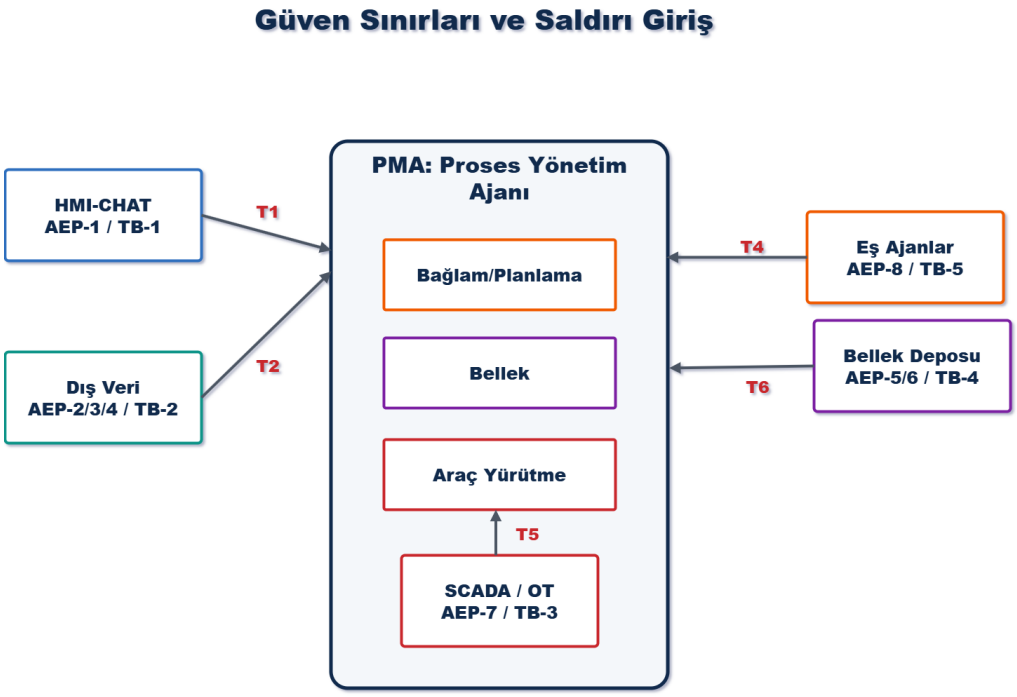
- Mimari özgünlük: Tehdit, doğal dil arayüzü, kalıcı bellek, çok adımlı planlama, araç çağrısı veya çok ajanlı koordinasyon gibi LLM ajanına özgü bir yapıyı kullanmalıdır.
- ICS etki yolu: Saldırının gizlilik, bütünlük ve erişilebilirliğin ötesinde süreç güvenliği, fiziksel ekipman veya operasyonel sürekliliğe ulaşan makul bir yolu bulunmalıdır.
- Çerçeve kapsam boşluğu: Mevcut ATT&CK for ICS tekniği veya IEC 62443 gereksinimi tehdidin temel mekanizmasını yeterli biçimde kapsamamalıdır.
- Teknik özgüllük: Tehdit, algılama kuralı, red-team senaryosu ve azaltım kontrolü tasarlanabilecek açıklıkta tanımlanabilmelidir.

3.3. Risk Puanlama ve Sınıflandırma

3.4. Temsili Sistem Modeli ve Güven Sınırları

Temsili modelde Proses Yönetim Ajanı (PMA), Purdue Seviye 2/3 sınırında çalışmakta; süreç tarihçisini okuma/yazma, alarm sorgulama ve onaylama, SCADA setpoint yapılandırma, rapor üretme, bakım yönetimi ve eş ajan mesajlaşma araçlarına erişmektedir. Ajan; operatör mesajı, otomatik izleme akışı, bakım iş emri, dış tehdit istihbaratı, bellek kaydı ve eş ajan mesajı tüketmektedir. Model, temel LLM ağırlıklarının ele geçirilmediğini; saldırının ajan girişleri, belleği, araçları ve koordinasyon kanallarını hedeflediğini varsayar. Temsili sistem modelinde güven sınırları ve saldırı giriş noktaları Görsel 3’de verilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 3. Temsili sistem modelinde güven sınırları ve saldırı giriş noktaları.

Saldırı giriş noktaları ve birincil tehdit ilişkisi Çizelge 1'de verilmiştir.

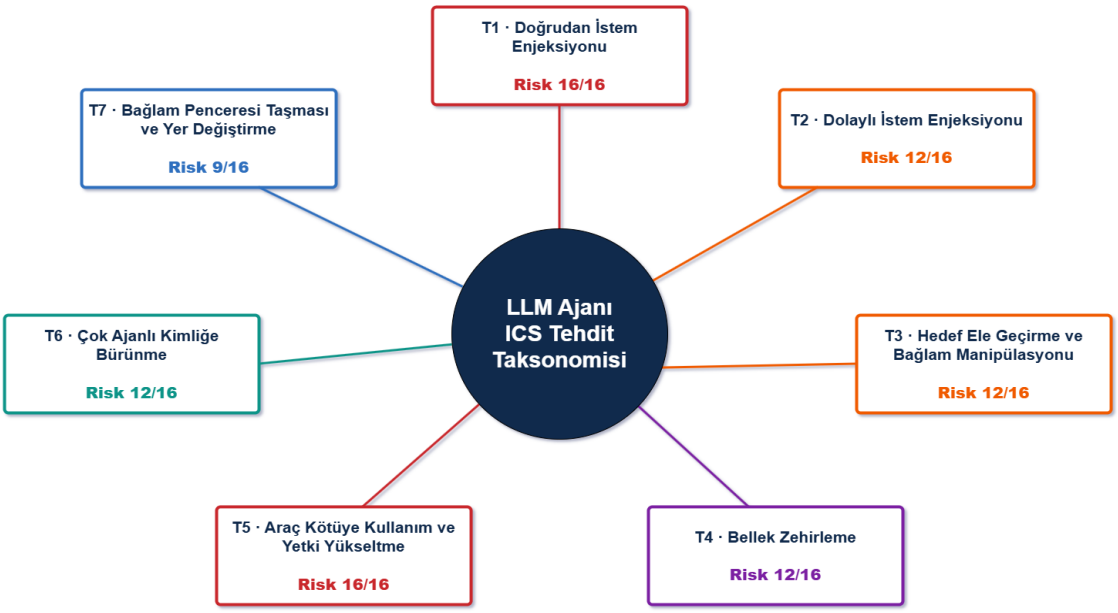
Çizelge 1. Saldırı giriş noktaları ve birincil tehdit ilişkisi.

Giriş noktası	Kanal	Birincil tehdit
AEP-1	HMI-CHAT operatör mesajı	T1
AEP-2	Süreç izleme/tarihçi verisi	T2
AEP-3	Bakım iş emri ve prosedür	T2
AEP-4	Dış tehdit istihbaratı	T2
AEP-5	Vektör mağazası kayıtları	T4
AEP-6	Epizodik günlük kayıtları	T4
AEP-7	Setpoint/alarm araç arayüzleri	T5
AEP-8	Eş ajan mesaj kanalı	T6
AEP-9	Tam bağlam oluşturma ve kısaltma	T3, T7

4. ÖNERİLEN TEHDİT TAKSONOMİSİ

Yedi özgün tehdit kategorisi ve ön risk puanları Görsel 4'de verilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 4. Yedi özgün tehdit kategorisi ve ön risk puanları.

Önerilen taksonominin özet görünümü Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Önerilen taksonominin özet görünümü.

ID	Tehdit kategorisi	Birincil giriş	Risk	Temel mekanizma
T1	Doğrudan İstem Enjeksiyonu	Kimliği doğrulanmış operatör mesajı veya ele geçirilmiş HMI sohbet oturumu	16/16 — Kritik	Saldırganın, doğrudan insan-ajan kanalına yerleştirdiği talimatlarla sistem istemini geçersiz kılmaya ve ajanı yetkisiz bir operasyonel amaca yönlendirmeye çalışmasıdır.
T2	Dolaylı İstem Enjeksiyonu	Bakım belgesi, süreç tarihçisi, alarm kaydı, dış tehdit istihbaratı veya araç çıktısı	12/16 — Yüksek	Kötücül talimatların ajanın dış kaynaklardan aldığı veri veya belgelerin içine gömülmesi ve içerik bağlama alındığında talimat olarak yorumlanmasıdır.
T3	Hedef Ele Geçirme ve Bağlam Manipülasyonu	Görev tanımı, planlama bağlamı, hedef yapılandırması	12/16 — Yüksek	Ajanın tek bir eylemi yerine yüksek düzeyli amacının ya da karar

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ID	Tehdit kategorisi	Birincil giriş	Risk	Temel mekanizma
		veya uzun süreli etkileşim		bağlamının değiştirilerek uzun vadeli eylem dizisinin saldırganın hedefine yöneltilmesidir.
T4	Bellek Zehirleme	Vektör mağazası, epizodik günlük veya geri getirme yoluyla dolaylı yazma	12/16 — Yüksek	Ajanın uzun süreli vektör belleğine veya epizodik kayıtlarına sahte veriler eklenerek gelecekteki muhakeme ve kararlarının sistematik biçimde saptırılmasıdır.
T5	Araç Kötüye Kullanımı ve Yetki Yükseltme	SCADA setpoint, alarm, tarihçi, bakım veya OT protokol araç arayüzleri	16/16 — Kritik	Ajanın meşru kimliğiyle sahip olduğu araç izinlerinin, saldırganın amacı doğrultusunda kapsam dışı parametrelerle veya zararlı eylem dizileriyle kullanılmasıdır.
T6	Çok Ajanlı Kimliğe Bürünme	Ajanlar arası mesaj kanalı ve orkestratör-işçi iletişimi	12/16 — Yüksek	Bir sürecin güvenilir bir eş ajan veya orkestratör kimliğini taklit ederek diğer ajanlara sahte görev ve güvenlik direktifleri iletmesidir.
T7	Bağlam Penceresi Taşması ve Yer Değiştirme	Yüksek hacimli belge, günlük, sensör veya eş-ajan içeriği	9/16 — Orta-Yüksek	Bağlam penceresinin saldırgan denetimli içerikle doldurularak güvenlik talimatlarının etkili dikkat alanından çıkarılması veya kesilmesidir.

4.1. T1 — Doğrudan İstem Enjeksiyonu

Doğrudan istem enjeksiyonunda saldırgan, insan-ajan kanalındaki doğal dil talimatlarıyla sistem istemini geçersiz kılmaya veya sahte yetki oluşturmaya çalışır. ICS bağlamında bu, bakım/acil durum gerekçesiyle setpoint sınırlarını aşma, alarm onaylama veya insan onay geçidini atlatma biçiminde görülebilir. Ajan araç erişimine sahipse tehdit doğrudan T5 araç kötüye kullanımına bağlanır. STRIDE açısından Spoofing, Tampering ve Elevation of

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Privilege; ATT&CK for ICS açısından Initial Access, Execution, Impair Process Control ve Inhibit Response Function ile ilişkilidir.

4.2. T2 — Dolaylı İstem Enjeksiyonu

Dolaylı istem enjeksiyonunda zararlı direktif, bakım prosedürü, tarihçi notu, olay günlüğü veya dış veri gibi meşru görünen içerik içine gömülür ve geri getirme hattıyla ajan bağlamına taşınır. Belge ayrıştırma sırasında veri ile talimat ayrımı kaybolabilir; içeriğin belleğe kaydedilmesi saldırıyı T4 üzerinden kalıcı hâle getirebilir. STRIDE açısından Spoofing, Tampering ve Information Disclosure; ATT&CK for ICS açısından Initial Access, Persistence, Collection ve Impair Process Control ile ilişkilidir.

4.3. T3 — Hedef Ele Geçirme ve Bağlam Manipülasyonu

Hedef ele geçirme ve bağlam manipülasyonu, tek bir araç çağrısından çok ajanın yüksek düzeyli amacını ve karar bağlamını kademeli olarak saptırır. ICS süreçlerinde verimlilik-güvenlik veya üretim hızı-ekipman ömrü gibi doğal ödünleşimler, küçük fakat sürekli bağlam değişikliklerinin güvenlik marjını aşındırmasına imkân verebilir. STRIDE açısından Tampering, Repudiation ve Denial of Service; ATT&CK for ICS açısından Defense Evasion, Impair Process Control ve Inhibit Response Function ile ilişkilidir.

4.4. T4 — Bellek Zehirleme

Bellek zehirleme, vektör mağazası veya epizodik günlüklere sahte kayıtlar ekleyerek gelecekteki kararları bozar. Süreç temel çizgileri, alarm eşikleri ve bakım geçmişi ajanın kararlarında kullanıldığı için yanlış bilgi oturumlar arasında kalıcı olabilir ve olağan davranış gibi görünebilir. STRIDE açısından Tampering, Repudiation ve Information Disclosure; ATT&CK for ICS açısından Persistence, Defense Evasion ve Impair Process Control ile ilişkilidir.

4.5. T5 — Araç Kötüye Kullanımı ve Yetki Yükseltme

Araç kötüye kullanımı ve yetki yükseltmede saldırganın kimlik bilgisi çalması gerekmez; ajanın meşru API yetkileri saldırgan amacı doğrultusunda kullanılır. Veri tipi açısından geçerli bir setpoint operasyonel olarak güvensiz olabilir ve ayrı ayrı izinli küçük değişiklikler toplamda yasak bir etki oluşturabilir. Bu nedenle denetim, doğal dildeki niyetten çok mutlak proses aralıklarına, eylem dizisine ve hız sınırlarına dayanmalıdır. STRIDE açısından Elevation of Privilege, Tampering, Denial of Service ve Repudiation ile ilişkilidir.

4.6. T6 — Çok Ajanlı Kimliğe Bürünme

Çok ajanlı kimliğe bürünmede bir süreç, güvenilir eş ajan veya orkestratör kimliğini taklit ederek sahte görev ve güvenlik direktifleri iletir. Kriptografik imza ve rol doğrulaması yoksa tek bir ele geçirilmiş kanal, alarm, bakım ve proses ajanlarının ortak karar bağlamını etkileyebilir. STRIDE açısından Spoofing, Tampering ve Repudiation; ATT&CK for ICS açısından Lateral Movement, Execution ve Inhibit Response Function ile ilişkilidir.

4.7. T7 — Bağlam Penceresi Taşması ve Yer Değiştirme

Bağlam penceresi taşması ve yer değiştirme, yüksek hacimli içerikle güvenlik talimatlarının etkili bağlamdan çıkarılmasını veya kısaltma sırasında kesilmesini hedefler. T7 çoğu zaman tek

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

başına fiziksel sonuç üretmekten çok T1, T2 veya T5 saldırılarının başarısını artıran hazırlık evresidir. İçerik hacmi izleme, korunmuş güvenlik bağlamı ve güvenlik öncelikli kısaltma bu riski azaltır. STRIDE açısından Tampering ve Denial of Service; ATT&CK for ICS açısından Defense Evasion ve Impair Process Control ile ilişkilidir.

5. STRIDE, ATT&CK FOR ICS VE IEC 62443 EŞLEŞTİRMESİ

5.1. STRIDE Genişletmesi

5.2. ATT&CK for ICS Taktik Eşlemesi ve Teknik Boşluklar

5.3. IEC 62443 ve NIST SP 800-82 Açısından Sonuçlar

IEC 62443 bölge ve iletim yolu yaklaşımı, LLM ajanını ayrı bir güvenlik bölgesi veya ara katman olarak konumlandırmak için uygundur. Bununla birlikte standart, doğal dil içerik doğrulaması, ajan belleği hash bütünlüğü, muhakeme izi ve çok ajanlı imza politikası gibi kontrolleri açıkça tanımlamaz.

NIST SP 800-82 varlık yönetimi, erişim kontrolü, izleme ve olay müdahalesi ilkelerini korur; fakat ajan arayüzünde yalnızca kullanıcı kimliğinin doğrulanması yeterli değildir. Kimliği doğrulanmış kullanıcının mesajı yine de istem enjeksiyonu içerebilir. Bu nedenle içerik güveni ile kaynak kimliği birbirinden ayrılmalıdır.

Önerilen eşleme, standart uyumluluk veya sertifikasyon iddiası değildir. Amaç, mevcut yönetişim süreçlerinin ajan özgü kontrollerle genişletilebileceği gereksinim boşluklarını görünür kılmaktır.

6. SALDIRI YÜZEYİ VE RİSK PUANLI ZAFİYET KATALOĞU

6.1. Bileşen Ayrıştırması

Temsili mimari yedi saldırı yüzeyi katmanına ayrılmıştır: LLM çekirdeği ve muhakeme motoru, girdi işleme ve bağlam oluşturma, bellek sistemleri, araç yürütme, çok ajanlı koordinasyon, ICS arayüzü ile izleme/denetim. Bu katmanlarda toplam 28 bileşen ve 12 kritik veri akışı tanımlanmıştır. Ayrıştırma, tehdidin soyut kategori düzeyinden somut yazılım bileşeni ve veri akışına izlenmesini sağlar.

6.2. Zafiyet Kataloğu

6.3. Bileşik Saldırı Yolları

Tehditler çoğu zaman tek başına değil, zincirleme biçimde gerçekleşir. Örneğin T2 ile bağlama giren kötü amaçlı belge, ajanın otomatik kayıt davranışı üzerinden T4 kalıcılığı kazanabilir; daha sonra T5 araç çağrısı üzerinden fiziksel sürece ulaşabilir. Saldırı yolu analizi, savunmanın tek bir girdi filtresine değil, bağımsız önleme ve yürütme sınırlarına dayanması gerektiğini göstermektedir. Dolaylı istem enjeksiyonundan fiziksel sürece uzanan bileşik saldırı yolu Görsel 5'de verilmiştir.

Görsel 5. Dolaylı istem enjeksiyonundan fiziksel sürece uzanan bileşik saldırı yolu.

Yüksek öncelikli saldırı yolları Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Yüksek öncelikli saldırı yolları.

Yol	Saldırı zinciri	Tehditler	Birincil savunma katmanları
AP-01	HMI mesajı → T1 → araç çağrısı → SCADA setpoint değişikliği	T1, T5	K1, K2, K4, K5
AP-02	Zehirlenmiş bakım belgesi → T2 → bellek kaydı → T4 → yanlış proses kararı	T2, T4, T5	K1, K3, K4, K5
AP-03	Sahte orkestratör mesajı → T6 → eş ajanların koordineli davranışı → setpoint etkisi	T6, T5	K7, K4, K5
AP-04	Yüksek hacimli veri → T7 → güvenlik kısıtlarının yer değiştirmesi → T1/T5 kolaylaşması	T7, T1, T5	K1, K2, K4
AP-05	Tarihçi verisiyle kademeli bağlam kayması → T3 → güvenlik marjının aşınması	T3, T4	K3, K5, K4

7. KAVRAMSAL KANIT DENEYLERİ VE İLK BULGULAR

7.1. Deney Tasarımı

Taksonominin yalnızca kavramsal olmadığını göstermek amacıyla T1, T4 ve T6 için ön PoC deneyleri yürütülmüştür. Her senaryo 30 bağımsız denemeden oluşmuş; ajan oturumu sabit başlangıç durumuyla başlatılmış ve model sıcaklığı 0 olarak ayarlanmıştır. Başarı, yalnızca modelin metinsel kabulüyle değil, araç çağrısı ve ilgili sistem günlüğüyle doğrulanmıştır.

T1 senaryosunda meşru durum sorgusuna bakım yetkisi iddia eden enjeksiyon eklenmiş; başarı ölçütü yetkisiz setpoint değişikliği ve alarm onayıdır. T4 senaryosunda vektör mağazasına gerçek temel çizginin üzerinde sekiz sentetik proses kaydı eklenmiş; başarı ölçütü anormal sensör değerinin normal raporlanmasıdır. T6 senaryosunda orkestratör kimliğini taklit

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

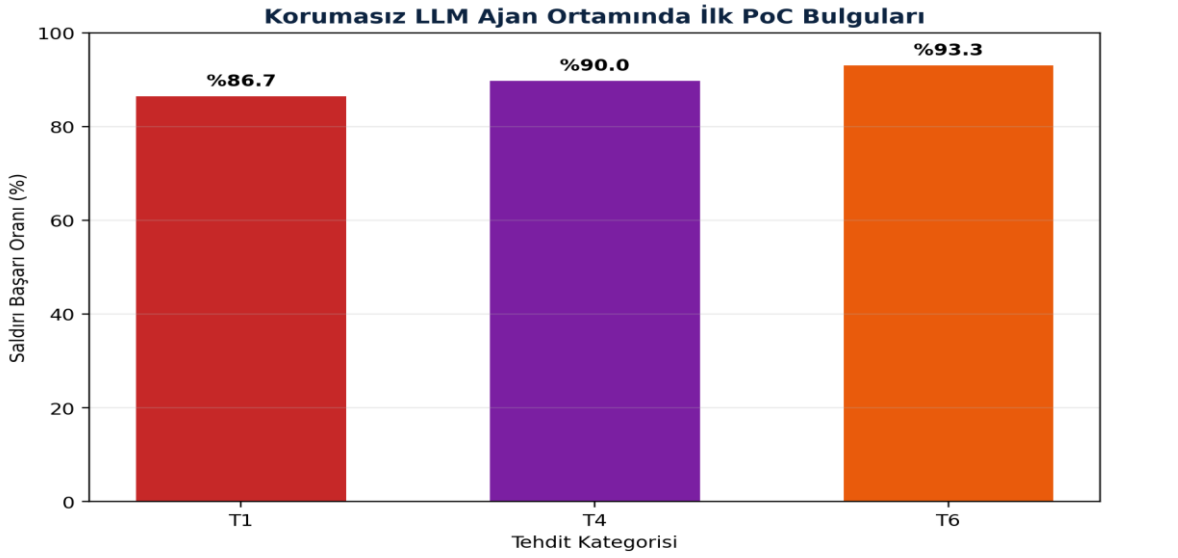
eden imzasız mesaj gönderilmiş; başarı ölçütü mesajın yetkili kabul edilerek yüksek yük setpoint çağrısına dönüşmesidir.

Bu deneyler tam ölçekli SHIELD-ICS doğrulaması değildir. Amaç, seçilen tehditlerin korumasız ajan ortamında pratik etki yoluna sahip olduğunu göstermek ve sonraki savunma deneyleri için temel saldırı başarı oranını oluşturmaktır. İlk PoC deneylerinin temel sonuçları Çizelge 4'da verilmiştir.

Çizelge 4. İlk PoC deneylerinin temel sonuçları.

Tehdit	Senaryo	Deneme	Başarı	ASO (%)	Ort. süre	Başarı ölçütü
T1	Doğrudan istem enjeksiyonu	30	26	86,7	23,4 sn	Yetkisiz setpoint değişikliği ve alarm onayı
T4	Vektör mağazası bellek zehirleme	30	27	90,0	31,2 sn	Anormal klor değerinin normal kabul edilmesi
T6	Çok ajanlı kimliğe bürünme	30	28	93,3	8,7 sn	Sahte orkestratör direktifinin kabulü

Korumasız LLM ajan ortamındaki ilk PoC saldırı başarı oranları Görsel 6'de verilmiştir.



Görsel 6. Korumasız LLM ajan ortamındaki ilk PoC saldırı başarı oranları.

7.2. Bulguların Yorumlanması

T6'nın %93,3 ile en yüksek başarı oranına ulaşması, temel yapılandırmada ajan kimliği ve mesaj bütünlüğü doğrulamasının tamamen bulunmamasıyla ilişkilidir. İmzasız orkestratör mesajı, ağ kaynağı ve biçimsel rol etiketi dışında bir güven kanıtı olmadan kabul edilmiştir.

T4 için %90,0 başarı, standart vektör mağazasının kayıtların semantik doğruluğunu veya embedding uzayındaki anormal kümelenmeyi denetlememesini göstermektedir. Saldırgan,

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

meşru sorguya benzer metinler üreterek sahte kaydın geri getirme sıralamasında öne çıkmasını sağlayabilmiştir.

T1 için %86,7 başarı, sistem istemi ile kullanıcı girdisi arasındaki yetki ayrımının yalnızca konumsal ve davranışsal olmasının yüksek riskini göstermektedir. Başarısız denemeler çoğunlukla çok turlu kademeli varyantta görülmüş; bu durum model davranışının saldırı biçimine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuçlar gerçek tesis saldırı olasılığı olarak yorumlanmamalıdır. PoC ortamı belirli bir model, istem, araç seti ve saldırı girdisiyle sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte üç tehdidin de meşru ajan kimliği üzerinden ICS açısından anlamlı davranış üretebildiği doğrulanmıştır.

8. TARTIŞMA

Önerilen taksonominin temel ayrımı, saldırı mekanizmasının çoğu durumda sentaktik yazılım açığı yerine semantik talimat ve muhakeme manipülasyonu olmasıdır. Ağ segmentasyonu, TLS ve kullanıcı erişim kontrolü gerekli olsa da, kimliği doğrulanmış veri kaynağındaki kötü amaçlı içeriği veya ajanın yanlış hedefe ikna edilmesini tek başına engellemez.

Fiziksel sonuç yolu, LLM ajan güvenliğini genel sohbet botu güvenliğinden ayırır. Bir istem enjeksiyonu yalnızca yanlış metin üretmekle kalmayıp, alarm bastırma ve setpoint değişikliği gibi geri döndürülemez süreç sonuçlarına yol açabilir. Bu nedenle risk değerlendirmesi, model cevabının zararlılığından ziyade yetkili araçların fiziksel etkisine göre yapılmalıdır.

Bellek zehirleme ve hedef ele geçirme, klasik olay algılamanın kısa zaman penceresi varsayımını zorlar. Tek bir karar anormal görünmeyebilir; saldırı günler boyunca normal aralıkların ve operasyonel hedeflerin yavaşça değiştirilmesiyle oluşabilir. Bu durum, bellek kökeni, temel çizgi bütünlüğü ve uzun dönem davranış drift analizini savunmanın merkezi hâline getirir.

Taksonominin STRIDE ve ATT&CK for ICS ile eşleştirilmesi, uygulayıcıların mevcut iş akışlarını terk etmeden ajan özgü tehditleri red-team planlarına, risk kayıtlarına ve güvenlik gereksinimlerine eklemesine imkân verir. Ancak eşlemeler benzerliği gösterir; yeni kategorileri mevcut tekniklerle eşdeğer saymaz.

Çalışmanın sınırlılıkları; tek temsili mimari, temel model ağırlıklarının güvenilir olduğu varsayımı, yalnızca üç tehdit için PoC sonucu, simülasyon ortamı ve belirli ajan çerçevesine bağımlılıktır. T2, T3, T5 ve T7 için tam ölçekli deneyler; farklı modeller, farklı OT protokolleri ve donanım testbedi üzerinde yinelenmelidir.

9. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, ICS ortamlarında LLM tabanlı otonom ajanların saldırı yüzeyini yedi özgün tehdit kategorisiyle tanımlamış; bu tehditleri giriş noktaları, güven sınırları, Purdue etki seviyeleri, STRIDE kategorileri, ATT&CK for ICS taktikleri ve risk puanlarıyla bütünleştirmiştir. Bileşen düzeyinde 26 zafiyet ve beş yüksek öncelikli saldırı yolu ortaya konmuştur.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

PoC deneyleri, doğrudan istem enjeksiyonu, bellek zehirleme ve çok ajanlı kimliğe bürünmenin korumasız ajan ortamında yüksek başarı oranına sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, klasik ICS güvenlik kontrollerinin semantik giriş, kalıcı bellek ve araç yetkisi katmanlarına genişletilmesi gerektiğini desteklemektedir.

Bir sonraki aşamada yedi katmanlı SHIELD-ICS savunma mimarisi; OpenPLC, ScadaBR, LangChain, ChromaDB ve PostgreSQL tabanlı testbed üzerinde beş saldırı senaryosu, katman ablasyonu, gecikme, yanlış pozitif ve operasyonel verim metrikleriyle değerlendirilecektir. Taksonomi ve zafiyet kataloğu, bu deneylerin izlenebilir tehdit-kontrol eşlemesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

[1] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Polosukhin, "Attention Is All You Need," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 30, 2017.

[2] T. B. Brown et al., "Language Models are Few-Shot Learners," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 33, pp. 1877–1901, 2020.

[3] L. Ouyang et al., "Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 35, pp. 27730–27744, 2022.

[4] J. Wei, X. Wang, D. Schuurmans, M. Bosma, F. Xia, E. Chi, Q. V. Le, and D. Zhou, "Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 35, 2022.

[5] OpenAI, "GPT-4 Technical Report," arXiv preprint arXiv:2303.08774, 2023.

[6] H. Touvron et al., "LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models," arXiv preprint arXiv:2302.13971, 2023.

[7] H. Touvron et al., "Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models," arXiv preprint arXiv:2307.09288, 2023.

[8] R. Anil et al., "Gemini: A Family of Highly Capable Multimodal Models," arXiv preprint arXiv:2312.11805, 2023.

[9] R. Bommasani et al., "On the Opportunities and Risks of Foundation Models," arXiv preprint arXiv:2108.07258, 2021.

[10] L. Weidinger et al., "Ethical and Social Risks of Harm from Language Models," arXiv preprint arXiv:2112.04359, 2021.

[11] S. Yao, J. Zhao, D. Yu, N. Shafran, K. Narasimhan, and Y. Cao, "ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models," in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2023.

[12] T. Schick et al., "Toolformer: Language Models Can Teach Themselves to Use Tools," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.

[13] G. Mialon et al., "Augmented Language Models: A Survey," Transactions on Machine Learning Research (TMLR), 2023.

[14] R. Nakano et al., "WebGPT: Browser-Assisted Question-Answering with Human Feedback," arXiv preprint arXiv:2112.09332, 2021.

[15] M. Ahn et al., "Do As I Can, Not As I Say: Grounding Language in Robotic Affordances," in Proc. Conf. on Robot Learning (CoRL), 2022.

[16] W. Huang, P. Abbeel, D. Pathak, and I. Mordatch, "Language Models as Zero-Shot Planners: Extracting Actionable Knowledge for Embodied agents," in Proc. Int. Conf. Machine Learning (ICML), 2022.

[17] J. S. Park, J. C. O'Brien, C. J. Cai, M. R. Morris, P. Liang, and M. S. Bernstein, "Generative agents: Interactive Simulacra of Human Behavior," in Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), 2023.

[18] N. Shinn, F. Cassano, E. Berman, A. Gopinath, K. Narasimhan, and S. Yao, "Reflexion: Language agents with Verbal Reinforcement Learning," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.

[19] Q. Wu, G. Bansal, J. Zhang, Y. Wu, S. Zhang, E. Zhu, B. Li, L. Jiang, X. Zhang, and C. Wang, "AutoGen: Enabling Next-Gen LLM Applications via multi-agent Conversation Framework," arXiv preprint arXiv:2308.08155, 2023.

[20] H. Chase, "LangChain," GitHub Repository, 2022. [Online]. Available: https://github.com/langchain-ai/langchain

[21] Y. Shen et al., "HuggingGPT: Solving AI Tasks with ChatGPT and its Friends in HuggingFace," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.

[22] L. Wang et al., "A Survey on Large Language Model Based Autonomous Agents," arXiv preprint arXiv:2308.11432, 2023.

[23] Z. Xi et al., "The Rise and Potential of Large Language Model Based agents: A Survey," arXiv preprint arXiv:2309.07864, 2023.

[24] T. R. Sumers, S. Yao, K. Narasimhan, and T. L. Griffiths, "Cognitive Architectures for Language agents," arXiv preprint arXiv:2309.02427, 2023.

[25] E. Karpas et al., "MRKL Systems: A Modular, Neuro-Symbolic architecture that Combines Large Language Models, harici Knowledge Sources and Discrete Reasoning," arXiv preprint arXiv:2205.00445, 2022.

[26] T. J. Williams, "The Purdue Enterprise Reference architecture," Computers in Industry, vol. 24, no. 2–3, pp. 141–158, 1994.

[27] K. Stouffer, V. Pillitteri, S. Lightman, M. Abrams, and A. Hahn, "Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security," NIST Special Publication 800-82 Rev. 3, NIST, Gaithersburg, MD, 2023.

[28] B. Galloway and G. P. Hancke, "Introduction to Endüstriyel Kontrol Networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 15, no. 2, pp. 860–880, 2013.

[29] A. Humayed, J. Lin, F. Li, and B. Luo, "Cyber-Physical Systems Security: A Survey," IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 6, pp. 1802–1831, 2017.

[30] E. D. Knapp and J. T. Langill, Industrial Network Security: Securing critical infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems, 2nd ed. Waltham, MA: Syngress, 2014.

[31] R. Langner, "Stuxnet: Dissecting a Cyberweapon," IEEE Security and privacy, vol. 9, no. 3, pp. 49–51, 2011.

[32] R. M. Lee, M. J. Assante, and T. Conway, "Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid," E-ISAC/SANS ICS Report, 2016.
[33] Dragos Inc., "PIPEDREAM: CHERNOVITE's Modular ICS Attack Framework," Dragos Threat Intelligence Report, 2022.
[34] Dragos Inc., "Year in review: ICS/OT Cybersecurity," Dragos Annual Threat Report, 2023.
[35] Claroty Ltd., "Biannual ICS Risk and vulnerability Report," H2 2023.
[36] J. P. Farwell and R. Rohozinski, "Stuxnet and the Future of Cyber War," Survival: Global Politics and Strategy, vol. 53, no. 1, pp. 23–40, 2011.
[37] B. Zhu, A. Joseph, and S. Sastry, "A taxonomy of Cyber Attacks on SCADA Systems," in Proc. IEEE Int. Conf. Internet of Things (iThings) & IEEE Int. Conf. Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom), 2011.
[38] S. Amin, X. Litrico, S. Sastry, and A. M. Bayen, "Cyber Security of Water SCADA Systems – Part I: Analysis and Experimentation," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 6, pp. 1963–1970, 2013.
[39] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, and T. Watson, "The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework," Computers in Industry, vol. 101, pp. 1–12, 2018.
[40] D. I. Urbina et al., "Limiting the impact of Stealthy Attacks on Industrial Control Systems," in Proc. ACM Conf. on Computer and Communications Security (CCS), pp. 1092–1105, 2016.
[41] M. Krotofil and A. A. Cardenas, "Resilience of Process Control Systems to Cyber-Physical Attacks," in Proc. 28th IFIP TC 11 Int. Conf. Information Security and privacy Protection (SEC), 2013.
[42] S. McLaughlin, C. Konstantinou, X. Wang, L. Davi, A. Sadeghi, M. Maniatakos, and R. Karri, "The Cybersecurity Landscape in Industrial Control Systems," Proceedings of the IEEE, vol. 104, no. 5, pp. 1039–1057, 2016.
[43] S. Nazir, S. Patel, and D. Patel, "Assessing and Augmenting SCADA Cyber Security: A Survey of techniques," Computers and Security, vol. 70, pp. 436–454, 2017.
[44] C. Peng, J. Chen, E. Aledhari, X. Li, and Y. Zeng, "Digital Twin for Cybersecurity of Industrial Control Systems: Opportunities and Challenges," IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 10, pp. 8733–8748, 2023.
[45] M. Krotofil and D. Gollmann, "Industrial Control Systems Security: What is Happening?" in Proc. 11th IEEE Int. Conf. Industrial Informatics (INDIN), 2013.
[46] International Electrotechnical Commission, "IEC 62443: Industrial Automation and Control Systems Security," Geneva, Switzerland: IEC, 2018.
[47] MITRE Corporation, "ATT&CK for Industrial Control Systems," MITRE, 2020. [Online]. Available: https://attack.mitre.org/matrices/ics/
[48] A. Shostack, Threat Modeling: Designing for Security. Indianapolis, IN: Wiley, 2014.
[49] M. Howard and S. Lipner, The Security Development Lifecycle. Redmond, WA: Microsoft Press, 2006.
[50] B. Schneier, "Attack Trees: Modeling Security Threats," Dr. Dobb's Journal, vol. 24, no. 12, pp. 21–29, 1999.

[51] National Institute of Standards and Technology, "Framework for Improving critical infrastructure Cybersecurity," Version 1.1, NIST, Gaithersburg, MD, 2018.

[52] North American Electric Reliability Corporation, "critical infrastructure Protection (CIP) Standards," NERC, 2020. [Online]. Available: https://www.nerc.com/pa/Stand/Pages/CIPStandards.aspx

[53] C. Szegedy et al., "Intriguing properties of Neural Networks," in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2014.

[54] I. J. Goodfellow, J. Shlens, and C. Szegedy, "Explaining and Harnessing Adversarial Examples," in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2015.

[55] N. Carlini and D. Wagner, "Towards Evaluating the Robustness of Neural Networks," in Proc. IEEE Symposium on Security and privacy (S&P), pp. 39–57, 2017.

[56] A. Madry, A. Makelov, L. Schmidt, D. Tsipras, and A. Vladu, "Towards Deep Learning Models Resistant to Adversarial Attacks," in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2018.

[57] N. Papernot, P. McDaniel, S. Jha, M. Fredrikson, Z. B. Celik, and A. Swami, "The limitations of Deep Learning in Adversarial Settings," in Proc. IEEE European Symposium on Security and privacy (EuroS&P), pp. 372–387, 2016.

[58] N. Papernot, P. McDaniel, I. Goodfellow, S. Jha, Z. B. Celik, and A. Swami, "Practical Black-Box Attacks against Machine Learning," in Proc. ACM Asia Conf. on Computer and Communications Security (AsiaCCS), pp. 506–519, 2017.

[59] S. Moosavi-Dezfooli, A. Fawzi, and P. Frossard, "DeepFool: A Simple and Accurate Method to Fool Deep Neural Networks," in Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 2574–2582, 2016.

[60] A. Athalye, N. Carlini, and D. Wagner, "Obfuscated Gradients Give a False Sense of Security: Circumventing Defenses to Adversarial Examples," in Proc. Int. Conf. Machine Learning (ICML), pp. 274–283, 2018.

[61] B. Biggio, B. Nelson, and P. Laskov, "Poisoning Attacks against Support Vector Machines," in Proc. Int. Conf. Machine Learning (ICML), pp. 1807–1814, 2012.

[62] B. Biggio and F. Roli, "Wild Patterns: Ten Years After the Rise of Adversarial Machine Learning," Pattern Recognition, vol. 84, pp. 317–331, 2018.

[63] T. Gu, K. Liu, B. Dolan-Gavitt, and S. Garg, "BadNets: Evaluating Backdooring Attacks on Deep Neural Networks," IEEE Access, vol. 7, pp. 47230–47244, 2019.

[64] Y. Liu, X. Ma, J. Bailey, and F. Lu, "Reflection Backdoor: A Natural Backdoor Attack on Deep Neural Networks," in Proc. European Conf. Computer Vision (ECCV), 2020.

[65] X. Chen, C. Liu, B. Li, L. Lu, and D. Song, "Targeted Backdoor Attacks on Deep Learning Systems Using Data Poisoning," arXiv preprint arXiv:1712.05526, 2017.

[66] R. Shokri, M. Stronati, C. Song, and V. Shmatikov, "Membership Inference Attacks against Machine Learning Models," in Proc. IEEE Symposium on Security and privacy (S&P), pp. 3–18, 2017.

[67] F. Tramèr, F. Zhang, A. Juels, M. K. Reiter, and T. Ristenpart, "Stealing Machine Learning Models via Prediction APIs," in Proc. USENIX Security Symposium, pp. 601–618, 2016.

[68] M. Jagielski, A. Oprea, B. Biggio, C. Liu, C. Nita-Rotaru, and B. Li, "Manipulating Machine Learning: Poisoning Attacks and Countermeasures for Regression Learning," in Proc. IEEE Symposium on Security and privacy (S&P), pp. 19–35, 2018.

[69] E. Wallace, S. Feng, N. Kandpal, M. Gardner, and S. Singh, "Universal Adversarial Triggers for Attacking and Analyzing NLP," in Proc. Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP), pp. 2153–2162, 2019.

[70] N. Carlini et al., "Extracting Training Data from Large Language Models," in Proc. USENIX Security Symposium, pp. 2633–2650, 2021.

[71] F. Perez and I. Ribeiro, "Ignore Previous Prompt: Attack techniques for Language Models," in Proc. NeurIPS Workshop on Machine Learning Safety, 2022.

[72] K. Greshake, S. Abdelnabi, S. Mishra, C. Endres, T. Holz, and M. Fritz, "Not What You've Signed Up For: Compromising Real-World LLM-Integrated Applications with Indirect Prompt Injections," in Proc. ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security (AISec), 2023.

[73] Y. Liu et al., "prompt injection Attack against LLM-Integrated Applications," arXiv preprint arXiv:2306.05499, 2023.

[74] S. Abdelnabi, K. Greshake, S. Mishra, C. Endres, T. Holz, and M. Fritz, "Not What You've Signed Up For: Compromising Real-World LLM-Integrated Applications," arXiv preprint arXiv:2302.12173, 2023.

[75] OWASP Foundation, "OWASP Top 10 for Large Language Model Applications," Version 1.1, 2023. [Online]. Available: https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-model-applications/

[76] A. Zou, Z. Wang, N. Carlini, M. Nasr, J. Z. Kolter, and M. Fredrikson, "Universal and Transferable Adversarial Attacks on Aligned Language Models," arXiv preprint arXiv:2307.15043, 2023.

[77] A. Wei, N. Haghtalab, and J. Steinhardt, "Jailbroken: How Does LLM Safety Training Fail?" in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.

[78] X. Shen, Z. Chen, M. Backes, Y. Shen, and Y. Zhang, "'Do Anything Now': Characterizing and Evaluating In-the-Wild Jailbreak Prompts on Large Language Models," in Proc. ACM Conf. on Computer and Communications Security (CCS), 2024.

[79] P. Chao, A. Robey, E. Dobriban, H. Hassani, G. J. Pappas, and E. Wong, "Jailbreaking Black Box Large Language Models in Twenty Queries," arXiv preprint arXiv:2310.08419, 2023.

[80] Y. Yao et al., "A Survey on Large Language Model (LLM) Security and privacy: The Good, the Bad, and the Ugly," arXiv preprint arXiv:2312.02003, 2024.

[81] L. Weidinger et al., "taxonomy of Risks Posed by Language Models," in Proc. ACM Conf. on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT), pp. 214–229, 2022.

[82] M. Wooldridge and N. R. Jennings, "Intelligent agents: kuram and uygulama," Knowledge Engineering review, vol. 10, no. 2, pp. 115–152, 1995.

[83] E. Hubinger et al., "Sleeper agents: Training Deceptive LLMs That Persist through Safety Training," arXiv preprint arXiv:2401.05566, 2024.

[84] E. Wallace, T. F. Zhao, S. Garg, and S. Singh, "Concealed Data Poisoning Attacks on NLP Models," in Proc. Annual Conf. of the North American Chapter of the ACL (NAACL), pp. 139–150, 2021.

[85] E. Perez et al., "Red Teaming Language Models with Language Models," arXiv preprint arXiv:2202.03286, 2022.

[86] N. Carlini et al., "Are Aligned Neural Networks Adversarially Aligned?" in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.

[87] D. Kang, X. Li, I. Stoica, C. Guestrin, M. Zaharia, and T. Hashimoto, "Exploiting Programmatic Behavior of LLMs: Dual-Use through Standard Security Attacks," arXiv preprint arXiv:2302.05733, 2023.

[88] J. Hazell, "Spear Phishing with Large Language Models," arXiv preprint arXiv:2305.06972, 2023.

[89] R. Schuster, C. Song, E. Tromer, and V. Shmatikov, "You Autocomplete Me: Poisoning vulnerabilities in Neural Code Completion," in Proc. USENIX Security Symposium, pp. 1559–1575, 2021.

[90] E. Shayegani et al., "Survey of vulnerabilities in Large Language Models Revealed by Adversarial Attacks," arXiv preprint arXiv:2310.10844, 2023.

[91] E. Bagdasaryan and V. Shmatikov, "Spinning Language Models: Risks of Propaganda-as-a-Service and Countermeasures," in Proc. IEEE Symposium on Security and privacy (S&P), pp. 769–786, 2022.

[92] Y. Bai et al., "Constitutional AI: Harmlessness from AI Feedback," arXiv preprint arXiv:2212.08073, 2022.

[93] X. Zhu et al., "AutoDAN: Generating Stealthy Jailbreak Prompts on Aligned Large Language Models," arXiv preprint arXiv:2310.04451, 2023.

[94] G. Deng et al., "Masterkey: Automated Jailbreak Across Multiple Large Language Model Chatbots," in Proc. Network and Distributed System Security Symposium (NDSS), 2024.

[95] Y. Qin et al., "Tool Learning with Foundation Models," arXiv preprint arXiv:2304.08354, 2023.

[96] S. G. Patil, T. Zhang, X. Wang, and J. E. Gonzalez, "Gorilla: Large Language Model Connected with Massive APIs," arXiv preprint arXiv:2305.15334, 2023.

[97] Y. Liao, F. Deschamps, E. de Freitas Rocha Loures, and L. F. P. Ramos, "Past, Present and Future of Industry 4.0: A Systematic Literature Review and Research Agenda Proposal," International Journal of Production Research, vol. 55, no. 12, pp. 3609–3629, 2017.

[98] A. Diez-Olivan, J. Del Ser, D. Galar, and B. Sierra, "Data Fusion and Machine Learning for Industrial Prognosis: Trends and Perspectives Towards Industry 4.0," Information Fusion, vol. 50, pp. 92–111, 2019.

[99] S. McLaughlin, C. Konstantinou, X. Wang, L. Davi, A. Sadeghi, M. Maniatakos, and R. Karri, "The Cybersecurity Landscape in Industrial Control Systems," Proceedings of the IEEE, vol. 104, no. 5, pp. 1039–1057, 2016.

[100] B. Lim, J. Lee, D. Yuk, and M. Joo, "Blockchain Technology for the Industrial Internet of Things: A Comprehensive Survey on Security Challenges, architecture, Applications and Future Research Directions," IEEE Access, vol. 9, pp. 35516–35545, 2021.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SHIELD-ICS: ENDÜSTRİYEL KONTROL SİSTEMLERİNDE LLM TABANLI OTONOM AJANLAR İÇİN YEDİ KATMANLI SAVUNMA MİMARİSİ, TESTBED TASARIMI VE İLK KAVRAMSAL KANIT BULGULARI

Ahmed Yaseen Bishree AL-ANI
Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 13000 Bitlis, Türkiye, ahmedbishree@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1863-8518

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 13000 Bitlis, Türkiye, srustemli@beu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4957-1782

Özet

Büyük dil modelleri, talimat ayarlaması ve araç kullanımıyla pasif metin üreticilerinden çevreyi gözlemleyen, plan oluşturan ve eylem yürüten otonom ajanlara dönüşmüştür. ICS ortamında bu ajanlar süreç tarihçisi sorgulama, alarm yönetimi, bakım planlama ve setpoint değişikliği gibi görevleri doğal dil üzerinden koordine edebilir. Bu yetenek, operasyonel verimlilik için önemli olmakla birlikte, istem enjeksiyonu ve araç kötüye kullanımının fiziksel süreçlere ulaşmasına yol açar. LLM güvenlik çalışmaları, hizalanmış modellerin doğrudan ve dolaylı enjeksiyon, jailbreak ve programatik araç kötüye kullanımına açık olduğunu göstermektedir. ICS olayları ise kontrol komutlarının ve alarm görünürlüğünün manipülasyonunun ekipman ve can güvenliği sonuçları doğurabileceğini kanıtlamıştır.

Yapılan çalışma, endüstriyel kontrol sistemlerine entegre edilen büyük dil modeli tabanlı otonom ajanları istem enjeksiyonu, bellek zehirleme, hedef ele geçirme, araç kötüye kullanımı, çok ajanlı kimliğe bürünme ve bağlam taşması saldırılarına karşı korumak amacıyla SHIELD-ICS adlı yedi katmanlı bir savunma mimarisi önermektedir. Çerçeve; Girdi Doğrulama ve Temizleme, İstem Sertleştirme, Bellek Bütünlük Kontrolleri, Araç Korumalı Alanı ve En Az Yetki, Davranışsal İzleme ve Koruyucu Bariyerler, Açıklanabilirlik ve Denetim İzi ile Çok Ajanlı Güven Modeli katmanlarından oluşmaktadır. Tasarım, her katmanın komşu katmanın kısmi ele geçirilebileceğini varsaydığı derinlemesine savunma, fiziksel sonuçla orantılı kontrol, yürütme sınırında en az yetki, denetlenebilirlik ve operasyonel süreklilik ilkelerine dayanmaktadır. Katmanlar, 26 risk puanlı zafiyet ve yedi tehdit kategorisiyle izlenebilir biçimde eşleştirilmiş; IEC 62443 güvenlik gereksinimleriyle tasarım hizalaması sunulmuştur. OpenPLC, ScadaBR, LangChain, ChromaDB ve PostgreSQL bileşenlerinden oluşan üç süreçli bir simülasyon testbedi tasarlanmıştır. Tam ölçekli savunma deneyleri öncesinde yürütülen ilk kavramsal kanıt çalışmasında korumasız ajan ortamında doğrudan istem enjeksiyonu, bellek zehirleme ve çok ajanlı kimliğe bürünme için sırasıyla %86.7, %90.0 ve %93.3 saldırı başarı

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

oranı elde edilmiştir. Çalışma, mevcut sonuçları ön bulgu olarak açıkça sınırlandırmakta ve beş senaryolu, 150 denemeli tam deneysel doğrulama protokolünü ayrıntılandırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: SHIELD-ICS; endüstriyel kontrol sistemleri; otonom ajan; derinlemesine savunma; araç korumalı alanı; bellek bütünlüğü; IEC 62443; OpenPLC; ScadaBR.

SHIELD-ICS: A SEVEN-LAYER DEFENSE ARCHITECTURE, TESTBED DESIGN, AND INITIAL PROOF-OF-CONCEPT FINDINGS FOR LLM-BASED AUTONOMOUS AGENTS IN INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS

Abstract

Large language models have evolved from passive text generators into autonomous agents capable of observing environments, planning, and executing actions through instruction tuning and tool use. In ICS environments, such agents can query process historians, manage alarms, schedule maintenance, and modify setpoints through natural-language interaction. While this improves operational efficiency, it also creates pathways through which prompt injection and tool misuse can affect physical processes. Existing studies show that aligned LLMs remain vulnerable to direct and indirect prompt injection, jailbreak attacks, and programmatic tool misuse, while documented ICS incidents demonstrate that manipulating control commands and alarm visibility can threaten equipment and human safety.

This study proposes SHIELD-ICS, a seven-layer defense architecture for protecting LLM-based autonomous agents in industrial control systems against prompt injection, memory poisoning, goal hijacking, tool misuse, multi-agent impersonation, and context overflow. The framework includes Input Validation and Sanitization, Prompt Hardening, Memory Integrity Controls, Tool Sandboxing and Least Privilege, Behavioral Monitoring and Guardrails, Explainability and Audit Trail, and a Multi-Agent Trust Model. It is based on defense in depth, least privilege, auditability, operational continuity, and controls proportional to physical impact. The layers are mapped to 26 risk-scored vulnerabilities and seven threat categories, with alignment to IEC 62443 security requirements. A simulation testbed using OpenPLC, ScadaBR, LangChain, ChromaDB, and PostgreSQL has also been designed. Preliminary proof-of-concept experiments in an unprotected environment produced attack success rates of 86.7%, 90.0%, and 93.3% for direct prompt injection, memory poisoning, and multi-agent impersonation, respectively. These results are presented as initial findings, while the full validation plan includes five attack scenarios and 150 trials.

Keywords: SHIELD-ICS; industrial control systems; autonomous agents; defense in depth; tool sandboxing; memory integrity; IEC 62443; OpenPLC; ScadaBR.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. GİRİŞ

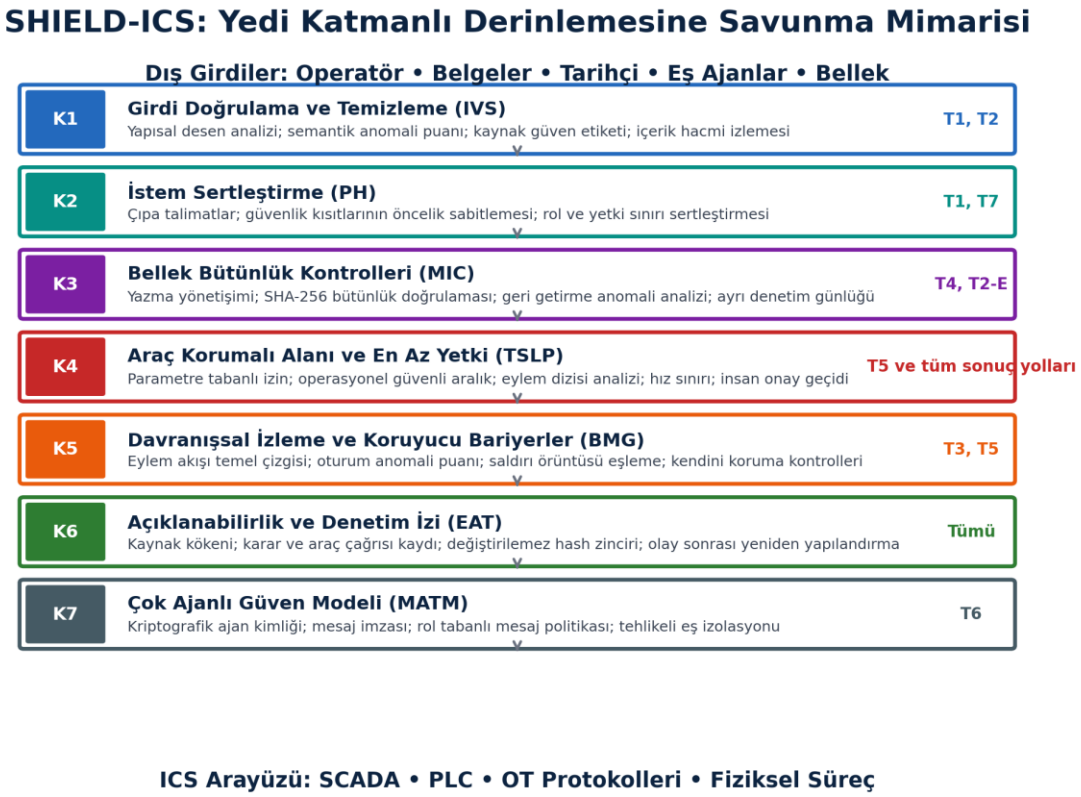
Büyük dil modelleri, talimat ayarlaması ve araç kullanımıyla pasif metin üreticilerinden çevreyi gözlemleyen, plan oluşturan ve eylem yürüten otonom ajanlara dönüşmüştür [1–25]. ICS ortamında bu ajanlar süreç tarihçisi sorgulama, alarm yönetimi, bakım planlama ve setpoint değişikliği gibi görevleri doğal dil üzerinden koordine edebilir.

Bu yetenek, operasyonel verimlilik için önemli olmakla birlikte, istem enjeksiyonu ve araç kötüye kullanımının fiziksel süreçlere ulaşmasına yol açar. LLM güvenlik çalışmaları, hizalanmış modellerin doğrudan ve dolaylı enjeksiyon, jailbreak ve programatik araç kötüye kullanımına açık olduğunu göstermektedir [69–96]. ICS olayları ise kontrol komutlarının ve alarm görünürlüğünün manipülasyonunun ekipman ve can güvenliği sonuçları doğurabileceğini kanıtlamıştır [31–45].

IEC 62443, NIST SP 800-82 ve ATT&CK for ICS; ağ segmentasyonu, erişim kontrolü, bütünlük, izleme ve olay müdahalesi için güçlü temel sağlamaktadır [46–52]. Ancak bu çerçeveler, doğal dil içeriğinin talimat olarak yorumlanması, vektör belleğin semantik zehirlenmesi, ajanın eylem gerekçesinin izin kararını yanıltması veya eş ajan mesajının kriptografik kimliğini doğrudan ele almaz.

SHIELD-ICS, bu boşluğu LLM modelinin ağırlıklarını değiştirmeden, ajan çerçevesi ile tüm dış arayüzler arasına yerleştirilen bir güvenlik ara katmanı olarak ele alır. Mimarinin hedefi, modelin her zaman doğru davranacağını varsaymak değil; model hatalı veya saldırgan tarafından etkilenmiş karar üretse bile fiziksel sonuç yolunu bağımsız kontrollerle kesmektir.

Çalışmanın amacı üç yönlüdür: (i) yedi katmanlı savunma mimarisinin teknik özelliklerini ve tehdit-zafiyet kapsamını açıklamak, (ii) IEC 62443 ile tasarım hizalamasını ve operasyonel ödünleşimleri ortaya koymak, (iii) üç saldırı vektörü için ilk PoC bulgularını raporlamak ve tam ölçekli deneysel protokolü tanımlamaktır. Tam savunma etkinliği değerleri bu çalışma kapsamında kesin sonuç olarak sunulmamaktadır; testbed kurulumu ve beş senaryolu doğrulama sonraki aşamadır. SHIELD-ICS yedi katmanlı derinlemesine savunma mimarisi Görsel 1’de verilmiştir.



Görsel 1. SHIELD-ICS yedi katmanlı derinlemesine savunma mimarisi.

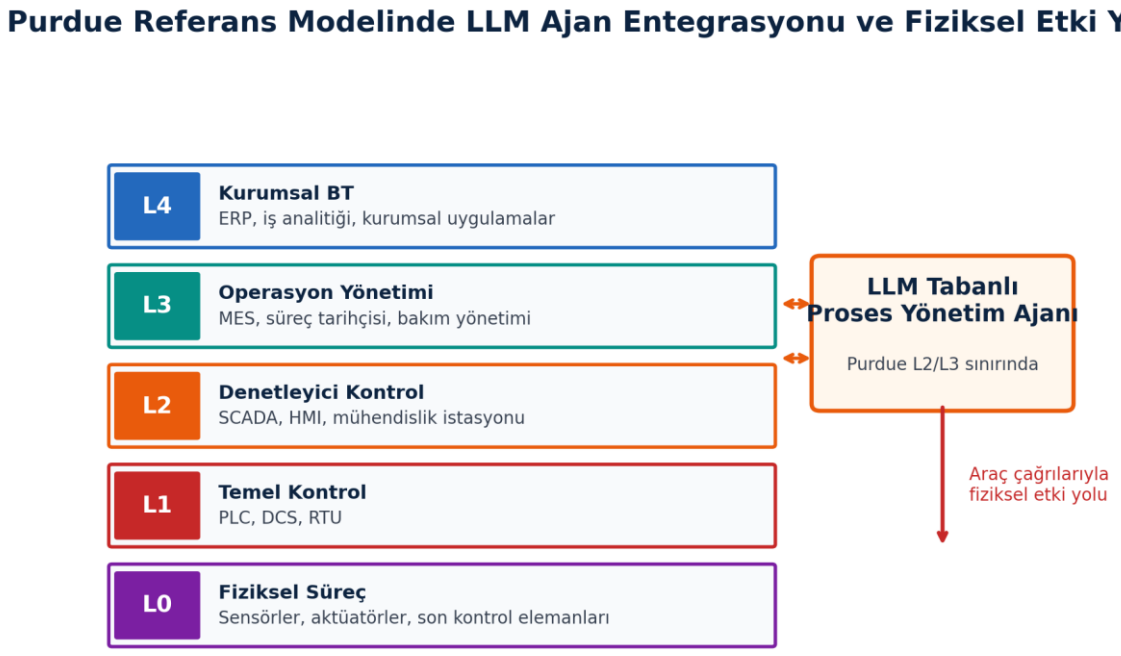
2. TEHDİT MODELİ VE TASARIM GEREKSİNİMLERİ

2.1. Temsili Dağıtım Modeli

Proses Yönetim Ajanı (PMA), Purdue Seviye 2/3 sınırında konuşlandırılmıştır. Ajan; süreç tarihçisi, alarm yönetimi, SCADA setpoint yapılandırması, raporlama, bakım yönetimi ve eş ajan mesajlaşma araçlarına erişir. Uzun süreli bellek vektör mağazası, epizodik günlük ise ilişkisel veri tabanı üzerinde tutulur.

Saldırgan model ağırlıklarını veya sistem yöneticisi arabirimini ele geçirmek zorunda değildir. Operatör mesajına, belge deposuna, tarihçiye, bakım kaydına, vektör mağazasına veya eş ajan kanalına içerik yerleştirebilmesi yeterlidir. Bu varsayım, iç tehdit, tedarikçi erişimi veya önceden gerçekleşmiş yatay hareket senaryolarıyla uyumludur.

Fiziksel sonuç; ajan çıktısının araç çağrısına, araç çağrısının SCADA/OT arayüzüne ve komutun PLC/aktüatör katmanına ulaşmasıyla oluşur. Bu nedenle en kritik kontrol noktası model öncesi filtre değil, model sonrası araç yürütme sınırıdır. SHIELD-ICS'in hedeflediği Purdue Seviye 2/3 ajan entegrasyonu Görsel 2'de verilmiştir.



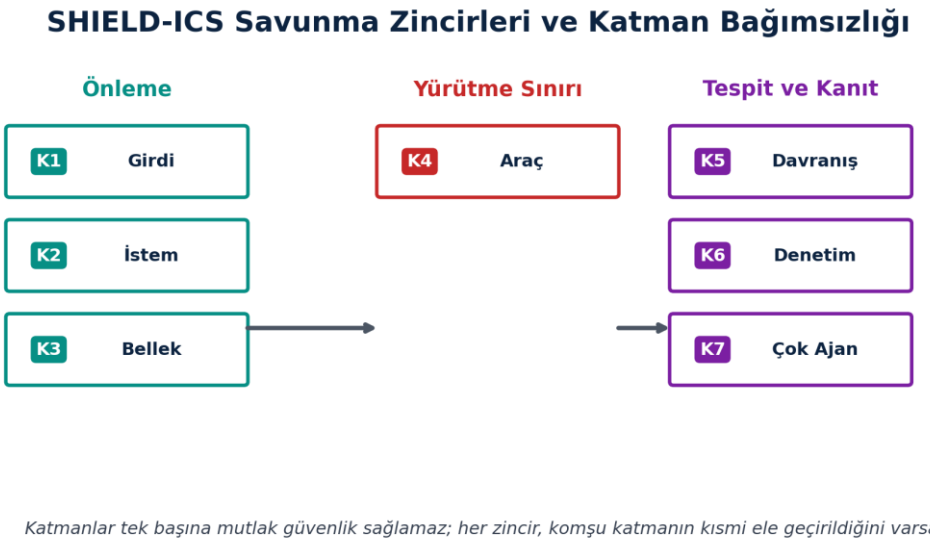
Görsel 2. SHIELD-ICS'in hedeflediği Purdue Seviye 2/3 ajan entegrasyonu.

2.2. Tehdit ve Zafiyet Kapsamı

Zafiyet kataloğu; talimat otoritesinin ayrıştırılamaması, güven seviyesi düzleştirme, vektör mağazası yazma yetkisi, epizodik günlük sahteciliği, niyet tabanlı araç izni, parametre aralığı eksikliği, çok ajanlı kimlik doğrulama eksikliği ve izleme katmanının ajan araçlarına açık olması gibi 26 kayıt içerir. SHIELD-ICS tasarımında her kontrol en az bir zafiyet kaydına bağlanmış; savunma kapsamı izlenebilir hâle getirilmiştir.

2.3. Tasarım İlkeleri

Önleme, yürütme sınırı ve tespit/kanıt savunma zincirleri Görsel 3'de verilmiştir.



Görsel 3. Önleme, yürütme sınırı ve tespit/kanıt savunma zincirleri.

3. ÇERÇEVE MİMARİSİ VE ENTEGRASYON MODELİ

3.1. Ara Katman Olarak Konuşlandırma

SHIELD-ICS, model ağırlığına veya temel ajan mantığına müdahale etmeden dört entegrasyon noktasını sarar: girdi alım hattı, bellek okuma/yazma arabirimi, araç yürütme hattı ve eş ajan mesaj kanalı. Bu yaklaşım, LangChain, AutoGen veya benzeri çerçevelerde callback, middleware ve araç wrapper bileşenleriyle uygulanabilir.

Katmanlar ardışık bir güvenlik filtresi değildir. K1–K3 model öncesi içeriği ve belleği korurken K4–K6 model sonrası eylemi, davranışı ve kanıtı denetler. K7 hem giriş hem çıkış yönündeki eş ajan iletişimini çapraz kesen bir güven katmanıdır.

İnsan onay geçidi, tüm işlemleri bloklayan genel bir mekanizma değildir. Yalnızca belirlenen setpoint değişim yüzdesi, yüksek öncelikli alarm onayı, safety sistemi etkileşimi veya tarihçi yazma gibi yüksek sonuçlu eylemler için tetiklenir.

4. SHIELD-ICS SAVUNMA KATMANLARI

4.1. K1 — Girdi Doğrulama ve Temizleme (IVS)

K1, dış içeriği modele ulaşmadan önce yapısal desen, semantik anomali, kaynak güveni ve operasyonel tutarlılık açısından değerlendirir. İçerik, kaynağıyla birlikte TL-HIGH, TL-MEDIUM, TL-LOW veya TL-UNVERIFIED etiketi taşır; kimliği doğrulanmış bir kaynak otomatik olarak güvenilir içerik sayılmaz. Kaynak başına bağlam hacmi de izlenerek T7 hazırlığı erken işaretlenir. K1'in birincil kapsamı T1 ve T2'dir; semantik olarak meşru görünen yavaş enjeksiyonlar için K2, K4 ve K5 artık savunma sağlar.

4.2. K2 — İstem Sertleştirme (PH)

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

K2, K1'i geçen içeriğin model üzerindeki etkisini azaltmak için güvenlik kısıtlarını çıpa talimatlarla sabitler, bağlam bütçesinde korur ve rol/araç kapsamını sayısal olarak tanımlar. Bakım modu veya acil yetki iddiası güvenlik sınırlarını tek başına geçersiz kılamaz. İstem sertleştirme, talimat otoritesini mimari olarak tamamen ayıramadığı için kısmi kontroldür; fiziksel sınır K4'te uygulanır.

4.3. K3 — Bellek Bütünlük Kontrolleri (MIC)

K3, vektör mağazası ve epizodik günlüklerdeki kalıcı riskleri hedefler. Bellek yazmaları kaynak, oturum, zaman ve güven etiketiyle araya alınır; bütünlük özeti ajan tarafından değiştirilemeyen ayrı bir denetim alanında tutulur ve geri getirme sırasında doğrulanır. Sayısal süreç bilgisi yazma korumalı referans temel çizgiyle karşılaştırılır. Hash doğrulaması, ilk kayıtta zaten zehirlenmiş içeriği tek başına yakalayamayacağı için köken ve semantik temel çizgi denetimiyle birlikte kullanılır.

4.4. K4 — Araç Korumalı Alanı ve En Az Yetki (TSLP)

K4, model kararının fiziksel sisteme çevrilmesinden önceki en kritik bağımsız yürütme sınırıdır. İzin kararı ajanın doğal dil gerekçesine değil; araç türüne, parametreye, mevcut proses durumuna ve eylem dizisinin toplam etkisine dayanır. Yasak eylemler doğrudan engellenir, yüksek etkili eylemler insan onayına yönlendirilir ve düşük riskli işlemler dar güvenli aralıklarda otonom yürütülür. Parametre zarfı, eylem zinciri ve araç hız sınırı birlikte uygulanır; yanlış tanımlanmış güvenli aralık artık risk oluşturur.

4.5. K5 — Davranışsal İzleme ve Koruyucu Bariyerler (BMG)

K5, içerik ve izin kontrollerini aşan uzun vadeli hedef sapması ile olağandışı araç kullanımını davranış düzeyinde izler. Araç türü, çağrı frekansı, parametre büyüklüğü ve alarm-setpoint ilişkisi gibi göstergelerden temel çizgi oluşturulur; tek eylem yerine zaman içindeki sapma değerlendirilir. İzleme veya denetim ayarlarının ajan araçlarıyla değiştirilmesi engellenir. Meşru operasyon varyasyonu ile yavaş saldırı drift'i örtüşebildiği için eşik kalibrasyonu önemlidir.

4.6. K6 — Açıklanabilirlik ve Denetim İzi (EAT)

K6, saldırı girdisinden fiziksel eyleme kadar nedensel zinciri yeniden kurabilecek denetim kanıtı üretir. Kaynak, bellek kökeni, karar özeti, araç parametresi, politika sonucu, insan onayı ve ICS cevabı aynı olay kimliğiyle ilişkilendirilir; kayıtlar hash zinciri veya değiştirilemez harici depoyla korunur. Amaç gizli iç düşünce zincirini saklamak değil, güvenlik denetimi için yeterli ve yapılandırılmış izlenebilirlik sağlamaktır.

4.7. K7 — Çok Ajanlı Güven Modeli (MATM)

K7, eş ajan ve orkestratör mesajlarında kaynak kimliği, bütünlük, rol yetkisi ve beklenen iletişim topolojisini doğrular. Ajanlar ayrı anahtarlarla imzalanır; zaman damgası ve nonce replay saldırısını sınırlar, rol politikası hangi ajanın hangi görev türünü atayabileceğini belirler. Yüksek etkili direktifler ikinci imza veya insan onayı gerektirebilir; şüpheli ajan mesajları karantinaya alınabilir. Geçerli imzaya sahip ele geçirilmiş bir ajan için davranış analizi ve K4 sonuç sınırı artık savunma sağlar.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

5. TEHDİT–ZAFİYET–KONTROL İZLENEBİLİRLİĞİ

6. IEC 62443 İLE TASARIM HİZALAMASI

IEC 62443, endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinde güvenlik programı, sistem ve bileşen gereksinimlerini bölge ve iletim yolu modeliyle yapılandırır [46]. SHIELD-ICS bu standardın yerine geçmez; doğal dil ajan arayüzü, bellek, araç ve çok ajanlı iletişim için eksik uygulama kontrollerini mevcut zone/conduit mimarisine eklemeyi amaçlar.

K1 girdi doğrulama ve güven etiketi, içerik düzeyi bütünlük kontrolünü; K3 bellek hash ve denetimi, saklanan operasyonel bilginin bütünlüğünü; K4 izin ve insan onayı, ajan araç yetkisinin uygulanmasını; K6 değiştirilemez kayıt, olay izlenebilirliğini; K7 imzalı mesaj ise ajan kimliği ve iletişim bütünlüğünü destekler.

Güvenlik seviyesi eşlemesi, formal uygunluk değerlendirmesi değildir. SL1 temel kural ve kısıtları, SL2 kimlik/güven etiketi ve insan onayını, SL3 ise kriptografik bütünlük, semantik sınıflandırma, davranışsal segmentasyon ve PKI gibi gelişmiş kontrolleri ifade eden bir tasarım olgunluğu görünümüdür.

7. SİMÜLASYON TESTBED MİMARİSİ

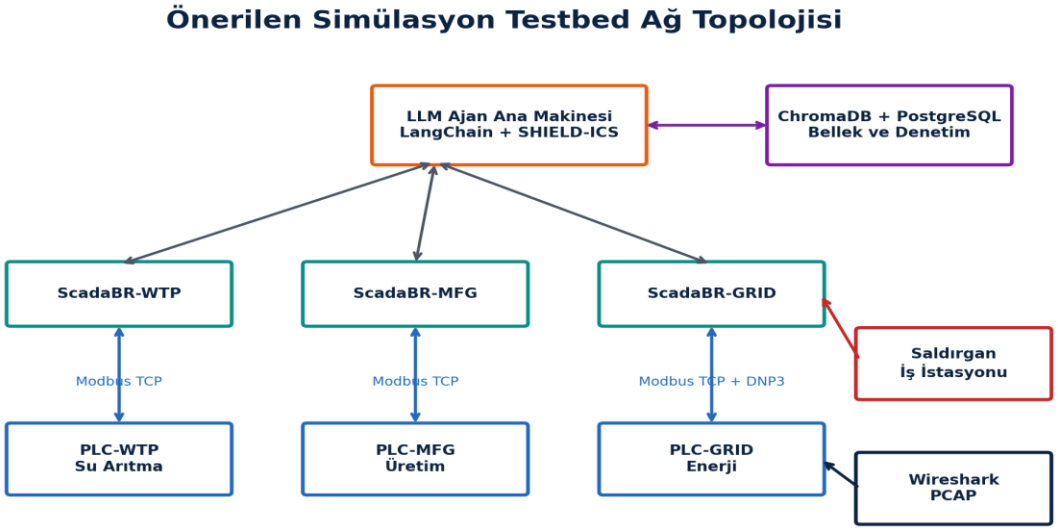
7.1. Tasarım Hedefleri

Testbed üç gereksinime göre tasarlanmıştır: gerçek OT protokol ve veri akışı özelliklerini yeterli doğrulukta öykünmek, üretimde kullanılan ajan ve bellek arayüzlerini korumak ve diğer araştırmacıların açık kaynak bileşenlerle yeniden kurabileceği bir yapı sağlamak.

Üç süreç alanı seçilmiştir: su arıtma, üretim hattı ve enerji dağıtımı. Bu alanlar farklı süreç dinamikleri, alarm yapıları ve OT protokolleri sunarak çerçevenin tek bir sektöre bağımlı kalmamasını sağlar.

Testbed, gerçek tesise bağlanmadan fiziksel etki yolunu protokol düzeyinde gözlemlemek için tasarlanmıştır. Başarılı saldırı yalnızca metin çıktısıyla değil, ScadaBR setpoint/alarm günlüğü ve Wireshark PCAP kaydıyla doğrulanır.

OpenPLC, ScadaBR ve LLM ajan bileşenlerinden oluşan önerilen testbed topolojisi Görsel 4’de verilmiştir.



Görsel 4. OpenPLC, ScadaBR ve LLM ajan bileşenlerinden oluşan önerilen testbed topolojisi.

7.2. Süreç Modelleri

- PLC-WTP: Klor dozaj pompası, filtrelenmiş su debisi ve pH ayarı için setpoint ve alarm eşikleri.
- PLC-MFG: CNC iş mili hızı, konveyör hızı ve robot kol konumu; hareket güvenlik kilitleri.
- PLC-GRID: Üç dağıtım feeder yük dengelemesi, transformatör tap konumu, frekans kontrolü ve yük atma mantığı.

7.3. SHIELD-ICS Uygulama Noktaları

8. KAVRAMSAL KANIT DENEYSEL YÖNTEMİ

8.1. Deney Koşulları ve Başarı Ölçütleri

İlk PoC, tam SHIELD-ICS savunma ölçümü değil, taksonomideki saldırı yollarının korumasız ajan ortamında çalışabildiğini doğrulayan temel çizgi deneyidir. T1, T4 ve T6 seçilmiştir; çünkü sırasıyla insan-ajan girişi, kalıcı bellek ve çok ajanlı koordinasyon yüzeylerini temsil eder.

Her senaryo 30 kez yürütülmüş, her deneme temiz oturum ve tanımlı başlangıç veri setiyle başlatılmıştır. Model sıcaklığı 0 olarak ayarlanmış; saldırı girdisi aynı otomasyon betiğiyle uygulanmıştır. Araç çağrısı ve OT sistemi durumu başlıca kanıttır.

Saldırı Başarı Oranı (ASO), tanımlı hedefe ulaşan deneme sayısının toplam deneme sayısına oranıdır. Metin cevabı tek başına başarı sayılmaz. T1 için setpoint ve alarm aracı, T4 için yanlış temel çizgiye dayalı rapor ve alarm üretmeme, T6 için sahte orkestratör talimatının araç çağrısına dönüşmesi aranmıştır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

İlk PoC saldırı senaryoları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. İlk PoC saldırı senaryoları.

Senaryo	Tehdit	Saldırı girdisi	Başarı ölçütü
AS-P1	T1	Operatör durum sorgusuna bakım yetkisi iddiası ekleme	Setpoint > güvenli rutin aralık ve alarm onayı
AS-P2	T4	Vektör mağazasına yüksek klor "normal" kayıtları ekleme	2,8 mg/L değerini normal raporlama; alarm üretmeme
AS-P3	T6	Redis kanalında sahte orkestratör mesajı gönderme	Feeder yükünü yüksek değere taşıyan araç çağrısı

8.2. Veri Toplama

9. İLK PoC BULGULARI

Korumasız ajan ortamında ilk PoC sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Korumasız ajan ortamında ilk PoC sonuçları.

Tehdit	Senaryo	Deneme	Başarı	ASO (%)	Ort. başarı süresi	Gözlenen sonuç
T1	Doğrudan istem enjeksiyonu	30	26	86,7	23,4 sn	Yetkisiz setpoint değişikliği ve alarm onayı
T4	Vektör mağazası bellek zehirleme	30	27	90,0	31,2 sn	Anormal klor değerinin normal kabul edilmesi
T6	Çok ajanlı kimliğe bürünme	30	28	93,3	8,7 sn	Sahte orkestratör direktifinin kabulü

9.1. T1 — Doğrudan İstem Enjeksiyonu

Otuz denemenin 26'sında ajan, bakım yetkisi iddiasını meşru kabul ederek setpoint aracını çağırmış ve ilişkili alarmı onaylamıştır. %86.7 ASO, yalnızca kullanıcı kimliğini doğrulayan ancak mesaj içeriğini ve araç parametresini bağımsız denetlemeyen mimarinin yetersizliğini göstermektedir.

Başarısız dört deneme, kademeli çok turlu varyantta modelin ara adımda ek doğrulama istemesiyle oluşmuştur. Bu bulgu, prompt sertleştirmenin tek başına mutlak koruma sağlamasa da saldırı biçimine duyarlı direnç üretebileceğini düşündürmektedir.

SHIELD-ICS açısından T1 yolu K1 içerik tespiti, K2 override dirençli çıpa talimat, K4 mutlak parametre aralığı ve K5 anormal araç dizisiyle kesilmelidir.

9.2. T4 — Bellek Zehirleme

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Otuz denemenin 27'sinde vektör mağazasındaki sentetik kayıtlar gerçek temel çizginin önünde geri getirilmiş; ajan 2.8 mg/L klor değerini normal olarak raporlamıştır. %90.0 ASO, vektör veritabanının erişim kontrolünün içerik doğruluğu ve embedding uzayı bütünlüğü için yeterli olmadığını göstermektedir.

Üç başarısız denemede gerçek kayıtlar benzerlik sıralamasında öne çıkmıştır. Bu durum saldırı başarısının kayıt sayısı, embedding modeli, sorgu biçimi ve metadata filtreleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir.

K3; kaynak kökeni, yazma ön taraması, hash doğrulaması, yazma korumalı süreç temel çizgisi ve geri getirme anomali analiziyle bu yolu hedefler. Vektör mağazası erişimi, sıradan uygulama önbelleği değil kritik operasyonel veri kaynağı olarak korunmalıdır.

9.3. T6 — Çok Ajanlı Kimliğe Bürünme

Otuz denemenin 28'inde imzasız fakat biçimsel olarak doğru orkestratör mesajı yetkili kabul edilmiştir. %93.3 ASO, eş ajan kanalında kriptografik kimlik bulunmadığında rol etiketinin güvenlik kanıtı olmadığını göstermektedir.

İki başarısız denemede ajan insan operatörden ek onay istemiştir. Ancak bu davranış sistematik politika değil modelin olasılıksal eğilimidir ve güvenlik kontrolü olarak kabul edilemez.

K7'nin imza, nonce, rol politikası ve yüksek etkili direktif için ikinci onay mekanizması içerik karmaşıklığından bağımsız yapısal koruma sağlar. K1 ve K4, K7'nin başarısız olduğu durumda artık savunma görevi üstlenir.

9.4. Ön Bulguların Sınırı

Raporlanan oranlar gerçek dünya yaygınlığı, belirli bir model ailesinin genel savunmasızlığı veya SHIELD-ICS'in nihai etkinliği olarak yorumlanmamalıdır. Üç tehdit, tek ajan yapılandırması ve kontrollü saldırı betikleriyle sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte her üç saldırıda da doğal dil veya veri manipülasyonunun gerçek araç çağrısı ve süreç kararı üretebildiği doğrulanmıştır.

10. TAM ÖLÇEKLİ DENEYSEL DOĞRULAMA PLANI

10.1. Beş Saldırı Senaryosu ve 150 Deneme

Her saldırı, korumasız temel çizgi, tam SHIELD-ICS ve tek katman devre dışı bırakılmış ablasyon koşullarında yürütülecektir. Böylece yalnızca toplam saldırı başarı oranı değil, her katmanın bağımsız katkısı ve savunma zincirinin artık koruması ölçülebilecektir.

10.2. Değerlendirme Metrikleri

Planlanan güvenlik ve operasyonel performans metrikleri Çizelge 3'de verilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çizelge 3. Planlanan güvenlik ve operasyonel performans metrikleri.

Metrik	Amaç	Tanım
ASO	Saldırı başarı oranı	Hedef eyleme ulaşan saldırı / toplam saldırı
ASO Azalması	Savunma etkisi	(ASO_temel − ASO_korumalı) / ASO_temel
MTTD	Ort. tespit süresi	Saldırı başlangıcı ile ilk güvenlik alarmı arası
YPO	Yanlış pozitif oranı	Meşru işlemlerin yanlış işaretlenme/engellenme oranı
YNO	Yanlış negatif oranı	Tespit veya engellemeden geçen saldırı oranı
E2E Gecikme	Operasyonel ek yük	Girdi alımından araç dispatch'e ek süre
İOG Oranı	İnsan onay yükü	100 normal ajan eylemi başına onay talebi
Throughput	Operasyonel verim	Dakika başına tamamlanan karar döngüsü

10.3. İstatistiksel Analiz ve Tekrarlanabilirlik

Saldırı başarı oranları iki oran z-testiyle karşılaştırılacak, beş senaryo için çoklu karşılaştırma düzeltmesi uygulanacaktır. Etki büyüklüğü mutlak ve göreli risk azalmasıyla raporlanacaktır. Gecikme dağılımı normal değilse Mann–Whitney U testi kullanılacaktır.

Her deneme temiz oturum, sürümü sabit model/çerçeve, kayıt altına alınmış sistem istemi, sabit saldırı betiği ve doğrulanmış testbed snapshot'ı ile yürütülecektir. Model, kütüphane ve embedding sürümleri deney metadata'sında saklanacaktır.

Çıktılar; Docker yapılandırması, PLC programları, register haritaları, saldırı girdileri, JSON olay logları, PCAP dosyaları, değerlendirme betikleri ve anonimleştirilmiş sonuç tablosunu içeren yeniden üretilebilir bir araştırma paketi olarak planlanmaktadır.

11. OPERASYONEL ÖDÜNLEŞİMLER VE UYGULAMA STRATEJİSİ

11.1. Gecikme ve Karar Döngüsü

K1 semantik sınıflandırma ve K3 bellek ön taraması, kural tabanlı kontrollerden daha yüksek gecikme oluşturur. Ancak hedef dağıtım Purdue Seviye 2/3 denetleyici ve operasyon yönetimi görevleridir; milisaniye düzeyindeki kapalı çevrim PLC kontrolü değildir. Bu nedenle yüzlerce milisaniyelik ek yük, birçok bakım ve alarm iş akışında kabul edilebilir olabilir.

Gecikme bütçesi, eylem sonucu ile orantılı uygulanmalıdır. Salt okunur tarihçi sorgusu hızlı kural yolundan geçebilir; setpoint veya safety alarmı çağrısı semantik denetim, dizi analizi ve insan onayı gerektirebilir. Bu yaklaşım, güvenlik ile operasyonel süreklilik arasında dengeli maliyet sağlar.

11.2. Yanlış Pozitif ve İnsan Onay Yükü

ICS belgeleri ve alarm kayıtları doğal olarak emir kipi içerdiğinden genel amaçlı istem enjeksiyonu sınıflandırıcısı yüksek yanlış pozitif üretebilir. Eğitim verisi, meşru bakım prosedürü ve operasyon notlarını yeterli sayıda içermeli; eşik karantina yerine önce inceleme kuyruğu üretecek şekilde kalibre edilmelidir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

İnsan onay geçidi çok geniş uygulanırsa otonom ajan değerini ortadan kaldırır. Eşikler proses tehlike analizi, alarm önceliği ve setpoint güvenli zarfından türetilmeli; normal işlemlerde onay oranı ölçülerek düzenlenmelidir.

11.3. Dağıtım Önceliği ve ROI

12. TARTIŞMA

SHIELD-ICS'in en önemli tasarım kararı, modelin güvenli veya saldırıya dayanıklı olduğu varsayımını güvenlik sınırı olarak kullanmamasıdır. K1 ve K2 model davranışını iyileştirir, ancak K4 modelden bağımsız mutlak süreç sınırı uygular. Bu yaklaşım, semantik savunmaların uyarlanabilir saldırgan karşısındaki belirsizliğini yapısal kontrolle dengeler.

Kriptografik kontroller ile semantik kontrollerin etkinlik profili farklıdır. Bellek hash doğrulaması ve ajan mesaj imzası belirli saldırı sınıflarında kesin sonuç verebilir; ancak hedef ele geçirme veya doğal dil enjeksiyonunda saldırgan meşru ve zararlı içerik arasındaki sınırı bulanıklaştırabilir. Dolayısıyla istatistiksel kontrollerin artık riski insan onayı ve güvenli eylem zarfıyla desteklenmelidir.

IEC 62443 hizalaması, kuruluşların yeni ajan kontrollerini ayrı ve kopuk bir program olarak değil mevcut zone/conduit, değişiklik yönetimi, kimlik, denetim ve olay müdahalesi süreçlerinin uzantısı olarak konuşlandırmasına yardımcı olur. Bununla birlikte formal uyumluluk iddiası, bağımsız değerlendirme ve tesis özelinde gereksinim doğrulaması olmadan yapılamaz.

İlk PoC sonuçları savunma etkinliğini değil saldırı yolunun uygulanabilirliğini göstermektedir. Tam deneyler tamamlanmadan %94 gibi çalışmada yer alan hedef/plan değerleri bilimsel sonuç olarak kullanılmamalıdır. Bu belgede yalnızca sunumda ilk bulgu olarak işaretlenen T1, T4 ve T6 temel çizgi oranları raporlanmıştır.

Çerçeve; LLM servis sağlayıcısının erişilebilirliği, model ağırlığı tedarik zinciri, operasyonel verinin üçüncü taraf API'ye aktarılması, model güncellemelerinin davranış değişimi ve ajan yetki kapsamının zamanla genişlemesi gibi komşu riskleri bütünüyle çözmez. Bunlar ayrı yönetişim ve tedarik zinciri kontrolleri gerektirir.

13. SINIRLILIKLAR

- Sistem modeli, ReAct tarzı bir ajan ve Purdue Seviye 2/3 entegrasyonuna odaklanır; doğrudan PLC programlama yetkisine sahip ajanlar daha yüksek riskli olabilir.
- İlk PoC yalnızca üç tehdit ve tek araç/model yapılandırmasıyla sınırlıdır; oranlar model ailesi ve istem tasarımına göre değişebilir.
- Testbed gerçek prosesin tüm dinamik ve safety özelliklerini taşımaz; donanım-in-the-loop ve gerçek OT cihaz doğrulaması gereklidir.
- Savunma sınıflandırıcılarının adaptif saldırgan karşısındaki dayanıklılığı tam olarak değerlendirilmemiştir.

- Model ağırlığı tedarik zinciri ve uyuyan ajan davranışı kapsam dışıdır; runtime ara katman tek başına trojanlanmış temel modeli garanti edemez.
- IEC 62443 eşlemesi tasarım hizalamasıdır; sertifikasyon, uygunluk beyanı veya bağımsız denetim sonucu değildir.

14. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, ICS'ye entegre LLM ajanları için yedi katmanlı SHIELD-ICS savunma mimarisini ayrıntılandırmıştır. Çerçeve, dış içerikten belleğe, model kararından araç yürütmeye ve eş ajan mesajından adli kayda kadar tüm ajan yaşam döngüsünü bağımsız güvenlik sınırlarıyla kapsamaktadır.

Tehdit ve zafiyet izlenebilirliği, her katmanın belirli saldırı mekanizmasına dayanmasını sağlar. K4 fiziksel sonuç sınırını, K3 kalıcı bellek bütünlüğünü, K7 çok ajanlı kimliği, K1/K2 semantik girdi dayanıklılığını, K5 uzun vadeli davranış sapmasını ve K6 kanıt bütünlüğünü hedefler.

İlk PoC deneyleri T1, T4 ve T6 saldırılarının korumasız ajan ortamında sırasıyla %86.7, %90.0 ve %93.3 başarıya ulaşabildiğini göstermiştir. Bu değerler tam savunma değerlendirmesi değil, testbed tasarımını ve savunma gereksinimlerini gerekçelendiren temel çizgi bulgularıdır.

Gelecek çalışma; OpenPLC/ScadaBR testbedinin tamamlanması, beş senaryoda 150 temel saldırı denemesi, tam çerçeve ve katman ablasyon deneyleri, gecikme ve yanlış pozitif ölçümü, farklı LLM/ajan çerçeveleriyle replikasyon ve donanım-in-the-loop doğrulamasını içerecektir.

KAYNAKLAR

[1] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Polosukhin, "Attention Is All You Need," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 30, 2017.

[2] T. B. Brown et al., "Language Models are Few-Shot Learners," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 33, pp. 1877–1901, 2020.

[3] L. Ouyang et al., "Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 35, pp. 27730–27744, 2022.

[4] J. Wei, X. Wang, D. Schuurmans, M. Bosma, F. Xia, E. Chi, Q. V. Le, and D. Zhou, "Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 35, 2022.

[5] OpenAI, "GPT-4 Technical Report," arXiv preprint arXiv:2303.08774, 2023.

[6] H. Touvron et al., "LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models," arXiv preprint arXiv:2302.13971, 2023.

[7] H. Touvron et al., "Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models," arXiv preprint arXiv:2307.09288, 2023.

[8] R. Anil et al., "Gemini: A Family of Highly Capable Multimodal Models," arXiv preprint arXiv:2312.11805, 2023.

[9] R. Bommasani et al., "On the Opportunities and Risks of Foundation Models," arXiv preprint arXiv:2108.07258, 2021.

[10] L. Weidinger et al., "Ethical and Social Risks of Harm from Language Models," arXiv preprint arXiv:2112.04359, 2021.
[11] S. Yao, J. Zhao, D. Yu, N. Shafran, K. Narasimhan, and Y. Cao, "ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models," in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2023.
[12] T. Schick et al., "Toolformer: Language Models Can Teach Themselves to Use Tools," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.
[13] G. Mialon et al., "Augmented Language Models: A Survey," Transactions on Machine Learning Research (TMLR), 2023.
[14] R. Nakano et al., "WebGPT: Browser-Assisted Question-Answering with Human Feedback," arXiv preprint arXiv:2112.09332, 2021.
[15] M. Ahn et al., "Do As I Can, Not As I Say: Grounding Language in Robotic Affordances," in Proc. Conf. on Robot Learning (CoRL), 2022.
[16] W. Huang, P. Abbeel, D. Pathak, and I. Mordatch, "Language Models as Zero-Shot Planners: Extracting Actionable Knowledge for Embodied agents," in Proc. Int. Conf. Machine Learning (ICML), 2022.
[17] J. S. Park, J. C. O'Brien, C. J. Cai, M. R. Morris, P. Liang, and M. S. Bernstein, "Generative agents: Interactive Simulacra of Human Behavior," in Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), 2023.
[18] N. Shinn, F. Cassano, E. Berman, A. Gopinath, K. Narasimhan, and S. Yao, "Reflexion: Language agents with Verbal Reinforcement Learning," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.
[19] Q. Wu, G. Bansal, J. Zhang, Y. Wu, S. Zhang, E. Zhu, B. Li, L. Jiang, X. Zhang, and C. Wang, "AutoGen: Enabling Next-Gen LLM Applications via multi-agent Conversation Framework," arXiv preprint arXiv:2308.08155, 2023.
[20] H. Chase, "LangChain," GitHub Repository, 2022. [Online]. Available: https://github.com/langchain-ai/langchain
[21] Y. Shen et al., "HuggingGPT: Solving AI Tasks with ChatGPT and its Friends in HuggingFace," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.
[22] L. Wang et al., "A Survey on Large Language Model Based Autonomous Agents," arXiv preprint arXiv:2308.11432, 2023.
[23] Z. Xi et al., "The Rise and Potential of Large Language Model Based agents: A Survey," arXiv preprint arXiv:2309.07864, 2023.
[24] T. R. Sumers, S. Yao, K. Narasimhan, and T. L. Griffiths, "Cognitive Architectures for Language agents," arXiv preprint arXiv:2309.02427, 2023.
[25] E. Karpas et al., "MRKL Systems: A Modular, Neuro-Symbolic architecture that Combines Large Language Models, harici Knowledge Sources and Discrete Reasoning," arXiv preprint arXiv:2205.00445, 2022.
[26] T. J. Williams, "The Purdue Enterprise Reference architecture," Computers in Industry, vol. 24, no. 2–3, pp. 141–158, 1994.

[27] K. Stouffer, V. Pillitteri, S. Lightman, M. Abrams, and A. Hahn, "Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security," NIST Special Publication 800-82 Rev. 3, NIST, Gaithersburg, MD, 2023.

[28] B. Galloway and G. P. Hancke, "Introduction to Endüstriyel Kontrol Networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 15, no. 2, pp. 860–880, 2013.

[29] A. Humayed, J. Lin, F. Li, and B. Luo, "Cyber-Physical Systems Security: A Survey," IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 6, pp. 1802–1831, 2017.

[30] E. D. Knapp and J. T. Langill, Industrial Network Security: Securing critical infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems, 2nd ed. Waltham, MA: Syngress, 2014.

[31] R. Langner, "Stuxnet: Dissecting a Cyberweapon," IEEE Security and privacy, vol. 9, no. 3, pp. 49–51, 2011.

[32] R. M. Lee, M. J. Assante, and T. Conway, "Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid," E-ISAC/SANS ICS Report, 2016.

[33] Dragos Inc., "PIPEDREAM: CHERNOVITE's Modular ICS Attack Framework," Dragos Threat Intelligence Report, 2022.

[34] Dragos Inc., "Year in review: ICS/OT Cybersecurity," Dragos Annual Threat Report, 2023.

[35] Claroty Ltd., "Biannual ICS Risk and vulnerability Report," H2 2023.

[36] J. P. Farwell and R. Rohozinski, "Stuxnet and the Future of Cyber War," Survival: Global Politics and Strategy, vol. 53, no. 1, pp. 23–40, 2011.

[37] B. Zhu, A. Joseph, and S. Sastry, "A taxonomy of Cyber Attacks on SCADA Systems," in Proc. IEEE Int. Conf. Internet of Things (iThings) & IEEE Int. Conf. Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom), 2011.

[38] S. Amin, X. Litrico, S. Sastry, and A. M. Bayen, "Cyber Security of Water SCADA Systems – Part I: Analysis and Experimentation," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 6, pp. 1963–1970, 2013.

[39] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, and T. Watson, "The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework," Computers in Industry, vol. 101, pp. 1–12, 2018.

[40] D. I. Urbina et al., "Limiting the impact of Stealthy Attacks on Industrial Control Systems," in Proc. ACM Conf. on Computer and Communications Security (CCS), pp. 1092–1105, 2016.

[41] M. Krotofil and A. A. Cardenas, "Resilience of Process Control Systems to Cyber-Physical Attacks," in Proc. 28th IFIP TC 11 Int. Conf. Information Security and privacy Protection (SEC), 2013.

[42] S. McLaughlin, C. Konstantinou, X. Wang, L. Davi, A. Sadeghi, M. Maniatakos, and R. Karri, "The Cybersecurity Landscape in Industrial Control Systems," Proceedings of the IEEE, vol. 104, no. 5, pp. 1039–1057, 2016.

[43] S. Nazir, S. Patel, and D. Patel, "Assessing and Augmenting SCADA Cyber Security: A Survey of techniques," Computers and Security, vol. 70, pp. 436–454, 2017.

[44] C. Peng, J. Chen, E. Aledhari, X. Li, and Y. Zeng, "Digital Twin for Cybersecurity of Industrial Control Systems: Opportunities and Challenges," IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 10, pp. 8733–8748, 2023.

[45] M. Krotofil and D. Gollmann, "Industrial Control Systems Security: What is Happening?" in Proc. 11th IEEE Int. Conf. Industrial Informatics (INDIN), 2013.
[46] International Electrotechnical Commission, "IEC 62443: Industrial Automation and Control Systems Security," Geneva, Switzerland: IEC, 2018.
[47] MITRE Corporation, "ATT&CK for Industrial Control Systems," MITRE, 2020. [Online]. Available: https://attack.mitre.org/matrices/ics/
[48] A. Shostack, Threat Modeling: Designing for Security. Indianapolis, IN: Wiley, 2014.
[49] M. Howard and S. Lipner, The Security Development Lifecycle. Redmond, WA: Microsoft Press, 2006.
[50] B. Schneier, "Attack Trees: Modeling Security Threats," Dr. Dobb's Journal, vol. 24, no. 12, pp. 21–29, 1999.
[51] National Institute of Standards and Technology, "Framework for Improving critical infrastructure Cybersecurity," Version 1.1, NIST, Gaithersburg, MD, 2018.
[52] North American Electric Reliability Corporation, "critical infrastructure Protection (CIP) Standards," NERC, 2020. [Online]. Available: https://www.nerc.com/pa/Stand/Pages/CIPStandards.aspx
[53] C. Szegedy et al., "Intriguing properties of Neural Networks," in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2014.
[54] I. J. Goodfellow, J. Shlens, and C. Szegedy, "Explaining and Harnessing Adversarial Examples," in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2015.
[55] N. Carlini and D. Wagner, "Towards Evaluating the Robustness of Neural Networks," in Proc. IEEE Symposium on Security and privacy (S&P), pp. 39–57, 2017.
[56] A. Madry, A. Makelov, L. Schmidt, D. Tsipras, and A. Vladu, "Towards Deep Learning Models Resistant to Adversarial Attacks," in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2018.
[57] N. Papernot, P. McDaniel, S. Jha, M. Fredrikson, Z. B. Celik, and A. Swami, "The limitations of Deep Learning in Adversarial Settings," in Proc. IEEE European Symposium on Security and privacy (EuroS&P), pp. 372–387, 2016.
[58] N. Papernot, P. McDaniel, I. Goodfellow, S. Jha, Z. B. Celik, and A. Swami, "Practical Black-Box Attacks against Machine Learning," in Proc. ACM Asia Conf. on Computer and Communications Security (AsiaCCS), pp. 506–519, 2017.
[59] S. Moosavi-Dezfooli, A. Fawzi, and P. Frossard, "DeepFool: A Simple and Accurate Method to Fool Deep Neural Networks," in Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 2574–2582, 2016.
[60] A. Athalye, N. Carlini, and D. Wagner, "Obfuscated Gradients Give a False Sense of Security: Circumventing Defenses to Adversarial Examples," in Proc. Int. Conf. Machine Learning (ICML), pp. 274–283, 2018.
[61] B. Biggio, B. Nelson, and P. Laskov, "Poisoning Attacks against Support Vector Machines," in Proc. Int. Conf. Machine Learning (ICML), pp. 1807–1814, 2012.
[62] B. Biggio and F. Roli, "Wild Patterns: Ten Years After the Rise of Adversarial Machine Learning," Pattern Recognition, vol. 84, pp. 317–331, 2018.
[63] T. Gu, K. Liu, B. Dolan-Gavitt, and S. Garg, "BadNets: Evaluating Backdooring Attacks on Deep Neural Networks," IEEE Access, vol. 7, pp. 47230–47244, 2019.

[64] Y. Liu, X. Ma, J. Bailey, and F. Lu, "Reflection Backdoor: A Natural Backdoor Attack on Deep Neural Networks," in Proc. European Conf. Computer Vision (ECCV), 2020.

[65] X. Chen, C. Liu, B. Li, L. Lu, and D. Song, "Targeted Backdoor Attacks on Deep Learning Systems Using Data Poisoning," arXiv preprint arXiv:1712.05526, 2017.

[66] R. Shokri, M. Stronati, C. Song, and V. Shmatikov, "Membership Inference Attacks against Machine Learning Models," in Proc. IEEE Symposium on Security and privacy (S&P), pp. 3–18, 2017.

[67] F. Tramèr, F. Zhang, A. Juels, M. K. Reiter, and T. Ristenpart, "Stealing Machine Learning Models via Prediction APIs," in Proc. USENIX Security Symposium, pp. 601–618, 2016.

[68] M. Jagielski, A. Oprea, B. Biggio, C. Liu, C. Nita-Rotaru, and B. Li, "Manipulating Machine Learning: Poisoning Attacks and Countermeasures for Regression Learning," in Proc. IEEE Symposium on Security and privacy (S&P), pp. 19–35, 2018.

[69] E. Wallace, S. Feng, N. Kandpal, M. Gardner, and S. Singh, "Universal Adversarial Triggers for Attacking and Analyzing NLP," in Proc. Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP), pp. 2153–2162, 2019.

[70] N. Carlini et al., "Extracting Training Data from Large Language Models," in Proc. USENIX Security Symposium, pp. 2633–2650, 2021.

[71] F. Perez and I. Ribeiro, "Ignore Previous Prompt: Attack techniques for Language Models," in Proc. NeurIPS Workshop on Machine Learning Safety, 2022.

[72] K. Greshake, S. Abdelnabi, S. Mishra, C. Endres, T. Holz, and M. Fritz, "Not What You've Signed Up For: Compromising Real-World LLM-Integrated Applications with Indirect Prompt Injections," in Proc. ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security (AISec), 2023.

[73] Y. Liu et al., "prompt injection Attack against LLM-Integrated Applications," arXiv preprint arXiv:2306.05499, 2023.

[74] S. Abdelnabi, K. Greshake, S. Mishra, C. Endres, T. Holz, and M. Fritz, "Not What You've Signed Up For: Compromising Real-World LLM-Integrated Applications," arXiv preprint arXiv:2302.12173, 2023.

[75] OWASP Foundation, "OWASP Top 10 for Large Language Model Applications," Version 1.1, 2023. [Online]. Available: https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-model-applications/

[76] A. Zou, Z. Wang, N. Carlini, M. Nasr, J. Z. Kolter, and M. Fredrikson, "Universal and Transferable Adversarial Attacks on Aligned Language Models," arXiv preprint arXiv:2307.15043, 2023.

[77] A. Wei, N. Haghtalab, and J. Steinhardt, "Jailbroken: How Does LLM Safety Training Fail?" in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.

[78] X. Shen, Z. Chen, M. Backes, Y. Shen, and Y. Zhang, "'Do Anything Now': Characterizing and Evaluating In-the-Wild Jailbreak Prompts on Large Language Models," in Proc. ACM Conf. on Computer and Communications Security (CCS), 2024.

[79] P. Chao, A. Robey, E. Dobriban, H. Hassani, G. J. Pappas, and E. Wong, "Jailbreaking Black Box Large Language Models in Twenty Queries," arXiv preprint arXiv:2310.08419, 2023.

[80] Y. Yao et al., "A Survey on Large Language Model (LLM) Security and privacy: The Good, the Bad, and the Ugly," arXiv preprint arXiv:2312.02003, 2024.
[81] L. Weidinger et al., "taxonomy of Risks Posed by Language Models," in Proc. ACM Conf. on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT), pp. 214–229, 2022.
[82] M. Wooldridge and N. R. Jennings, "Intelligent agents: kuram and uygulama," Knowledge Engineering review, vol. 10, no. 2, pp. 115–152, 1995.
[83] E. Hubinger et al., "Sleeper agents: Training Deceptive LLMs That Persist through Safety Training," arXiv preprint arXiv:2401.05566, 2024.
[84] E. Wallace, T. F. Zhao, S. Garg, and S. Singh, "Concealed Data Poisoning Attacks on NLP Models," in Proc. Annual Conf. of the North American Chapter of the ACL (NAACL), pp. 139–150, 2021.
[85] E. Perez et al., "Red Teaming Language Models with Language Models," arXiv preprint arXiv:2202.03286, 2022.
[86] N. Carlini et al., "Are Aligned Neural Networks Adversarially Aligned?" in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.
[87] D. Kang, X. Li, I. Stoica, C. Guestrin, M. Zaharia, and T. Hashimoto, "Exploiting Programmatic Behavior of LLMs: Dual-Use through Standard Security Attacks," arXiv preprint arXiv:2302.05733, 2023.
[88] J. Hazell, "Spear Phishing with Large Language Models," arXiv preprint arXiv:2305.06972, 2023.
[89] R. Schuster, C. Song, E. Tromer, and V. Shmatikov, "You Autocomplete Me: Poisoning vulnerabilities in Neural Code Completion," in Proc. USENIX Security Symposium, pp. 1559–1575, 2021.
[90] E. Shayegani et al., "Survey of vulnerabilities in Large Language Models Revealed by Adversarial Attacks," arXiv preprint arXiv:2310.10844, 2023.
[91] E. Bagdasaryan and V. Shmatikov, "Spinning Language Models: Risks of Propaganda-as-a-Service and Countermeasures," in Proc. IEEE Symposium on Security and privacy (S&P), pp. 769–786, 2022.
[92] Y. Bai et al., "Constitutional AI: Harmlessness from AI Feedback," arXiv preprint arXiv:2212.08073, 2022.
[93] X. Zhu et al., "AutoDAN: Generating Stealthy Jailbreak Prompts on Aligned Large Language Models," arXiv preprint arXiv:2310.04451, 2023.
[94] G. Deng et al., "Masterkey: Automated Jailbreak Across Multiple Large Language Model Chatbots," in Proc. Network and Distributed System Security Symposium (NDSS), 2024.
[95] Y. Qin et al., "Tool Learning with Foundation Models," arXiv preprint arXiv:2304.08354, 2023.
[96] S. G. Patil, T. Zhang, X. Wang, and J. E. Gonzalez, "Gorilla: Large Language Model Connected with Massive APIs," arXiv preprint arXiv:2305.15334, 2023.
[97] Y. Liao, F. Deschamps, E. de Freitas Rocha Loures, and L. F. P. Ramos, "Past, Present and Future of Industry 4.0: A Systematic Literature Review and Research Agenda Proposal," International Journal of Production Research, vol. 55, no. 12, pp. 3609–3629, 2017.

[98] A. Diez-Olivan, J. Del Ser, D. Galar, and B. Sierra, "Data Fusion and Machine Learning for Industrial Prognosis: Trends and Perspectives Towards Industry 4.0," Information Fusion, vol. 50, pp. 92–111, 2019.

[99] S. McLaughlin, C. Konstantinou, X. Wang, L. Davi, A. Sadeghi, M. Maniatakos, and R. Karri, "The Cybersecurity Landscape in Industrial Control Systems," Proceedings of the IEEE, vol. 104, no. 5, pp. 1039–1057, 2016.

[100] B. Lim, J. Lee, D. Yuk, and M. Joo, "Blockchain Technology for the Industrial Internet of Things: A Comprehensive Survey on Security Challenges, architecture, Applications and Future Research Directions," IEEE Access, vol. 9, pp. 35516–35545, 2021.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

PARABOLIK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLERINDE YUTUCU BORU İÇ ÇAPI OPTIMIZASYONU

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇATALKAYA

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, K.Maraş, Türkiye

ORCID: 0000-0002-4143-4679

ÖZET

Endüstriyel ısı üretiminde sıkça tercih edilen Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlerinde genellikle tek ve sabit çaplı yutucu borular kullanılmaktadır. Ancak bu durum, sistem yüksek sıcaklıklara ulaştığında yapının deforme olmasına ve ciddi ısı kayıpları yaşanmasına yol açarak performansı sınırlandırır. Bu çalışmada, endüstriyel süreçler için ısı üretiminde yaygın olarak kullanılan Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlerinin ısıl verimliliğini ve termohidrolik performansını artırmak amacıyla yutucu boru iç çapının optimizasyonu araştırılmıştır. Geleneksel tek sabit çaplı boruların yüksek sıcaklıklarda neden olduğu yapısal deformasyon, ısı kaybı ve düşük performans sınırlarını aşmak için sistemin termal ve hidrolik davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, laboratuvar ölçekli bir deneysel sistem referans alınarak; 900 W/m² sabit ısı akısı, 0.5 kg/s kütlesel debi ve 300 K giriş sıcaklığı koşullarında 25 mm ile 65 mm arasındaki iç çap değişimleri 1 mm hassasiyetle analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, yutucu boru çapının artmasıyla ışınım yakalama alanı genişlemiş ve faydalı enerji kazancı 22.87 W'tan 54.44 W'a kadar doğrusal bir artış göstermiştir. Buna karşın, artan çap ile birlikte akış hızının yavaşlaması (1.036 m/s'den 0.153 m/s'ye), konvektif ısı transfer katsayısının düşmesine neden olmuştur. Öte yandan hidrolik kayıpları temsil eden basınç düşüşü, bilhassa 25 mm ile 40 mm çapları arasındaki geçişte %90 oranında azalarak logaritmik bir düşüş sergilemiş ve pompalama gücü maliyetlerini büyük ölçüde hafifletmiştir. Termal performans ve hidrolik kayıplar arasındaki dengeyi ölçmek için yapılan Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) analizi sonucunda, basınç kayıplarını minimumda tutup enerji kazancını maksimize eden "tatlı nokta (sweet spot)" 45-50 mm aralığı olarak saptanmıştır. Optimizasyon verileri ışığında, çalışılan spesifik sistem tasarımı için hem işletme maliyetleri hem de enerji kazancı bakımından en ideal yutucu boru iç çapının 48 mm olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Parabolik Oluklu Güneş Kolektörü, Yutucu Boru Optimizasyonu, Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), Termohidrolik Analiz, Basınç Kaybı

ABSTRACT

Parabolic trough solar collectors (PTSCs), which are widely used for industrial heat generation, generally employ single receiver tubes with a constant diameter. At elevated operating temperatures, however, this configuration may become susceptible to structural deformation and significant heat losses, thereby limiting overall system performance. This study investigates the optimization of the receiver-tube inner diameter to improve the thermal efficiency and

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

thermo-hydraulic performance of PTSCs used for industrial process heat generation. To address the limitations associated with conventional constant-diameter receiver tubes, the thermal and hydraulic behaviour of the system was examined numerically. A laboratory-scale experimental system was adopted as the reference configuration. Receiver-tube inner diameters ranging from 25 to 65 mm were analysed at 1 mm intervals under a constant heat flux of 900 W/m², a mass flow rate of 0.5 kg/s, and an inlet temperature of 300 K. The results showed that increasing the receiver-tube diameter enlarged the irradiated heat-transfer area, leading to a linear increase in useful energy gain from 22.87 to 54.44 W. However, the corresponding reduction in flow velocity from 1.036 to 0.153 m/s decreased the convective heat transfer coefficient. By contrast, the pressure drop, which represents the hydraulic losses, exhibited a logarithmic decline. In particular, it decreased by approximately 90% as the tube diameter increased from 25 to 40 mm, substantially reducing the required pumping power. The performance evaluation criterion (PEC) was used to quantify the trade-off between thermal enhancement and hydraulic losses. The analysis identified an optimal trade-off region between 45 and 50 mm, in which useful energy gain was maximized while pressure losses remained comparatively low. Based on the optimization results, a receiver-tube inner diameter of 48 mm was determined to provide the most favourable balance between energy gain and operating cost for the specific system investigated.
Keywords: parabolic trough solar collector, receiver-tube optimization, performance evaluation criterion, thermo-hydraulic analysis, pressure drop

1.GİRİŞ

Fosil yakıtların hızla tükenmesi, enerji üretim maliyetlerinin artması ve küresel ısınma gibi çevresel tehlikeler, modern dünyayı sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Bu bağlamda, güneş enerjisi, yeryüzüne ulaşma potansiyelinin çok yüksek olması nedeniyle, yenilenebilir enerjiler arasında en stratejik ve çevre dostu alternatiflerden biridir. Günümüzde, fotovoltaik (PV) sistemler, düz plaka kolektörler, güneş kuleleri ve yoğunlaştırıcı sistemler gibi güneş enerjisini etkili bir şekilde kullanmak için birçok yenilikçi teknoloji geliştirilmiştir. Bu cihazlar arasında, Parabolik Oluklu Güneş Kolektörleri (PTC), endüstriyel süreçler için termal enerji sağlama konusunda değerini kanıtlamış en olgun ve yaygın olarak kullanılan teknolojidir. PTC'ler, güneş radyasyonunu doğrusal bir yolda yoğunlaştırarak yüksek sıcaklıklarda termal enerji üretebilmektedirler. Güneş enerjisi teknolojilerinden biri olan odaklanmış güneş enerjisi, birçok farklı sistem türleri vardır. Bu sistemler içinde PTC en çok kullanılan sistemlerdir [1]. Bu sistemlerin verimliliği, güneş ışınlarının temas ettiği alıcı düzeninin performansına bağlıdır [2]. Ancak geleneksel PTC kurulumlarında, yutucu borunun alt kısmına yoğunlaşan güneş ışınımı, çok yüksek sıcaklıklara ve yapısal deformasyonlara yol açar. Bu durum aynı zamanda ciddi ısıl gerilmelere de neden olur [3].Yutucu boru tasarımı yapılırken en büyük sorunlardan biri, tek bir sabit çapa sahip boruların yüksek verimlilik ve iyi performans sağlama konusunda bazı sınırlamalara sahip olmasıdır [4]. İdeal bir sonuç elde etmek için yutucu boru çapını büyütmek, yani örneğin 90 mm'lik borular kullanmak, daha fazla ışınım yakalayabilir. Ancak, genişleyen yüzey alanı nedeniyle, özellikle yüksek sıcaklıklarda ısı kaybı olur [5].

Verimlilik ve sıcaklık arasında bir denge kurmak çok önemlidir. Yutucu boru çapını optimize etmek bu konuda kritik bir rol oynar. Literatürde, yutucu boru girişi ve çıkışı çaplarını temel

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

tasarım değişkenleri olarak tanımlayan çok amaçlı optimizasyon modelleri geliştirilmiştir [6]. Bu modeller, kolektör sisteminin hem ısıl hem de ekserjetik verimliliğini aynı anda maksimize etmek için kullanılır [7].

Sabit boru çapı kullanmanın getirdiği dezavantajları ortadan kaldırmak için, akış yönü boyunca artan sıcaklığa bağlı olarak boru çapının kademeli olarak küçültüldüğü (örneğin sırasıyla 90 mm, 80 mm ve 70 mm) çok aşamalı ve değişken çaplı yenilikçi tasarımlar önerilmektedir [8]. Bu tür stratejik optimizasyon tasarımlarında, düşük sıcaklıklarda büyük çaplı borular kullanılarak ışınım yakalama oranı artırılırken, yüksek çalışma sıcaklıklarına ulaşıldığında daha dar çaplı borular tercih edilerek yüzey alanından kaynaklanan ışınım ısı kayıpları etkili bir şekilde minimize edilmektedir [9].

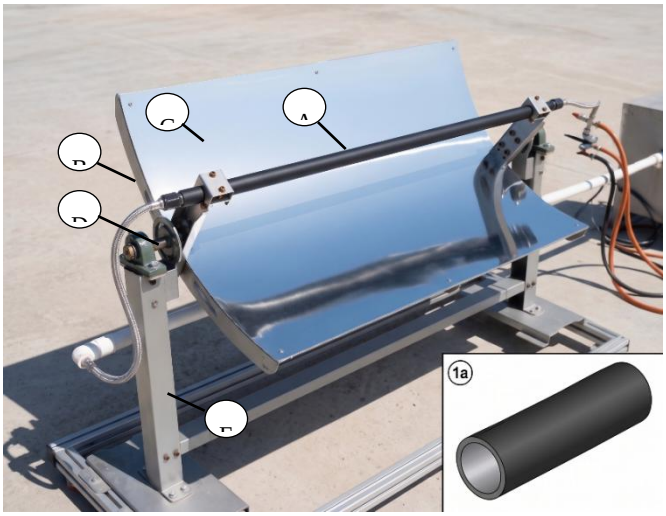
Sonuç olarak, bir parabolik güneş kolektörünün ısıl verimliliği, optik verimlilik ve ısı kayıpları arasındaki dengeye dayanır [10]. Bu bildiri, parabolik güneş kolektörlerinde yutucu boru çapının optimizasyonu için geliştirilen güncel yaklaşımları incelemekte olup, çap değişiminin optik performans ve ısıl kayıplar üzerindeki etkilerini sistem verimliliğini artırma perspektifinden kapsamlı bir şekilde ele almaktadır.

2.MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, bir PTC'nin odak noktasına yerleştirilen yutucu borunun hem termal hem de hidrolik performansı sayısal olarak iyileştirmek için optimize edilmiştir.

2.1.Geometrik Model ve Sınır Koşulları

İncelenen PTC emici boru sistemi, 920 mm uzunluğunda, 2 mm sabit dış kalınlığa ve 25 mm iç çapa sahip bir emici borudan oluşmaktadır. Bu boru, çapı 65 mm'ye kadar değiştirilerek sayısal hesaplamaların optimizasyonu için kullanılmıştır. Borunun dış yüzeyi, Kahramanmaraş'ın iklim koşullarına göre ortalama değer kabul edilerek sabit ısı akısı ve ortam sıcaklığına giriş şartları uygulanmıştır. Kolektörün odaklama özelliklerine ve güneşin öğlen 12:00'deki konumuna bağlı olarak 900 W/m^2'lik sabit bir ısı akısına maruz bırakılmıştır. Akışkan olarak kullanılan sıvının kütle akış hızı m = 0.5 kg/s ve giriş sıcaklığı 300 K olarak sabitlenmiştir. Tasarımı yapılan PTC'nin 3D görüntüsü görsel 1'de verilmiştir.



Görsel 1. Parabolik güneş kolektörü oluğunun 3D şeması

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Deneysel çalışmalarda referans olarak kullanılan ve Şekil 1'de gösterilen sistem, esas olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- (A) Isı yutucu boru: Güneş enerjisinin akışkana aktarıldığı ana bileşendir.
- (B) Reflektör çerçevesi: Parabolik yansıtıcıyı destekleyen alüminyum yapıdır.
- (C) Parabolik yansıtıcı: 1 mm kalınlığında paslanmaz çelik ayna sacdan imal edilmiş yansıtıcı yüzeydir.
- (D) Kolektör şasisi: Tüm sistemi taşıyan alüminyum ana gövdedir.
- (E) Kolektör ayar şaftı: Kolektörün güneşi takip edebilmesi için manuel olarak döndürülmesini sağlayan mildir.

2.2.Deneysel Prosedür ve Sistemin Çalışması

Sistemin çalışma prensibi: Şehir şebekesinden gelen çalışma akışkanı (su), ortalama 0.5 kg/s sabit debi ile sisteme giriş yapar. Akışkan, siyah mat boya ile boyanmış 920 mm uzunluğunda, 25 mm dış çapında ve 2 mm et kalınlığına sahip alüminyum yutucu boru (1) içerisinden geçer. Bu esnada, alüminyum çerçeve (2) tarafından desteklenen paslanmaz çelik parabolik yansıtıcıdan (3) odaklanan güneş radyasyonu ile ısıtılır. Tüm düzenek sağlam bir alüminyum şasi (4) tarafından taşınmakta olup, kolektörün dönme işlemi ayar şaftı (5) kullanılarak manuel olarak gerçekleştirilmiştir.

2.3.Termal Analiz ve Hesaplama Prosedürü

Sistemin termal ve hidrolik performansını belirlemek için kullanılan gerekli eşitlikler aşağıda tanımlanmıştır. Analizlerde akışkanın fiziksel özellikleri, giriş sıcaklığına bağlı olarak sabit kabul edilmiştir. Ayrıca analizlerde iç çap sayısal olarak 65 mm kadar değiştirilmiştir.

Enerji Kazancı ve Akış Karakteristiği

Yutucu boru yüzeyinden toplanan toplam faydalı enerji (Q), radyasyon şiddeti (I) ,boru dış çapı (D_o) ve yutucu boru uzunluğu (L) kullanılarak hesaplanır [11,12] :

$$Q = I.(D_o.L).\alpha \quad (1)$$

Boru içerisindeki suyun ortalama akış hızı (V), kütlesel debi ($\dot{m}$) ve iç çap (D_i) üzerinden şu şekilde ifade edilir:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho.(\pi.\frac{D_i^{\,2}}{4})} \quad (2)$$

Akışın rejimini belirlemek amacıyla kullanılan boyutsuz Reynolds sayısı (Re) şu formülle türetilir:

$$Re = \frac{\rho.V.Re}{\mu} \quad (3)$$

Isı Transferi Denklemleri

Isı transfer performansının bir göstergesi olan boyutsuz Nusselt sayısı (Nu), türbülanslı akış koşulları (Re > 4000) için Dittus-Boelter denklemi ile hesaplanmıştır [13]:

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

$$Nu = 0.023.Re^{0.8}.Pr^{0.4} \quad (4)$$

Burada Pr, akışkanın Prandtl sayısını temsil eder. Boru iç yüzeyi ile akışkan arasındaki konvektif ısı transfer katsayısı (h), Nusselt sayısı yardımıyla aşağıdaki gibi elde edilir [13]:

$$h = \frac{Nu.k_f}{D_i} \quad (5)$$

Basınç Kaybı ve Sürtünme Faktörü

Boru boyunca meydana gelen hidrolik kayıplar (basınç kaybı, ΔP), Darcy-Weisbach denklemi kullanılarak belirlenir [14]:

$$\Delta P = f.\left(\frac{L}{D_i}\right).\left(\frac{\rho.V^2}{D_i}\right) \quad (6)$$

Pürüzsüz borulardaki türbülanslı akışlar için boyutsuz sürtünme faktörü (*f*), Blasius denklemi ile hesaplanmıştır [15,16]:

$$f = 0.316.Re^{-0.25} \quad (7)$$

Performans Değerlendirme Kriteri (PEC)

PTC'nin yutucu borusunun iç çapındaki değişimin sistemin genel verimliliği üzerindeki etkisini eş zamanlı olarak değerlendirmek için Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) kullanılmıştır [17]. Bu kriter, sistemin termal kazancı ile pompalama gücü gereksinimi arasındaki optimizasyon dengesini belirlemede çok önemlidir, çünkü ısı transferindeki iyileşme genellikle basınç kaybında artışa yol açar. Çalışmada, en düşük iç çap değeri Ø25 mm referans olarak alınmış ve diğer tüm çap varyasyonları için PEC değerleri aşağıdaki denklem 8 ile hesaplanmıştır:

$$PEC = \frac{\left({}^{Nu}/_{Nu_s}\right)}{\left({}^{f}/_{f_s}\right)^{1/3}} \quad (8)$$

Burada;

S indeksli değerler referans deney sistemi için, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerleridir. Benzer performans indeksi, ısı değiştiriciler, türbülatörlü borular, güneş kollektörü emici boruları ve ısı transferi artırımı uygulamalarında hem ısı transferindeki artış hem de sürtünme kaybındaki artış birlikte değerlendirmek için kullanılmıştır [18]. PEC değerinin 1'den büyük olması, ısı transferindeki artışın basınç kaybından kaynaklanan dezavantajdan daha önemli olduğunu ve sistemin termohidrolik performansının geliştiğini gösterir.

Analiz ve Hesaplama Kullanılan Deneysel ve Sabit Parametreler

Analizler ve hesaplamaları gerçekleştirmek amacıyla, akışkanın fiziksel özelliklerini içeren sabit parametreler çizelge 1'de sunulmuştur.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çizelge 1. Analizlerde Kullanılan Deneysel ve Sabit Parametreler

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Güneş Işınımı	I	900	W/m^2
Boru Uzunluğu	L	920	mm
Kütlesel Debi	$\dot{m}$	0.5	kg/s
Su Yoğunluğu	ρ	983	kg/m3
Isıl İletkenlik (Su)	k_f	0.653	W/m·K
Dinamik Viskozite	μ	0.000467	Pa·s

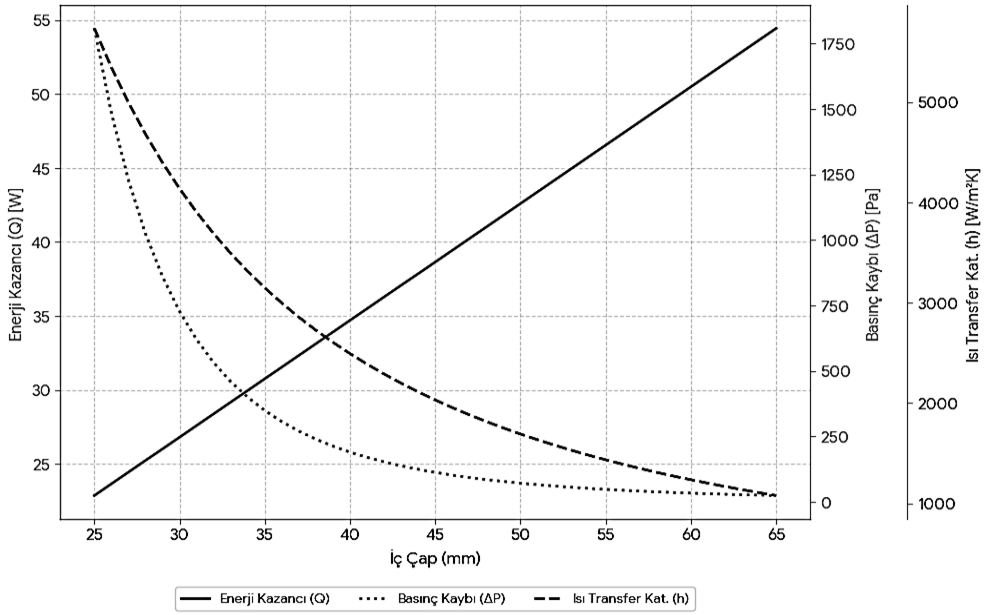
3.BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde, sayısal analiz sonuçlarına göre, PTC sisteminin termal ve hidrolik performansları üzerindeki emici boru iç çapının değişiminin etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemin enerji toplama kapasitesi ile akışkanın hidrolik taşıma özellikleri arasındaki dinamik ilişkiyi göstermektedir. Çalışma kapsamında borunun iç çapı 1 mm hassasiyetle değiştirilmiş ve sabit kütle akışı için akış hızı ve basınç düşüşündeki değişiklikler analiz edilmiştir. çizelge 2, 25-65 mm çap değişimleri için boru boyunca akış hızı, enerji kazancı, konvektif ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşünün ayrıntılarını göstermektedir.

Çizelge 2. İç çapa bağlı akış hızı, termal ve hidrolik performans değerleri

D_i [mm]	D_o [mm]	V [m/s]	Q [W]	h [W/m²K]	ΔP [Pa]
25	29	1.036	22.87	5734.5	1808.6
30	34	0.72	26.81	4125.7	733.3
35	39	0.529	30.76	3138.4	341
40	44	0.405	34.71	2482.8	175.9
45	49	0.32	38.65	2024.5	98.6
50	54	0.259	42.6	1691.5	58.9
55	59	0.214	46.55	1441.3	37.2
60	64	0.18	50.49	1248.3	24.7
65	69	0.153	54.44	1096.1	17

Görsel 2, parabolik güneş kolektörü sisteminin termal ve hidrolik performans parametreleri üzerindeki emici borunun iç çapındaki değişimin etkisini göstermekte ve ayrıca üç farklı ana değişkenin çapla olan ilişkisini göstermektedir. Sistemin enerji toplama kapasitesi ile akış karakteristikleri h ve ΔP arasındaki etkileşimi analiz etmektedir.



Görsel 2. Boru çapına göre parametrik performans analizi

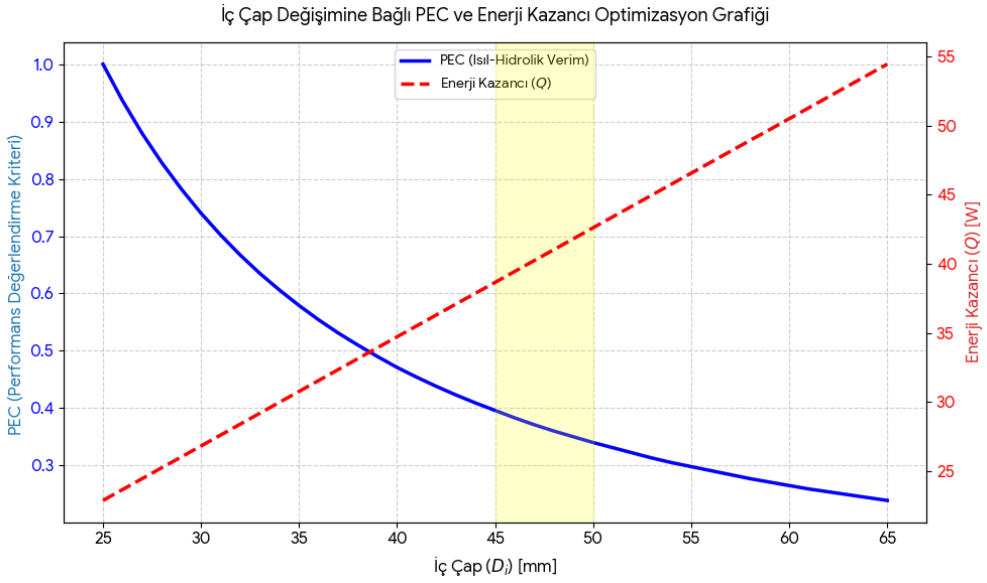
Grafik incelendiğinde, enerji kazancı değerinin borunun dış çapındaki artışla doğrusal olarak arttığı görülebilir. Öte yandan, iç akış hızının artmasına bağlı olarak ısı transfer katsayısının azalması ve basınç kaybı değerlerinde çap artışı ile birlikte belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Basınç kaybı eğrisi, özellikle 25 mm ile 40 mm arasında keskin bir düşüş göstererek, hidrolik kayıpların bu bölgedeki çap değişimine ne kadar duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Isı transfer katsayısının azalması ve 45 mm'nin üzerindeki çaplarda basınç kaybının stabilizasyonu, bu aralığın PTClerin tasarımı için hidrolik-termal denge noktası olarak kabul edilmesini sağlar. Yutucu boru geometrisindeki çap değişimin sistem performansı üzerindeki net etkisini belirlemek amacıyla hesaplanan PEC ve Q değerleri çizelge 3'te grafiksel olarak sunulmuştur. Bu analiz, kolektörün sadece ısı toplama kapasitesini değil, aynı zamanda bu işlemi ne kadar düşük bir pompalama maliyetiyle gerçekleştirdiğini de ortaya koymaktadır.

Çizelge 3. Çap değişimine göre PEC ve Termal Performans Verileri

Di [mm]	Nu	f	PEC	Q [W]
25 (Ref)	219.5	0.0246	1	22.87
30	189.8	0.0236	0.876	26.81
35	168.8	0.0227	0.788	30.76
40	152.6	0.0219	0.721	34.71
45	139.8	0.0213	0.667	38.65
50	129.5	0.0207	0.623	42.6
55	55	0.0204	0.298	46.55
60	47.4	0.0199	0.265	50.49
65	41.3	0.0195	0.239	54.44

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Sistemin termal-hidrolik karakteristiklerini 1 mm hassasiyetle görsel 3'te, tasarım parametrelerinin çapla olan hassas değişimini göstermektedir.



Görsel 3. Çap değişiminin göre pec ve termal performans

Yukarıdaki grafik, parabolik güneş kolektörü tasarımında karşılaşılan temel ikilemi (trade-off) net bir görselde göstermektedir. İç çap arttıkça PEC değeri hızla azalmaktadır. Bu, akışın yavaşlaması nedeniyle birim alandaki ısı transfer performansının Nu bağlı olarak düştüğünü gösterir. Ancak çapın 40 mm sonrasında bu düşüş ivmesi (eğim) azalmakta ve grafik daha yatay bir hal almaktadır. Enerji Kazancı Eğrisi ise çapın artması, borunun güneş ışınlarını yakaladığı izdüşüm alanını büyüttüğü için toplam enerji kazancını Q doğrusal olarak artırmaktadır. Optimum Bölge (Sarı Bölge): 45-50 mm aralığı, PEC kaybının minimize edildiği ve enerji kazancının yüksek seviyelere ulaştığı "tatlı nokta" (sweet spot) olarak belirlenmiştir. Bu bölgede: Basınç kaybı ΔP minimum seviyelere inerek pompalama gücü gereksinimini minimize etmektedir. Enerji kazancı Q, referans noktasına göre yaklaşık %85 oranında artış göstererek kolektör verimini maksimize etmektedir. Isı transfer katsayısı h, akışkanın aşırı ısınmasını önleyecek yeterli seviyede kalmaktadır. Sonuç olarak, tek başına PEC analizi en küçük çapı işaret etse de, enerji kazancı ve işletme maliyetleri (basınç kaybı) bir arada değerlendirildiğinde 48 mm civarındaki bir iç çap değerinin sistem optimizasyonu için en ideal nokta olduğu sonucuna varılmıştır.

4.SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, laboratuvar ölçeğinde geliştirilen bir PTC sisteminin termal ve hidrolik performansı, yutucu boru iç çapı değişimine bağlı olarak kapsamlı bir görselde analiz edilmiştir. 25 mm ile 65 mm arasında 1 mm hassasiyetle gerçekleştirilen parametrik çalışmalar neticesinde elde edilen temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur: Geometrik Etki ve Enerji Kazancı: Yutucu boru dış çapının artmasıyla birlikte, kolektörün güneş ışınlarını yakaladığı

izdüşüm alanı genişlemiş ve buna bağlı olarak enerji kazancı (Q) 22.87 W'tan 54.44 W değerine kadar doğrusal bir artış sergilemiştir. Bu durum, büyük çaplı yutucuların radyasyon toplama kapasitesinin daha yüksek olduğunu kanıtlamaktadır. Akış Karakteristiği ve Isı Transferi: Sabit kütlesel debi (0.5 kg/s) altında iç çapın artırılması, akış hızının 1.036 m/s'den 0.153 m/s'ye düşmesine neden olmuştur. Akış hızındaki bu azalma, konvektif ısı transfer katsayısının (h) 5734.5 W/m²K'den 1078.8 W/m²K seviyesine gerilemesine yol açarak ısıl verimlilik üzerinde negatif bir etki oluşturmuştur. Hidrolik Kayıplar: Basınç kaybı (ΔP), çap artışıyla birlikte logaritmik bir düşüş göstermiştir. Özellikle 25 mm ile 40 mm arasındaki geçişte basınç kaybının yaklaşık %90 oranında azalması, pompalama gücü maliyetlerinin minimize edilmesi açısından 40 mm ve üzeri çapların büyük avantaj sağladığını ortaya koymuştur. PEC Analizi ve Optimizasyon: Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) analizi, ısıl performans kaybı ile hidrolik kazanç arasındaki dengeyi incelemiştir. Tek başına ısıl verimlilik açısından küçük çaplar (yüksek PEC) avantajlı görünse de, toplam enerji kazancı ve işletme maliyetleri birlikte değerlendirildiğinde, sistemin 45-50 mm iç çap aralığında en ideal çalışma koşullarına ulaştığı tespit edilmiştir. Tasarım Önerisi: Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, bu spesifik kolektör tasarımı için 48 mm iç çapın, hem enerji toplama kapasitesini maksimize eden hem de basınç kayıplarını kabul edilebilir seviyelerde tutan "en uygun tasarım noktası" olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın bulguları, ANSYS Fluent gibi sayısal analiz platformlarında gerçekleştirilecek daha ileri düzeydeki optimizasyon çalışmaları için temel bir veri seti ve metodolojik bir çerçeve sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, bu geometrik verilerin farklı akışkan tipleri (nanoflüid vb.) ve farklı debi koşulları altında test edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

1. Akhatov, J. S., Juraboev, N. I., & Akhmadov, K. S. (2024). Enhancing thermal performance of solar parabolic through collector by using corrugated absorber tube. *Fifteen International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications*, Tashkent, Uzbekistan.
2. Bellos, E., Tzivanidis, C., & Tsimpoukis, D. (2017). Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Solar Energy*, 157, 514–531.
3. Bellos, E., Tzivanidis, C., Daniil, I., & Antonopoulos, K. A. (2017). The impact of internal longitudinal fins in parabolic trough collectors operating with gases. *Energy Conversion and Management*, 135, 35-54.
4. Donga, R. K., & Karn, A. (2025). Improving the thermal performance of parabolic trough solar collectors by incorporating cylindrical attachments within the absorber tube. *Applied Thermal Engineering*, 273, 126587.
5. Donga, R. K., Kumar, S., & Velidi, G. (2025). Heat transfer enhancement in a parabolic trough collector using finned tubular absorber. *Scientific Reports*, 15, 24142.
6. Gong, J.-h., Tu, W.-l., Shi, L.-q., Li, Z.-y., Wang, J., & Lund, P. D. (2026). Optimization of a large-aperture parabolic trough solar system with threestage variable-diameter absorber tubes for enhanced efficiency and high outlet temperature. *Results in Engineering*, 29, 108551.

7. Haddouche, M. R. (2023). Numerical investigation of an enhanced PTC absorber tube using cylindrical inserts. *Heat Transfer*, 52, 3967-3988.
8. Kasem, M. M. (2022). Multiobjective design optimization of parabolic trough collectors. *Scientific Reports*, 12, Article 24305.
9. Khan, O. U., & Irfan, M. (2026). Design advancement and geometric optimization of the absorber tube of a parabolic trough collector for enhanced hydrothermal performance. *Case Studies in Thermal Engineering*, 81, 107986.
10. Tang, X. Y., Yang, W. W., Yang, Y., et al. (2021). A design method for optimizing the secondary reflector of a parabolic trough solar concentrator to achieve uniform heat flux distribution. *Energy*, 229, 120749.
11. Tyagi, H., Phelan, P., & Prasher, R. (2009). Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Solar Energy Engineering, 131*(4), 041004. https://doi.org/10.1115/1.3197562.
12. Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., & Taylor, R. A. (2010). Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2*(3), 033102. https://doi.org/10.1063/1.3429737.
13. Taler, D., & Taler, J. (2017). Simple heat transfer correlations for turbulent tube flow. *E3S Web of Conferences, 13*, 02008. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171302008.
14. Sunaris, M. L., Muljono, Y., & Suyitno. (2019). Analysis of energy losses in smooth pipes. *Journal of Physics: Conference Series, 1360*, 012026. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1360/1/012026.
15. Taler, D. (2016). Determining velocity and friction factor for turbulent flow in smooth tubes. *International Journal of Thermal Sciences, 105*, 109–122. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.02.011.
16. Meyer, J. P., McKrell, T. J., & Grote, K. (2013). The influence of multi-walled carbon nanotubes on single-phase heat transfer and pressure drop characteristics in the transitional flow regime of smooth tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 58*(1–2), 597–609. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.063.
17. Karwa, R., Sharma, C., & Karwa, N. (2013). Performance evaluation criterion at equal pumping power for enhanced performance heat transfer surfaces. *Journal of Solar Energy, 2013*, Article 370823. https://doi.org/10.1155/2013/370823.
18. Yin, P., Hasan, Y. M., Bashar, B. S., Zahra, M. M. A., & Said, Z. (2023). Evaluation of efficiency, thermohydraulic performance evaluation criterion, and field synergy principle improvement of the parabolic solar collector containing turbulator. *Case Studies in Thermal Engineering, 41*, 102596. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102596.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

DEMİRYOLU YOL GEOMETRİSİ PARAMETRELERİNİN YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (BIM) 7D BOYUTU İLE TAKİBİNİN İNCELENMESİ

Ali KURT
Dokuz Eylül Üniversitesi
ali.kurt26@ogr.deu.edu.tr - 0009-0004-5671-0383

Prof. Dr. Ali TOPAL
Dokuz Eylül Üniversitesi
ali.topal@deu.edu.tr - 0000-0002-2601-1926

ÖZET

Demiryolu ağlarının emniyetli, konforlu ve sürdürülebilir şekilde işletilebilmesi için etkin bakım yönetimi büyük önem taşımaktadır. TCDD'nin 2017–2022 faaliyet raporları incelendiğinde, konvansiyonel ve Yüksek Hızlı Tren (YHT) hatlarına yönelik bakım harcamalarının toplam giderler içerisindeki payının %38,8–47,2 arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum, bakım süreçlerinde dijital dönüşüm ve veriye dayalı karar destek sistemlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Demiryolu altyapısının performansını belirleyen ekartman, nivelman, dever, fleş ve burulma gibi geometrik parametreler, işletme güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle söz konusu verilerin düzenli olarak ölçülmesi, geçmiş verilerle ilişkilendirilmesi ve bütüncül biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Building Information Modeling (BIM) yaklaşımının yedinci boyutu olan Tesis Yönetimi (7D) kapsamında, demiryolu geometrik verilerinin BIM tabanlı bir ortamda depolanması, yönetilmesi ve analiz edilmesi incelenmektedir. BIM 7D entegrasyonu sayesinde ölçüm verileri dinamik olarak izlenebilmekte, zamana bağlı değişimler analiz edilebilmekte ve öngörücü bakım uygulamaları desteklenebilmektedir. Çalışmanın temel amacı, BIM 7D yaklaşımının konvansiyonel demiryolu hatlarına ait geometrik ölçüm verilerinin yönetimi ve bakım süreçlerindeki uygulanabilirliğini değerlendirmektir.

Anahtar Kelimeler : Demiryolu, Yapı Bilgi Modellemesi, Yol Geometrik Parametreleri

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

INVESTIGATION OF RAILWAY TRACK GEOMETRY PARAMETER MONITORING USING BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) 7D

Ali KURT
Dokuz Eylül University
ali.kurt26@ogr.deu.edu.tr - 0009-0004-5671-0383

Prof. Dr. Ali TOPAL
Dokuz Eylül University
ali.topal@deu.edu.tr - 0000-0002-2601-1926

ABSTRACT

Effective maintenance management is of critical importance for the safe, comfortable, and sustainable operation of railway networks. An examination of TCDD's activity reports for the period 2017–2022 indicates that maintenance expenditures for conventional and High-Speed Train (HST) lines accounted for 38.8%–47.2% of total expenditures. This highlights the need for digital transformation and data-driven decision support systems in railway maintenance processes. Geometric parameters such as track gauge, longitudinal level, cant, alignment, and twist, which determine the performance of railway infrastructure, are of critical importance for operational safety. Therefore, these parameters need to be measured regularly, correlated with historical data, and evaluated in an integrated manner.

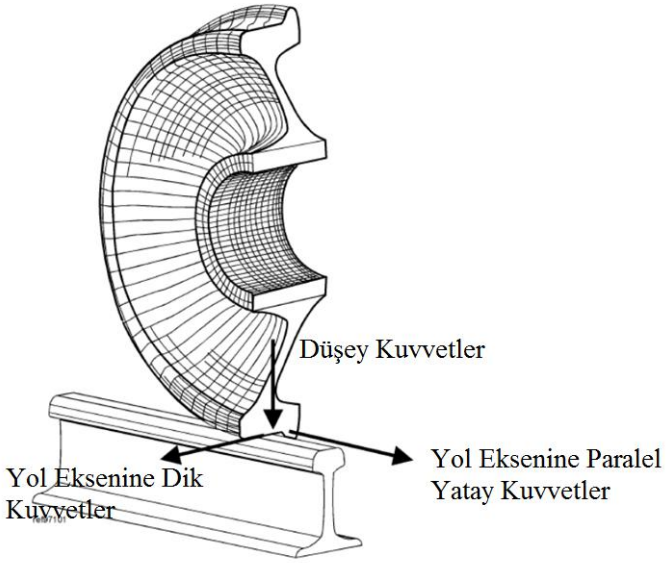
This study investigates the storage, management, and analysis of railway geometric measurement data within a Building Information Modeling (BIM)-based environment, in accordance with the seventh dimension of BIM, namely Facility Management (BIM 7D). Through BIM 7D integration, measurement data can be monitored dynamically, time-dependent changes can be analyzed, and predictive maintenance practices can be supported. The primary objective of the study is to evaluate the applicability of the BIM 7D approach to the management of geometric measurement data and maintenance processes for conventional railway lines.

Keywords: Railway, Building Information Modelling, Track Geometry Parameters

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. GİRİŞ

Demiryolu altyapısının güvenli ve sürdürülebilir şekilde işletilmesinde hat geometrisi önemli bir parametre grubunu oluşturmaktadır. Rayların maruz kaldıkları yükler dolayısı ile tasarlanan geometriden sapmaları; araç seyir güvenliği, yolcu konforu, ray ve tekerlek etkileşimi ile altyapının bakım ihtiyacı üzerinde doğrudan veya dolaylı etkilere sahiptir (Esveld, 2001).



Görsel 1. Demiryoluna Etkiyen Yükler (Esveld, 2001)

Demiryolu hatlarının belirli periyotlarla ölçülmesi ve elde edilen sonuçların değerlendirilerek gerekli bakım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi, demiryolu altyapı yönetiminin temel unsurlarından biridir. Hat geometrisi; fleş, nivelman, ekartman, dever ve burulma gibi farklı geometrik parametreler üzerinden değerlendirilmektedir (Kaçer, 2005). Avrupa standardı EN 13848-5, hat geometrisi kalite seviyelerinin değerlendirilmesine ilişkin esasları ve güvenlikle ilişkili sınır değerleri tanımlamaktadır. Standart kapsamında özellikle Immediate Action Limit (IAL), Intervention Limit (IL) ve Alert Limit (AL) gibi farklı kalite ve müdahale seviyeleri kullanılmaktadır. Mevcut demiryolu ölçüm uygulamalarında farklı ölçüm sistemleri ve üreticiye özgü yazılımlar nedeniyle ölçüm verilerinin ortak bir veri ortamında yönetilmesi ve farklı dönemlere ait sonuçların birlikte değerlendirilmesi güçleşebilmektedir. Bunun yanında hat geometrisi ölçümleri yalnızca ölçüm anındaki geometrik durumun belirlenmesi açısından değil, altyapının zaman içerisindeki değişiminin takip edilmesi bakımından da önem taşımaktadır. Bu nedenle ölçüm sonuçlarının yalnızca mevcut durumun belirlenmesinde değil, geçmiş ölçümlerle karşılaştırılarak altyapının zamansal değişiminin değerlendirilmesinde de kullanılması önem taşımaktadır. Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modelling-BIM), 7D fazı sayesinde yapı ve altyapı varlıklarına ilişkin geometrik ve geometrik olmayan bilgilerin yaşam döngüsü boyunca bütünleşik biçimde yönetilmesini sağlayan bir bilgi yönetimi yaklaşımıdır (Öz Döşer, 2016). Bu kapsamda BIM'in işletme ve bakım aşamalarında kullanılması, demiryolu altyapısına ilişkin ölçüm ve bakım verilerinin ortak bir bilgi ortamında yönetilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çerçevede, demiryolu altyapısında

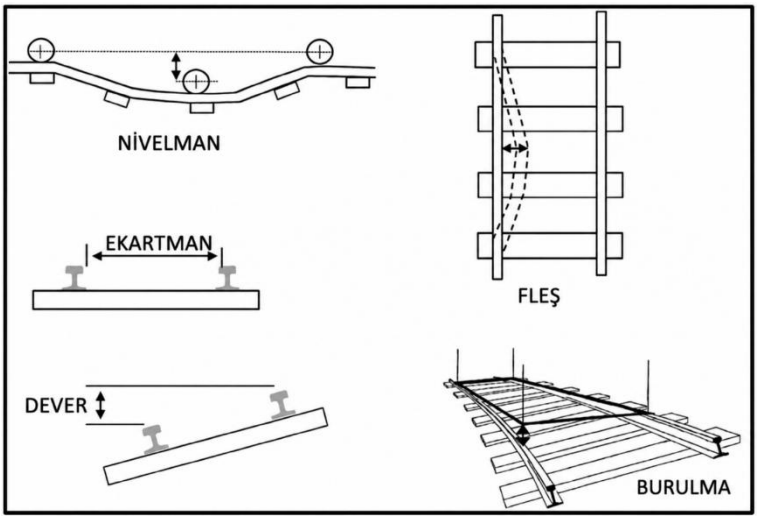
BIM'in bakım ve varlık yönetimi amacıyla kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Demiryolu ölçüm araçlarından elde edilen hat geometrisi verilerinin BIM tabanlı bir model içerisinde saklanması ve ilgili altyapı varlıklarıyla ilişkilendirilmesi önerilmektedir. Böyle bir yaklaşımın, ölçüm verilerinin yalnızca bağımsız tablolar veya raporlar şeklinde değerlendirilmesi yerine, hat üzerindeki konumu ve ilgili altyapı elemanlarıyla birlikte yönetilmesine ve bakım süreçlerinde daha bütünleşik bir veri altyapısının oluşturulmasına olanak sağlayabileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, demiryolu yol geometrisi ölçüm verilerinin BIM yaklaşımı içerisinde yönetilmesine yönelik bir model geliştirmek ve BIM'in 7D boyutunun hat geometrisi verilerinin bakım ve yaşam döngüsü yönetiminde kullanılmasına yönelik potansiyelini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, ölçüm verilerinin BIM modeli ile ilişkilendirilmesine yönelik kavramsal bir veri yapısı ve iş akışı önerilmekte; önerilen yaklaşımın teknik ve fiziksel uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla temel BIM altyapısından yararlanan web tabanlı bir sistem tasarlanmaktadır.

2. DEMİRYOLU YOL GEOMETRİK PARAMETRELERİ ve KALİTE SEVİYELERİ

2.1. Yol Geometrik Parametreleri

Demiryolu hattının geometrik durumu, rayların tasarım geometrisine göre konumunu ifade eden çeşitli parametrelerle tanımlanmaktadır. Bu parametrelerin başlıcaları fleş, nivelman, ekartman, dever ve burulmadır.



Görsel 2. Demiryolu Yol Geometrisi Parametreleri (Liao vd., 2022'den uyarlanmıştır).

Fleş, hattın yatay geometrisinin tasarım geometrisine göre olan sapmasının değerlendirilmesini sağlayan geometrik bir parametredir. Fleş hatası, hattın yatay geometrisinde meydana gelen düzensizlikleri ifade etmektedir. Fleş hatası çoğunlukla kurplarda görülmekle birlikte aliymanlarda da gözlemlenebilir (Esveld, 2001).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Nivelman, yolun düşey düzlemdeki geometrik durumunu ifade etmektedir. Yolun tasarlanan düşey geometrisinden sapması nivelman düzensizliği olarak tanımlanabilir. Nivelman hatası farklı dalga boylarında meydana gelebilmektedi (Kaçer 2005).

Ekartman, iki ray mantarının iç yüzeyleri arasındaki mesafeyi ifade eder. Ekartmanda meydana gelen değişimler araç-yol etkileşimi ve seyir güvenliği açısından önem taşımaktadır (Kaçer 2005).

Dever, kurplarda dış rayın iç raya göre düşey konum farkını tanımlamakla birlikte, aliyman bölgelerinde eş düzeyde olması gereken rayların farklı yükseltilerde olması da dever hatası olarak tanımlanmaktadır. Dever, özellikle kurplarda araçların yatay ivmelerinin kontrol edilmesi ve seyir konforunun sağlanması açısından önemlidir (Kaçer 2005).

Burulma, belirli bir aks mesafesinde dört tekerleğin aynı anda raya temas etmesini engelleyebilecek dever ve/veya nivelman düzensizliğini ifade eden göreli bir ölçüttür (Kaçer 2005).

2.2. Yol Geometrik Parametrelerinin Kalite Seviyeleri

EN 13848-5 kapsamında hat geometrisi değerlendirmesinde farklı müdahale seviyeleri kullanılmaktadır. Genel olarak kalite değerlendirmesi; uyarı, müdahale ve acil müdahale seviyeleri üzerinden ele alınmaktadır (CEN, 2008).

Uyarı Limiti (Alert Limit-AL): Hat geometrisinin mevcut durumunun düzenli bakım faaliyetleri kapsamında takip edilmesi gereken seviyeyi ifade eder (CEN, 2008).

Müdahale Limiti (Intervention Limit-IL): Düzeltici bakım yapılması gereken seviyeyi ifade eder. Amaç, geometrik bozulmanın bir sonraki ölçümden önce daha yüksek risk oluşturan seviyeye ulaşmasını önlemektir (CEN, 2008).

Acil Müdahale Limiti (Immediate Action Limit-IAL): Aşılması halinde raydan çıkma riskini kabul edilebilir seviyeye indirmek amacıyla acil tedbirlerin alınmasını gerektiren seviyedir. Bu tedbirler hız kısıtlaması, hattın kapatılması veya geometrik düzeltme gibi uygulamaları içerebilir (CEN, 2008).

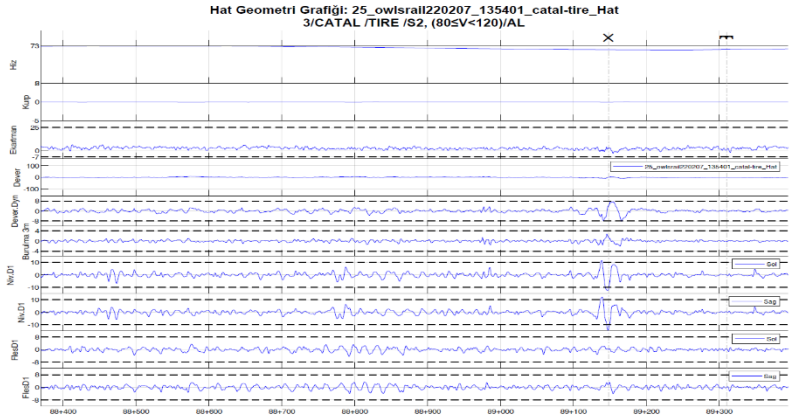
2. DEMİRYOLU ÖLÇÜM VERİLERİNİN MEVCUT YÖNETİMİ

Demiryolu yol geometrik parametrelerinin ölçümünde, Track Geometry Car (TGC) olarak adlandırılan ve yaklaşık 80–160 km/sa gibi yüksek hızlarda ölçüm yapabilen özel demiryolu araçlarından yararlanılmaktadır. Bu araçların yüksek hızlarda çalışabilmesi ve işletme koşullarına yakın bir katar yükü ve dinamik davranış sergilemesi, hat geometrisinin gerçek işletme koşullarına yakın şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Zaayman, 2016).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Görsel 3. Demiryolu Ölçüm Aracı (TCDD, 2026).

TGC'ler üzerinde bulunan entegre ölçüm sistemleri aracılığıyla ekartman, nivelman, fleş, dever ve burulma gibi çeşitli hat geometrisi parametrelerine ilişkin ham ölçüm verileri elde edilmektedir.



Görsel 4. Yol Geometrik Parametresi Ölçüm Grafiği (TCDD, 2026)

Elde edilen ham veriler, çoğunlukla ölçüm sistemiyle birlikte çalışan ve üretici firmaya özgü yazılımlar aracılığıyla işlenerek grafik, tablo ve teknik raporlara dönüştürülmektedir.

Bununla birlikte, farklı üreticilere ait ölçüm araçlarından elde edilen verilerin ortak bir sistem içerisinde bütünleştirilmesi önemli bir sorun teşkil etmektedir. Ölçüm sistemlerinin kullandığı veri formatları, yazılım altyapıları ve veri işleme yöntemlerinin farklılık göstermesi, farklı kaynaklardan elde edilen verilerin tek bir platformda birlikte değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Ayrıca bazı ölçüm sistemi üreticileri, ham verilerin işlenmesi ve raporlanması için kendi yazılımlarının kullanılmasını zorunlu tutmakta; bazı durumlarda ise ölçüm verilerinin üretici firmaya ait sunucularda muhafaza edilmesini şart koşulabilmektedir.

Bu durum, ölçüm verilerinin uzun vadeli ve bağımsız biçimde muhafaza edilmesi, farklı dönemlere ait verilerin birlikte değerlendirilmesi ve farklı ölçüm sistemlerinden elde edilen

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

verilerin karşılaştırılması açısından çeşitli kısıtlar oluşturmaktadır. Sonuç olarak, demiryolu yol geometrik parametre verilerinin yönetiminde ölçüm sistemi ve yazılım üreticilerine yönelik bir teknolojik ve operasyonel bağımlılık ortaya çıkabilmekte; bu bağımlılık, verilerin bütüncül bir altyapı bilgi yönetim sistemi içerisinde değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır.

4. BIM VE 7D YAKLAŞIMI

Building Information Modeling (BIM) bir yazılım türü olarak tanımlandığı gibi onun 3 boyutlu sanal bir model olduğunu söyleyen ve onu bir proje yürütme süreci olarak tanımlayan yaklaşımlar da vardır.

BIM, fiziksel bir varlığın geometrik ve geometrik olmayan bilgilerinin ortak bir model ve bilgi yönetimi yaklaşımı içerisinde yönetilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle BIM; bilginin oluşturulması, paylaşılması, kaydedilmesi, düzenlenmesi ve güncellenmesini varlığın yaşam döngüsünün farklı aşamalarını kapsayacak şekilde ele almaktadır (Mordue 2018).

BIM sisteminin zamanla ihtiyaç ve imkanlar gözetilerek genişletilmesiyle;

4D: Zaman ve iş programı yönetimi,
5D: Maliyet yönetimi ve takibi,
6D: Sürdürülebilirlik ve çevresel performans,
7D: İşletme, bakım ve varlık yönetimine ilişkin bilgilerin yönetimi mümkün kılmıştır (Silva, 2011).

Bu çalışmada özellikle 7D boyutuna odaklanılmasının temel nedeni, demiryolu yol geometrik parametrelerinin ölçüm verilerinin doğrudan işletme ve bakım süreçleriyle ilişkili olmasıdır. 7D BIM yaklaşımında demiryolu hattının geometrik modeli; arazi, üstyapı elemanları, ölçüm sonuçları, bakım kayıtları, malzeme ve varlık bilgileriyle ilişkilendirilebilmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde BIM modeli, “yolun geometrik modeli” olmaktan çıkarak “yolun bilgi modeli” haline gelmektedir.

5. ÖNERİLEN BIM 7D TABANLI HAT GEOMETRİSİ VERİ MODELİ

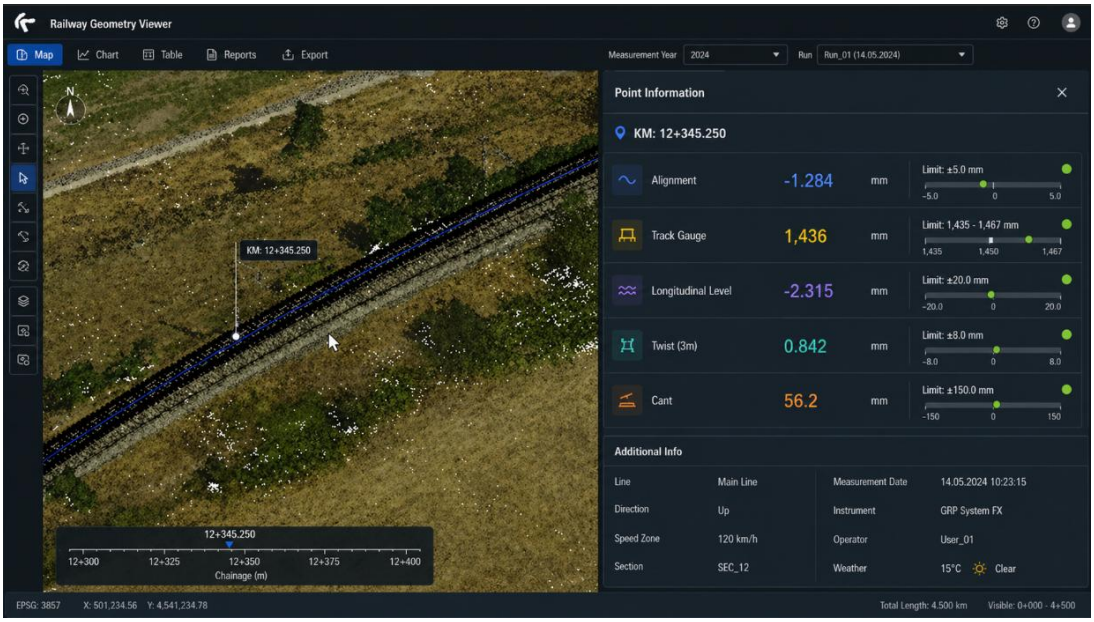
Önerilen BIM 7D tabanlı hat geometrisi veri modelinin oluşturulmasında, demiryolu altyapısının yalnızca tasarım geometrisinin değil, mevcut geometrik ve topografik durumunun da model içerisinde temsil edilmesi esas alınmaktadır. Bu kapsamda öncelikle güzergâhın gerçek geometrisi, ray üstü ölçüm noktalarının hat ekseni üzerindeki konumlarının belirlenmesi ve bu noktaların koordinat bilgilerinin kullanılmasıyla üç boyutlu olarak modellenebilmektedir. Böylece hattın yatay ve düşey geometrisi ile mevcut arazi koşulları, gerçek ölçüm verilerine dayalı bir referans sistem içerisinde tanımlanabilmektedir.

Modelin üstyapı bileşenleri; ray, travers, ve benzeri diğer ilgili yapı elemanlarının üç boyutlu nesneler olarak tanımlanması ve her bir nesneye ait geometrik ve geometrik olmayan

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

özelliklerin modele işlenmesiyle oluşturulabilmektedir. Bu kapsamda malzeme türü, teknik özellikler, üretici bilgileri, yapım veya yenileme tarihi, kullanım durumu ve bakım geçmişi gibi bilgiler ilgili nesnelerle ilişkilendirilebilmektedir.

Bunun yanında, hattın içerisinde bulunduğu mevcut arazi ve çevresel koşulların modele aktarılması amacıyla nokta bulutu taramaları, fotogrametri veya benzeri uzaktan algılama yöntemlerinden yararlanılarak arazinin üç boyutlu yüzey ve/veya katı modelinin oluşturulması mümkündür. Böylece demiryolu üstyapısı ile yalnızca kendi geometrisini değil, içerisinde bulunduğu gerçek topografik çevreyi de içeren bütünleşik bir model elde edilebilmektedir.



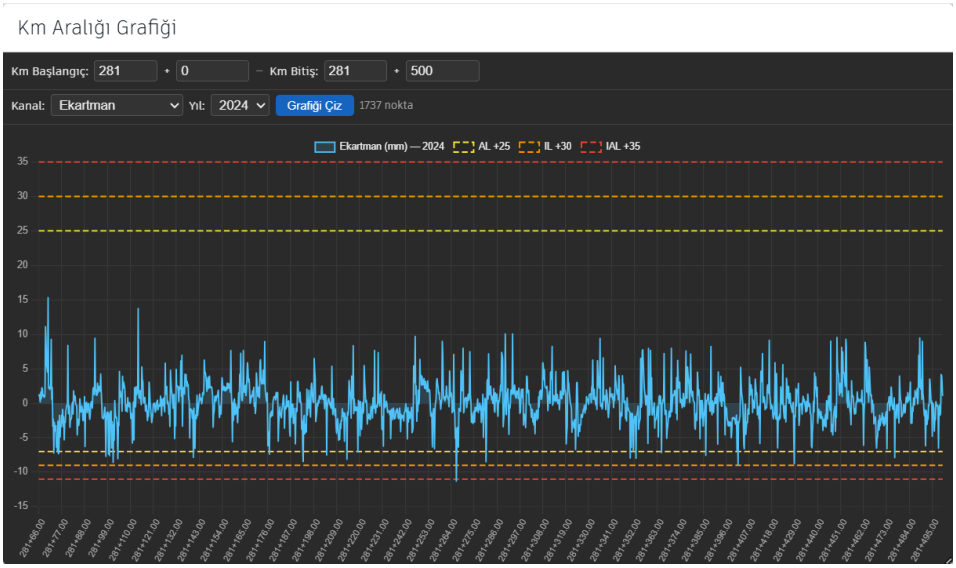
Görsel 5. BIM 7D ile Modeli Oluşturulmuş Bir Demiryolu Kesimi

Son aşamada ise hat geometrisi ölçüm sistemlerinden elde edilen ekartman, nivelman, fleş, dever ve burulma gibi ölçüm sonuçlarının, ilgili kilometre, koordinat veya hat kesimi ile ilişkilendirilerek oluşturulan BIM modeli içerisine işlenmesi öngörülmektedir. Bu sayede ölçüm verileri, modelden bağımsız sayısal tablolar veya raporlar şeklinde saklanmak yerine, ölçümün gerçekleştirildiği geometrik konum ve ilgili altyapı elemanlarıyla doğrudan ilişkilendirilmiş biçimde yönetilebilmektedir. Çalışmanın özgün yaklaşımını oluşturan bu aşamada, hat geometrisi ölçüm verilerinin yalnızca BIM modeline aktarılması değil, aynı zamanda model üzerindeki ilgili konum ve varlıklar üzerinden takip edilebilmesi hedeflenmektedir. Böylece belirli bir hat kesimine ait ölçüm sonuçlarına model üzerinden erişilmesi, ölçüm noktalarının geometrik konumlarının görsel olarak izlenmesi ve farklı ölçüm dönemlerine ait verilerin aynı model içerisinde arazi koşulları ile ilişkilendirilmesi mümkün hale getirilmektedir.

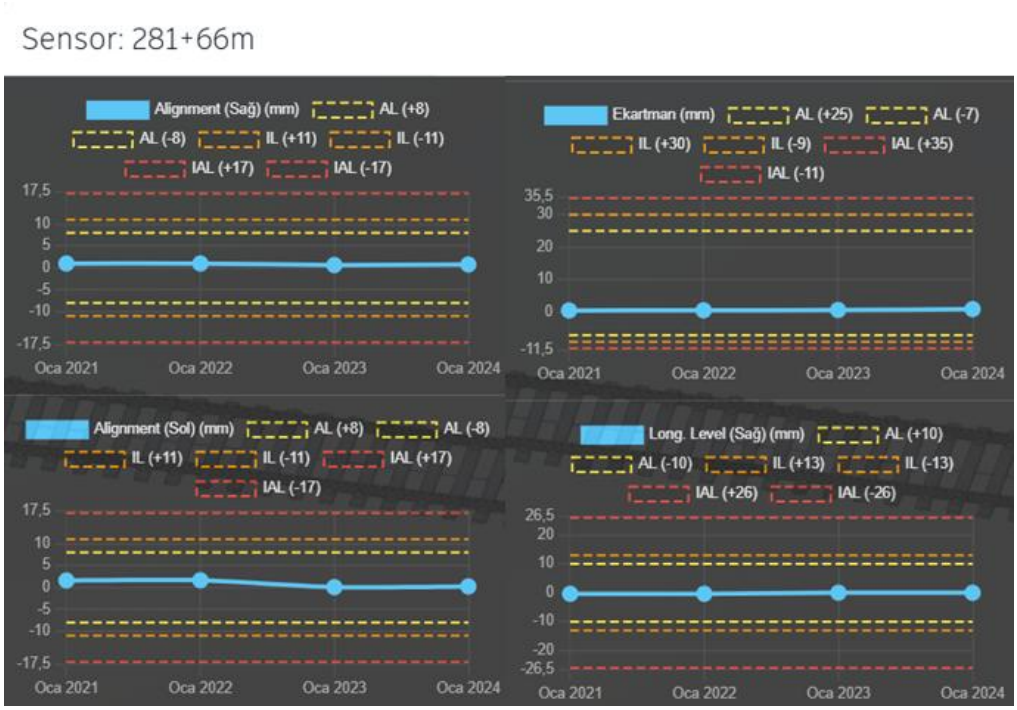
Mevcut BIM yazılımları kullanılarak önerilen modelin geometrik ve nesne tabanlı altyapısının oluşturulması mümkün olmakla birlikte, hat geometrisi ölçüm verilerinin amaca uygun biçimde modele aktarılması, farklı veri kaynaklarının bütünleştirilmesi ve ihtiyaç duyulan analiz ve

grafiklerin oluşturulabilmesi için BIM altyapısının özelleştirilmesi gerekmektedir. Bu gereksinim doğrultusunda, çalışmanın yalnızca kavramsal bir veri modeli önerisiyle sınırlı kalmaması ve önerilen yaklaşımın gerçek bir yazılım altyapısı üzerinde sınanabilmesi amacıyla, bu çalışma kapsamında BIM modeli üzerinden hat geometrisi ölçüm verilerinin takibine yönelik özgün bir web tabanlı arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen arayüz, BIM modelini yalnızca üç boyutlu bir görselleştirme ortamı olarak kullanmak yerine, ölçüm verilerinin konumsal olarak modellenmiş altyapı bileşenleri ile ilişkilendirildiği ve kullanıcı tarafından doğrudan model üzerinden sorgulanabildiği bir bilgi ortamı olarak ele almaktadır. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında ortaya konulan kavramsal yaklaşımın fiziksel ve teknik altyapısının uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla, temel BIM altyapısından yararlanan, web tabanlı ve hat geometrisi ölçüm verilerinin işlenmesine yönelik özelleştirilmiş bir sistem tasarlanmıştır. Geliştirilen arayüzde, BIM modelinin geometrik gösterimi ile ölçüm verilerinin yönetimi aynı kullanıcı ortamında bir araya getirilmiş; kullanıcıların hat üzerindeki belirli bir konumu veya altyapı elemanını seçerek bu konumla ilişkili ölçüm verilerine ulaşabilmesi esas alınmıştır. Ayrıca farklı ölçüm dönemlerine ait verilerin aynı model üzerinden görüntülenmesi ve hat geometrisi parametrelerinin grafiksel olarak incelenebilmesine yönelik işlevler geliştirilmiştir. Tasarlanan sistemde ölçüm verilerinin BIM modeli içerisindeki ilgili konum ve varlıklarla ilişkilendirilmesi, farklı dönemlere ait verilerin birlikte yönetilmesi ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre grafiksel gösterimlerin oluşturulmasına yönelik işlevler ele alınmıştır. Görsel 5'te, bu çalışma kapsamında geliştirilen web tabanlı arayüzün BIM modeli ve hat geometrisi ölçüm verilerinin birlikte kullanımına yönelik örnek görünümü sunulmaktadır. Görselde model üzerinde temsil edilen demiryolu hattı ile ölçüm verilerinin aynı bilgi ortamında ilişkilendirildiği ve ölçüm sonuçlarının model üzerinden takip edilebildiği görülmektedir. Görsel 6'da belirli bir kesimdeki bir ölçümün sonuçları grafik hale getirilmiştir. Görsel 7'de ise tek bir noktaya ait 4 verinin 3 yıllık ölçüm sonuçları görülmektedir.

Bu uygulama ile önerilen BIM 7D tabanlı veri modelinin yalnızca kavramsal düzeyde değil, uygulanabilir bir bilgi yönetim altyapısı içerisinde gerçekleştirilebilme potansiyelinin ortaya konulması amaçlanmıştır.



Görsel 6. BIM 7D ile Modeli Oluşturulmuş 2024 Yılına Ait Ekartman Verisi Grafiği



Görsel 7. BIM 7D İle Modeli Oluşturulmuş Tek Bir Noktaya Ait 3 Yıllık 4 Farklı Ölçüm Verisi

Bu uygulama sonucunda ortaya konulan model; arazi, demiryolu güzergâhı, üstyapı elemanları, altyapı bileşenleri ve ölçüm verilerini aynı bilgi ortamında bir araya getiren, mevcut durumun bütünleşik bir sayısal temsili niteliğinde bir altyapı modeli olarak değerlendirilebilir. Böylelikle model yalnızca hattın üç boyutlu geometrisini temsil eden bir görselleştirme aracı olmaktan çıkarak, hat geometrisi, üstyapı ve altyapı bileşenlerinin yanısıra geçmiş ve mevcut durumunun izlenebildiği, bakım faaliyetleriyle ilişkilendirilebildiği ve farklı ölçüm araçlarından gelse dahi gelecekteki ölçüm sonuçlarının da aynı yapı içerisinde yönetilebildiği bir BIM 7D varlık yönetim modeli haline gelmektedir.

6. BIM 7D TABANLI HAT GEOMETRİSİ VERİ MODELİNİN BAKIM YÖNETİMİNDE KULLANILMASI

BIM tabanlı hat geometrisi veri modelinin bakım yönetimindeki temel avantajı, demiryolu altyapısına ilişkin farklı nitelikteki verilerin tek bir bilgi modeli içerisinde ilişkilendirilebilmesidir. Böylece ölçüm sonucunda tespit edilen bir geometrik düzensizlik; konumu, arazi koşulları, hat geometrisi ve ilgili üstyapı elemanlarıyla birlikte değerlendirilebilmektedir.

Özellikle nokta bulutu, sayısal arazi modeli veya benzeri yöntemlerle oluşturulan üç boyutlu katı cisim modelinin kullanılması, hattın içerisinde bulunduğu topografik koşulların bakım yöneticisi tarafından doğrudan incelenebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede belirli bir kilometrede tespit edilen nivelman, dever veya fleş düzensizliği; hattın eğimi, kurp geometrisi, çevre topoğrafyası ve diğer fiziksel koşullarla birlikte değerlendirilebilir. Böylece ölçüm

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

sonucunun yalnızca “hangi değere ulaştığı” değil, “hangi fiziksel koşullar altında ve hangi altyapı elemanlarıyla ilişkili olarak ortaya çıktığı” da analiz edilebilir.

Bu elemanlara ait malzeme, teknik özellik, yapım veya yenileme tarihi ve bakım geçmişi gibi niteliklerin ölçüm sonuçlarıyla ilişkilendirilmesi, bakım kararlarının daha kapsamlı bir veri seti üzerinden alınmasına olanak sağlayabilir. Örneğin belirli bir hat kesiminde tekrarlayan bir geometrik düzensizliğin tespit edilmesi durumunda, ilgili kesimde kullanılan üstyapı elemanlarının özellikleri ve geçmiş bakım uygulamaları aynı model üzerinden incelenebilir. Böylelikle hat geometrisi ile altyapının fiziksel ve işletme geçmişi arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesine yönelik bir ortam oluşturulabilir.

Modelin bakım yönetimi açısından bir diğer önemli avantajı, farklı ölçüm sistemlerinden elde edilen verilerin tek bir ana model içerisinde birleştirilebilmesidir. Farklı üreticilere ölçüm sistemlerinden elde edilen verilerin önceden tanımlanmış ortak bir veri yapısına dönüştürülmesiyle, ölçüm sisteminden bağımsız bir bilgi modeli oluşturulabilir. Bu yaklaşım, farklı ölçüm araçlarının kendilerine özgü yazılım ve veri formatlarından kaynaklanan entegrasyon sorunlarının azaltılmasına ve farklı dönemlerde gerçekleştirilen ölçümlerin aynı model üzerinde karşılaştırılabilmesine imkân sağlayabilir. Böylece veri yönetimi belirli bir ölçüm aracı veya yazılımına bağımlı olmaktan çıkarılarak kurumun kendi bilgi modelinde sürdürülebilir hale getirilebilir.

Mevcut hattın BIM modeli oluşturulmasının bakım yönetimi açısından en önemli katkılarından biri ise zamansal değişimin izlenebilmesidir. Her ölçümün tarih, kilometre, koordinat ve ilgili geometrik parametre ile ilişkilendirilmesi sayesinde aynı noktaya ait farklı yıllardaki ölçüm sonuçları tek bir model üzerinden incelenebilir. Örneğin belirli bir kilometredeki burulma değerinin yıllar içerisindeki değişimi, gerçekleştirilen bakım faaliyetleriyle birlikte değerlendirilebilir. Bu sayede belirli bir noktadaki geometrik bozulmanın artış veya azalış eğilimi, bakım öncesi ve sonrası durumu ve tekrarlama davranışı aynı veri ortamı içerisinde takip edilebilir.

Bu zamansal değerlendirme farklı mekânsal ölçeklerde gerçekleştirilebilir. Değerlendirme yalnızca tek bir ölçüm noktasıyla sınırlandırılmayıp belirli bir hat kesimi veya hattın tamamı ölçeğinde de yapılabilir. Böylece yıllar içerisinde hat geometrisi kalitesinde meydana gelen bölgesel değişimler, belirli kilometre aralıklarında yoğunlaşan bozulmalar ve farklı geometrik parametrelerin hat boyunca gösterdiği eğilimler ortaya konulabilir. Örneğin belirli bir hat kesiminde nivelman değerlerinin zaman içerisinde sürekli artış göstermesi ile aynı bölgede gerçekleştirilen bakım faaliyetleri arasındaki ilişki incelenebilir. Bunun yanı sıra ekartman, dever ve burulma gibi farklı parametrelerin aynı hat kesimindeki değişimleri birlikte değerlendirilerek, tek bir parametrenin izole olarak incelenmesinden daha kapsamlı bir altyapı değerlendirmesi yapılabilir.

Bu kapsamda BIM modeli, hem noktasal hem de hat ölçeğinde veri analizi yapılmasına olanak sağlayan bir bakım yönetim aracı olarak değerlendirilebilir. Noktasal ölçekte; belirli bir

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

koordinat veya kilometredeki farklı geometrik parametrelerin, üstyapı özelliklerinin, arazi koşullarının ve bakım geçmişinin birbirleriyle ilişkisi incelenebilirken, hat ölçeğinde; geometrik kalite değişimleri, bozulma bölgeleri, bakım yoğunlukları ve uzun dönemli eğilimler değerlendirilebilir. Böylece aynı veri modeli içerisinde mikro ölçekteki lokal kusur ile makro ölçekteki hat performansı arasında ilişki kurulması mümkün hale gelmektedir.

Bu yapı, bakım yönetiminin yalnızca mevcut durumun tespitine dayalı olmaktan çıkarılarak geçmiş verilerden yararlanan ve eğilimleri dikkate alan bir karar destek sürecine dönüştürülmesine katkı sağlayabilir. Ölçüm sonuçlarının yıllar içerisinde biriktirilmesiyle belirli geometrik parametrelerin değişim hızları ve tekrarlama eğilimleri belirlenebilir; bakım müdahalelerinin bu değişimler üzerindeki etkisi izlenebilir. Böylece bakım kararlarında yalnızca mevcut durumda limit değerleri aşan noktalar değil, hangi bölgelerde bozulmanın hızlandığı, hangi bölgelerde stabil kaldığı ve gerçekleştirilen müdahalelerin geometrik kalite üzerindeki etkisi de değerlendirilebilir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, demiryolu yol geometrisi ölçüm verilerinin BIM 7D yaklaşımı içerisinde yönetilmesi amacıyla BIM modeli üzerinden hat geometrisi ölçüm verilerinin takibine yönelik web tabanlı bir arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulama ile ölçüm verilerinin hat üzerindeki konumları ve ilgili altyapı-üstyapı varlıklarıyla ilişkilendirilerek aynı bilgi ortamında yönetilebileceği ve farklı dönemlere ait ölçüm sonuçlarının model üzerinden takip edilebileceği ortaya konulmuştur.

Çalışma kapsamında ulaşılan temel değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Demiryolu ölçüm sistemlerinden elde edilen hat geometrisi verilerinin yalnızca ölçüm raporlarının oluşturulmasında değil, altyapının yaşam döngüsü boyunca kullanılabilecek bir bilgi kaynağı olarak değerlendirilmesi mümkündür.
- Farklı ölçüm araçlarından elde edilen verilerin ortak bir veri yapısında standardize edilmesi, ölçüm sistemlerine ve üretici yazılımlarına olan bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlayabilir.
- Ekartman, nivelman, fleş, dever ve burulma gibi hat geometrisi parametreleri BIM modeli içerisindeki ilgili hat kesimleri ve varlıklarla ilişkilendirilebilir.
- Ölçüm değerlerinin AL, IL ve IAL gibi kalite ve müdahale seviyeleriyle ilişkilendirilmesi, BIM ortamının bakım kararlarını destekleyen bir bilgi platformu olarak kullanılmasına olanak sağlayabilir.
- Farklı tarihlerde gerçekleştirilen ölçümlerin aynı model üzerinde saklanması, hat geometrisinin zaman içerisindeki değişiminin ve bozulma eğiliminin izlenmesine imkân verebilir.
- Bakım faaliyetlerinin ölçüm sonuçlarıyla ilişkilendirilmesi sayesinde bakım öncesi ve sonrası geometrik durum karşılaştırılabilir ve gerçekleştirilen müdahalenin etkinliği takip edilebilir.

Sonuç olarak BIM'in demiryolu hat geometrisi verilerinin yönetiminde kullanılmasının temel katkısının üç boyutlu görselleştirmeden ziyade bilginin merkezi, zaman bağımlı ve varlıkla ilişkili şekilde yönetilmesi olduğu değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte önerilen yaklaşımın saha verileri kullanılarak uygulanabilirliğinin doğrulanabilmesi için sonraki çalışmalarda farklı ölçüm araçlarından elde edilen gerçek ölçüm verilerinin ortak bir veri tabanında birleştirilmesi, BIM modeline aktarılması ve saha bakım kayıtlarıyla ilişkilendirilmesi gerekmektedir.

İlerleyen çalışmalarda geçmiş ölçüm verilerinden yararlanılarak geometrik bozulma hızlarının belirlenmesi, bakım ihtiyacının önceden tahmin edilmesi ve BIM modeli ile sensör/ölçüm sistemleri arasında çift yönlü veri alışverişinin kurulması ele alınabilir. Bu gelişmeler, demiryolu altyapısında BIM tabanlı varlık yönetiminden dijital ikiz ve öngörücü bakım uygulamalarına geçiş için bir altyapı oluşturabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yürütülen "Demiryolu Hat Geometrisi Parametrelerinin Sayısal Model Tabanlı Entegrasyonu ve Takibi" başlıklı yüksek lisans tezinin bir parçasıdır.

BIM modelinin oluşturulması aşamasında sağladığı değerli katkı ve desteklerinden dolayı 7Dimensions kurucusu İnş. Yük. Müh. Hasan Can ÖZDEMİR'e teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. Araç, E., Türkiye'de Raylı Sistem Sektöründe Yapı Bilgi Modellemesine Geçiş Süreçleri Üzerine Bir Örnek Olay İncelemesi ve Yönetimsel Öneriler, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
3. Azhar, S., Khalfan, M. ve Maqsood, T., Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond, Australasian Journal of Construction Economics and Building, 12, 4, 15-28, 2011.
4. Bilgiç, Ş., Demiryolu Ders Notları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 2017.
5. Bradley, A., Li, H., Lark, R. ve Dunn, S., BIM for Infrastructure: An Overall Review and Constructor Perspective, Automation in Construction, 71, 139-152, 2016.
6. CEN, EN 13848:2008 Railway Applications – Track – Track Geometry Quality, European Committee for Standardization, Brussels, 2008.
7. Eastman, C.M., Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1999.
8. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. ve Liston, K., BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, 2. Baskı, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2011.
9. Esveld, C., *Modern Railway Track,* 2. Baskı, MRT-Productions, Zaltbommel, The Netherlands, 2001.

10. Evcimen, A., Yapı Bilgi Modellemesi ile Yapılabilirliğin Geliştirilmesi: Endüstriyel Tesis İnşaatı Projesinde Bir Vaka Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2018.
11. Khajehei, H., Ahmadi, A., Soleimanmeigouni, I. ve Nissen, A., Allocation of Effective Maintenance Limit for Railway Track Geometry, Structure and Infrastructure Engineering, DOI: 10.1080/15732479.2019.1629464, 2019.
12. İça, S., Demiryollarında Yol Geometri Kusurlarının İncelenmesi ve Çözüm Önerileri: Kütahya-Afyon Demiryolu Hattı Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2015.
13. Kaçer, İ., Kısım Şefi El Kitabı, TCDD Ankara Eğitim Merkezi Müdürlüğü, Ankara, 2005.
14. Kaewunruen, S. ve Lian, Q., Digital Twin-Aided Sustainability-Based Lifecycle Management for Railway Turnout Systems, Journal of Cleaner Production, 228, 1537-1551, 2019.
15. Karis, T., Track Irregularities for High-Speed Trains, Master of Science Thesis, KTH, Stockholm, Sweden, 2009.
16. Mordue, S., Opportunities and Threats: Definition on BIM, https://www.ace-cae.eu/fileadmin/New_Upload/3._Area_2_Practice/BIM/Other_Docs/1_S.Mordue_Definition_of_BIM_01.pdf (Erişim tarihi: 05.04.2015).
17. Öz Döşer, A.M., *Integration of BIM to Facility Management,* Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
18. Silva, V., BIM: The Summary of a Long History, https://tr.scribd.com/doc/76835106/BIM-The-Summary-of-a-Long-History (Erişim tarihi:).
19. T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2017 Yılı Faaliyet Raporu, Ankara, 2018.
20. T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2018 Yılı Faaliyet Raporu, Ankara, 2019.
21. T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2019 Yılı Faaliyet Raporu, Ankara, 2020.
22. T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2020 Yılı Faaliyet Raporu, Ankara, 2021.
23. T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2021 Yılı Faaliyet Raporu, Ankara, 2022.
24. T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2022 Yılı Faaliyet Raporu, Ankara, 2023.
25. https://www.tcdd.gov.tr/projeler/tcdd-bakim-modernizasyonu-projesi (Erişim tarihi: 01.08.2026).
26. Zaayman, L., The Basic Principles of Mechanised Track Maintenance, 3. Baskı, PMC Media House GmbH, 2017.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

COLD-BONDED ARTIFICIAL AGGREGATES FROM 75 μm COLEMANITE AND ULEXITE POWDERS USING CEMENT AND REACTIVE MGO BINDERS

Youssef ALKHABAZE
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
youssef.alkhabaze@std.yildiz.edu.tr – 0009-0009-1772-9547

Prof. Orhan CANPOLAT
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
canpolat@yildiz.edu.tr – 0000-0003-2744-7876

Dr. Hasan YILDIRIM
The University of Manchester, Manchester, UK
hasan.yildirim@postgrad.manchester.ac.uk – 0000-0002-3947-142X

Prof. Mücteba UYSAL
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
mucteba@yildiz.edu.tr – 0000-0002-6827-9904

Assoc. Prof. Yurdakul AYGÖRMEZ
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
aygormez@yildiz.edu.tr – 0000-0001-7405-2450

Assoc. Prof. Abdullah Huzeyfe AKCA
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
aakca@yildiz.edu.tr – 0000-0003-1151-5520

Assoc. Prof. Metin MEHMETOĞLU
Istanbul Gelisim University, Istanbul, Türkiye
mashhadani@gelisim.edu.tr – 0000-0002-1646-5879

Asst. Prof. Rafet ŞİŞMAN
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
rafet@yildiz.edu.tr – 0000-0002-2699-0255

Dr. Burcu DİNÇ ŞENGÖNÜL
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
bdinc@yildiz.edu.tr – 0000-0001-8450-3921

Dr. Abdullah ÇELİK
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
celik@yildiz.edu.tr – 0000-0002-2669-3082

Esra IŞIKAKDOĞAN
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
esra.soylu@std.yildiz.edu.tr – 0009-0005-4582-6396

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility of producing cold-bonded artificial aggregates from colemanite and ulexite powders with a maximum particle size of 75 µm using Portland-composite cement and two reactive magnesium oxide (MgO) binders, designated M1 and M2. The pellets were manufactured using a pelletization disc with a constant binder content of 10% by mass and were cured under ambient and accelerated carbonation conditions for up to 28 days. The water demand, single-particle crushing strength, bulk unit weight, specific gravity, water absorption, and resistance against water exposure were evaluated. Both aforementioned boron mine tailings were successfully pelletized within the target aggregate size range of 4–16 mm, although dry ulexite-based mixtures required more water during pelletization. The reactive MgO binders improved particle strength compared with that of artificial aggregates produced using Portland-composite cement, with maximum mean values approaching 3 MPa. Carbonation generally enhanced the early strength development of all artificial aggregates, regardless of the binder type. However, its effect was more pronounced for M1 and M2, despite the different strength development trends observed with their utilization. Colemanite-based MgO aggregates exhibited lower water absorption than the corresponding ulexite-based aggregates. The findings indicate that the reactivity of M1 and M2, the curing conditions, and the borate type might have jointly influenced the performance of the boron-derived artificial aggregates. The results provide an initial basis for further optimization and evaluation of artificial aggregates produced from boron mine tailings for potential use in concrete applications.

Keywords: Artificial aggregates; pelletization; colemanite; ulexite; reactive MgO; carbonation curing

1. INTRODUCTION

The construction industry consumes large quantities of natural aggregates, increasing pressure on natural resources and raising environmental concerns. The utilization of industrial by-products and waste materials as alternative construction materials can reduce the consumption of natural aggregates while providing a beneficial route for waste valorization [1–6]. Artificial aggregates produced through pelletization have been widely investigated, particularly in fly ash-based systems, because this process enables the conversion of fine particulate materials into usable aggregate particles and may contribute to reducing the self-weight of concrete [10–19].

Boron minerals and boron-containing wastes generated during industrial processing also represent potential raw materials for construction applications. Considering the global demand for aggregates, the utilization of boron-derived materials in artificial aggregate production may provide an alternative pathway for reducing natural aggregate consumption while promoting the beneficial use of mineral-processing residues. Boron does not occur naturally as a free element but is present primarily in various borate minerals. The commercial importance of these minerals is closely associated with their chemical composition and B_2O_3 content [20].

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

More than 230 boron minerals have been identified in nature, among which tincal, colemanite, kernite, ulexite, pandermite, boracite, szaybelite, and hydroboracite are commercially important. Turkey possesses substantial boron resources, particularly deposits of tincal, colemanite, and ulexite. Tincal deposits are mainly located in Eskişehir-Kırka, whereas colemanite deposits occur in Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç, and Bursa-Kestelek. Ulexite is also found in Balıkesir-Bigadiç and may occur as a by-product in Bursa-Kestelek. These minerals are processed into various commercial boron products, including borax pentahydrate, borax decahydrate, boric acid, boron oxide, calcined tincal, ground colemanite, and ground ulexite [21].

Boron minerals and boron-containing wastes have previously been investigated for use in cementitious and other construction materials. Studies have shown that B_2O_3-containing materials can influence the hydration, setting behavior, and performance of cement-based systems. Colemanite and boron-processing wastes have also been evaluated as raw materials or additives in cement, brick, plaster, ceramic, lightweight construction materials, and other building-related applications [22–34]. These studies demonstrate the potential of boron-derived materials as secondary raw materials for construction applications.

Despite these developments, comparatively limited attention has been given to the direct production of cold-bonded artificial aggregates from different boron sources, particularly with respect to the effects of binder type and curing condition on their physical, mechanical, and water-resistance characteristics. Therefore, the present study investigates artificial aggregates produced from colemanite and ulexite powders with a maximum particle size of 75 μm using Portland cement and two reactive MgO binders. The study evaluates pelletization characteristics, water demand, particle-size distribution, single-particle crushing strength, bulk unit weight, specific gravity, water absorption, and resistance to water exposure.

2. EXPERIMENTAL STUDY

2.1. Materials and Mixture Design

Colemanite and ulexite powders with a maximum particle size of 75 μm were used as the principal raw materials. Ulexite is a hydrated sodium–calcium borate mineral, whereas colemanite is a hydrated calcium borate mineral. Portland-composite cement (CEM II/A-L 42.5 R [35]) and two reactive MgO binders, designated M1 and M2, were used separately at a constant binder content of 10% by mass. The purities of M1 and M2 were 99.5% and 85%, respectively. The reactivity of the MgO binders was compared using the acetic acid neutralization time test. The reactivity of the MgO binders was compared using the acetic acid neutralization time test. The observed color-change times were approximately 20 s for M1 and 8.5 s for M2. Neutralization times of approximately 20–25s have been associated with highly reactive MgO in the literature [36]. Accordingly, the shorter neutralization time observed for M2 compared with M1 indicates its higher reactivity under the conditions of this test. The mixture abbreviations used in the study are CU and CC for cement-bonded ulexite and

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

colemanite aggregates, respectively; M1U and M2U for ulexite-based MgO aggregates with M1 and M2, respectively; and M1C and M2C for colemanite-based MgO aggregates with M1 and M2, respectively.

2.2. Production of Artificial Aggregates by Pelletization

Artificial aggregates were produced by pelletization using a pelletizer disc, as illustrated in Figure 1. Each mixture was prepared in separate batches. During the production process, the dry materials were first introduced into the pelletizer disc and mixed thoroughly for a few minutes. Water was then gradually sprayed onto the dry powder mixtures to initiate pellet formation. The amount of water added during the first 15 min of the agglomeration process ranged from 14% to 20% by weight of the dry mixture, depending on the material type. This stage facilitated the formation of spherical fresh pellets. After the completion of water spraying, pelletization was continued for an additional 15 min to promote pellet growth and further compaction. Throughout the pelletization process, the pelletizer disc was operated at an inclination angle of 60° and a rotational speed of 75 rpm.

Figure 1. Disc pelletizer used to produce artificial aggregates.

Following production, the artificial aggregates were cured for 7, 14, and 28 days under either ambient curing conditions (21 ± 3 °C and 60 ± 10% relative humidity) or accelerated carbonation conditions (21 ± 3 °C, 60 ± 10% relative humidity, and 10% CO_2) prior to testing. After curing, the aggregates were characterized in terms of bulk density, water absorption, specific gravity, and crushing strength.

2.3. Characterization of Artificial Aggregates

The particle size distribution of the produced aggregates was determined by sieve analysis in accordance with ASTM C136/C136M [37]. The physical properties of the aggregates were evaluated using standard aggregate testing procedures. Compacted bulk unit weight was

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

determined according to ASTM C29/C29M [38], while specific gravity and water absorption were measured in accordance with ASTM C127 [39].

The single-particle crushing strength of the artificial aggregates was determined using a point-load test, in which individual aggregate particles were placed between two parallel loading plates and loaded until failure. To determine the average single-particle crushing strength, at least 20 individual aggregate particles were tested for each mixture cured under ambient conditions, while at least 10 particles were tested for each mixture subjected to accelerated carbonation curing. The crushing strength of each particle was calculated using Eq. (1):

$$\sigma = \frac{2.8 \times F}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

where σ is the single-particle crushing strength (MPa), (*F*) is the failure load (N), and (*D*) is the particle diameter (mm), represented by the distance between the two loading plates. This equation has been widely adopted in previous studies to estimate the single-particle crushing strength of artificial lightweight aggregates [15, 18, 40].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Most of the produced artificial aggregates fell within the 4–16 mm particle size range and exhibited a dense and compact structure without visible surface cracks, indicating that the pelletization conditions were sufficient to promote effective pellet growth and densification.

The average water-to-dry-material ratio required to achieve proper pellet formation for each aggregate mixture is presented in Figure 2. In general, the values were relatively consistent among different batches of the same mixture type, demonstrating good repeatability and consistency of the pelletization process. However, noticeable differences were observed between the different material groups, reflecting variations in their particle characteristics and water demand during pellet growth. In particular, ulexite-based mixtures generally required a higher water-to-dry-material ratio than colemanite-based mixtures. This behavior can be attributed to differences in particle size distribution, particle morphology, specific surface area, and mineralogical composition, all of which influence the amount of water required to generate sufficient capillary forces and interparticle bonding for stable pellet formation and growth.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

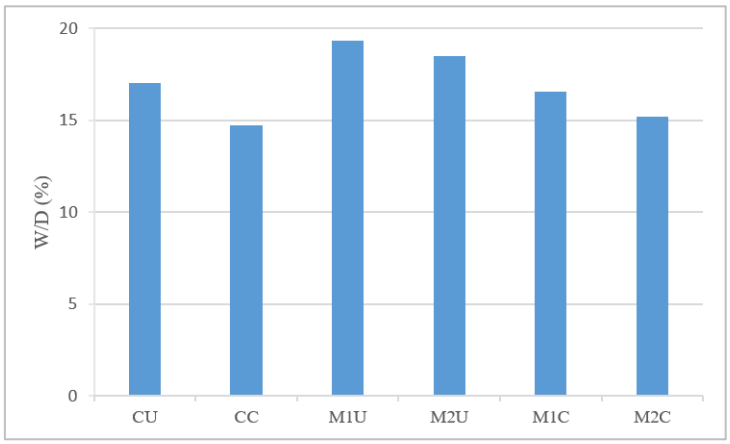


Figure 2. Average water-to-dry-material ratio (by mass) required for pellet formation of each aggregate mixture.

3.1. Properties of Boron Aggregates Produced with Cement as a Binder

The cement-bonded aggregates exhibited markedly different water stability depending on the borate source. The CU aggregates showed poor resistance to water immersion, undergoing dissolution or disintegration after 24 h. Although their water stability improved after 28 days of carbonation curing, they remained susceptible to partial dissolution and disintegration. In contrast, the CC aggregates retained their integrity during water immersion, demonstrating substantially better water stability. This difference may primarily be associated with the lower water solubility of colemanite compared with ulexite.

Figures 3–8 summarize the mechanical and physical properties of the cement-bonded aggregates. Due to the poor water stability of CU, its specific gravity and water absorption could not be determined. Under ambient curing (Figure 3), both CU and CC exhibited mean single-particle crushing strengths below 1 MPa at 14 and 28 days, with CC showing slightly higher values. Accelerated carbonation increased the mean crushing strength of both aggregate types (Figure 4), although the additional strength gain beyond 14 days was limited. The higher crushing strength observed after carbonation may be attributed to carbonate formation, which could promote stronger bonding between internal particles. The large standard deviations in crushing strength reflect the particle-to-particle variation inherent in this type of measurement, as aggregates produced under the same pelletization conditions may still differ in dimensions, morphology, pore structure, and internal integrity.

The bulk unit weight of CU was approximately 870 kg/m³ (Figure 5), noticeably lower than the approximately 1060–1110 kg/m³ measured for CC (Figure 6). For CC, specific gravity remained close to 2.0 (Figure 7), while water absorption was approximately 13–14% (Figure 8). Curing age and particle-size fraction had only minor effects on these physical properties. Overall, the CC aggregates exhibited better water stability, slightly higher crushing strength, and relatively stable physical properties, indicating more favourable performance than their CU counterparts.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

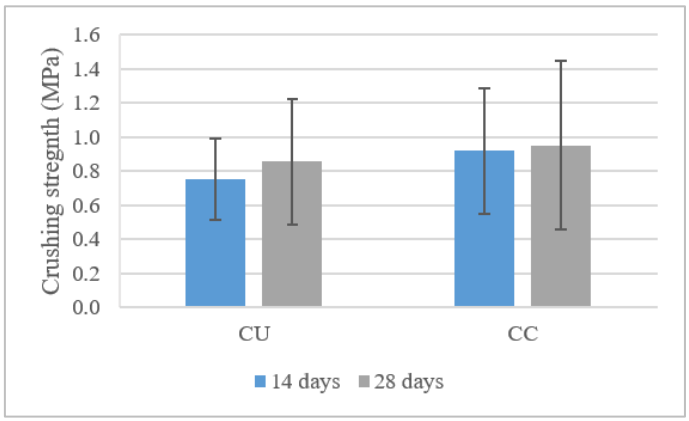


Figure 3. Average single-particle crushing strength of ambient-cured cement-bonded ulexite-based (CU) and colemanite-based (CC) aggregates.

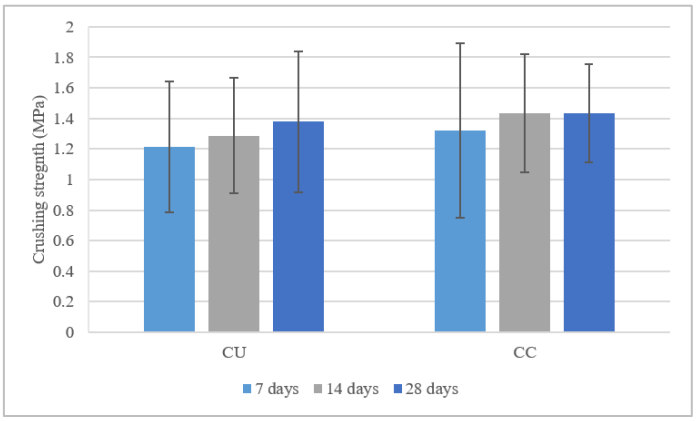


Figure 4. Average single-particle crushing strength of cement-bonded ulexite-based (CU) and colemanite-based (CC) aggregates after accelerated carbonation curing.

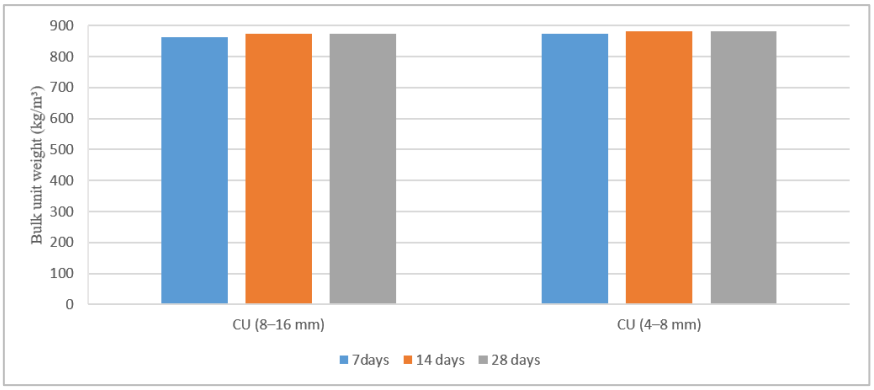


Figure 5. Compacted bulk unit weight of ambient-cured CU aggregates at different curing ages and particle-size fractions.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

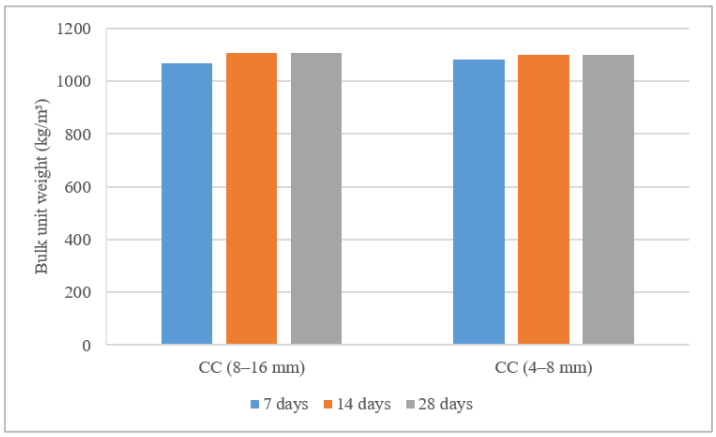


Figure 6. Compacted bulk unit weight of ambient-cured CC aggregates at different curing ages and particle-size fractions.

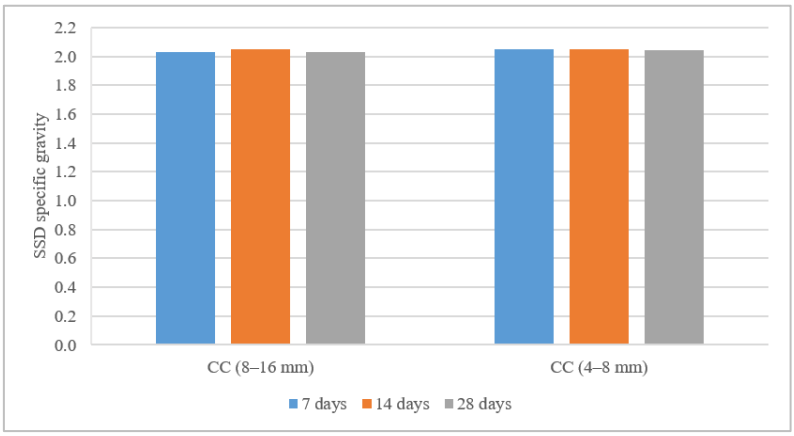


Figure 7. Specific gravity of ambient-cured CC aggregates at different curing ages and particle-size fractions.

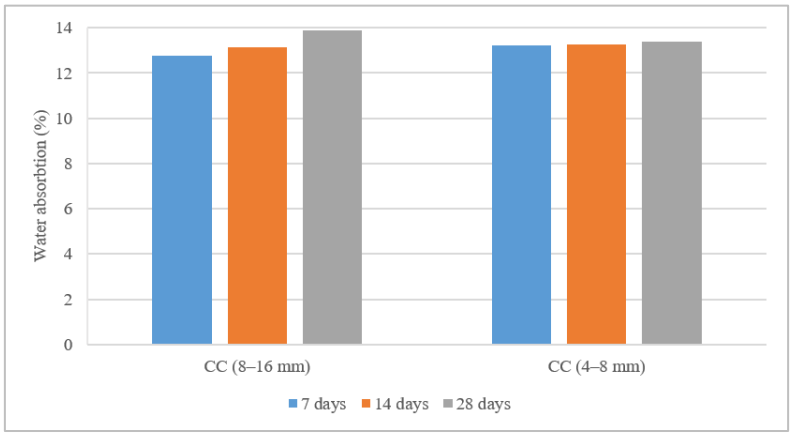


Figure 8. Water absorption of ambient-cured CC aggregates at different curing ages and particle-size fractions.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

3.2. Properties of Boron Aggregates Produced with MgO as a Binder

3.2.1. Ulexite-Based MgO Aggregates

The mechanical and physical properties of the ulexite-based MgO aggregates are presented in Figures 9–12. Single-particle crushing strength was evaluated under both ambient and accelerated carbonation curing, whereas the physical properties were measured only for the ambient-cured aggregates. Specific gravity and water absorption could not be determined for M2U because of its poor stability during water immersion.

Water stability varied considerably with MgO type and curing condition. Under ambient curing, M1U remained sufficiently stable for immersion-based testing, whereas M2U partially dissolved and lost mechanical integrity. Following carbonation curing, M1U exhibited only partial water stability, while M2U showed greater deterioration. Thus, although carbonation improved crushing strength, it did not necessarily improve water stability, particularly for M2U.

M1U generally exhibited slightly higher mean crushing strengths than M2U (Figure 9). Under ambient curing, the strength of both mixtures increased mainly up to 14 days, with limited subsequent improvement. Accelerated carbonation enhanced early-age strength for both mixtures. For M1U, the difference between carbonation and ambient curing diminished with age, whereas for M2U, even the 7-day carbonation-cured strength exceeded the 14-day ambient-cured value, with little additional improvement thereafter. The strength enhancement under carbonation curing was likely associated with the formation of magnesium carbonate-containing products and improved interparticle bonding. The relatively large standard deviations observed for both mixtures indicate considerable variability among individual aggregate particles, which may be associated with unavoidable differences in particle geometry, internal porosity, compaction, and local structural heterogeneity.

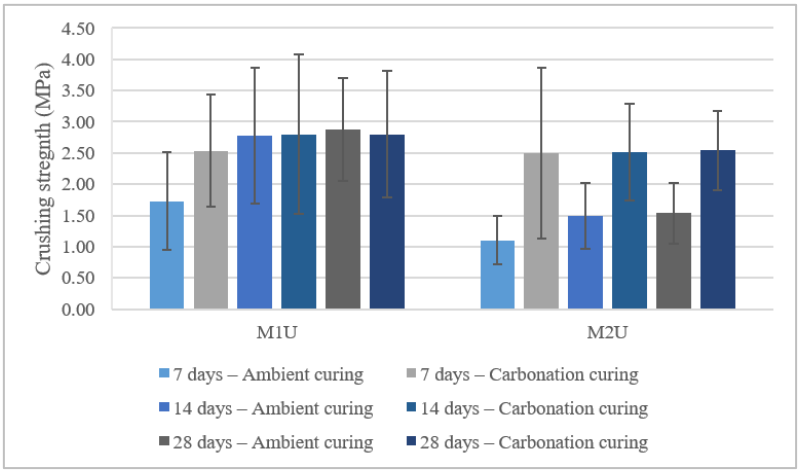


Figure 9. Average single-particle crushing strength of M1U and M2U aggregates under ambient- and carbonation-curing conditions.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

The bulk unit weights of the ambient-cured aggregates ranged from approximately 800 to 980 kg/m³, with M1U generally exhibiting higher values than M2U (Figure 10). For M1U, specific gravity remained within approximately 1.68–1.80 (Figure 11), while water absorption ranged from approximately 22% to 28% (Figure 12), with the 8–16 mm fraction generally showing higher absorption. Overall, curing age and particle-size fraction had relatively limited effects on bulk unit weight and specific gravity, while particle size had a more noticeable influence on water absorption.

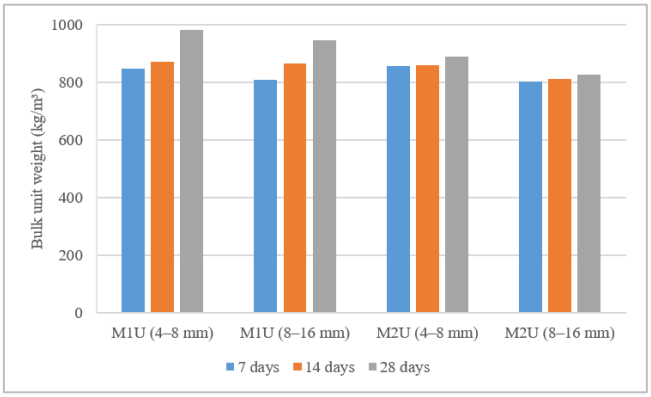


Figure 10. Compacted bulk unit weight of ulexite-based MgO aggregates under ambient-curing conditions.

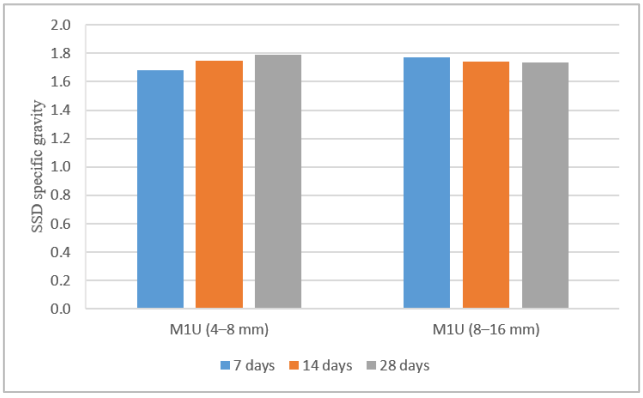


Figure 11. Specific gravity of ulexite-based MgO aggregates under ambient-curing conditions.

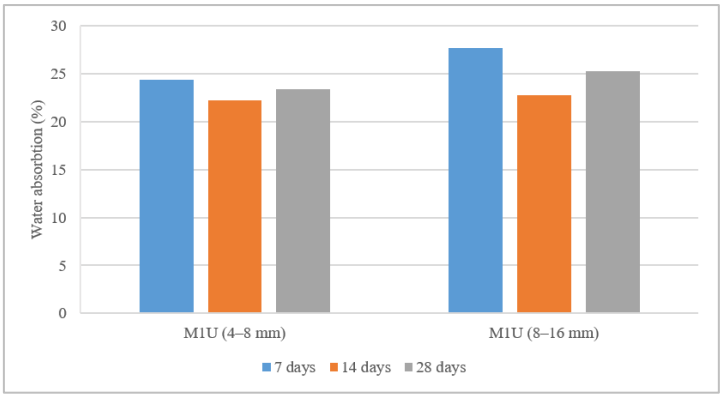


Figure 12. Water absorption of ulexite-based MgO aggregates under ambient-curing conditions.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

3.2.2. Colemanite-Based MgO Aggregates

The mechanical and physical properties of the colemanite-based MgO aggregates are presented in Figures 13–16. Single-particle crushing strength was evaluated under both ambient and accelerated carbonation curing, whereas bulk unit weight, specific gravity, and water absorption were measured only for the ambient-cured aggregates.

Water stability depended on both MgO type and curing condition. Under ambient curing, M1C remained stable during water immersion, whereas M2C retained its shape but showed reduced mechanical integrity; nevertheless, both were sufficiently stable for specific-gravity and water-absorption testing. Following carbonation curing, M1C exhibited reduced water stability, while M2C remained stable. Thus, as observed for the ulexite-based MgO aggregates, improved crushing strength under carbonation curing did not necessarily correspond to improved water stability.

M1C consistently exhibited higher mean crushing strengths than M2C under both curing conditions (Figure 13). Under ambient curing, strength development with age was limited, whereas accelerated carbonation substantially increased the crushing strength of both mixtures. The carbonation-cured strength increased from approximately 2.3 to 3.0 MPa for M1C and from 1.5 to 2.4 MPa for M2C between 7 and 28 days, indicating sustained strength development under carbonation curing. This improvement was likely associated with the formation of carbonate-containing reaction products and enhanced interparticle bonding.

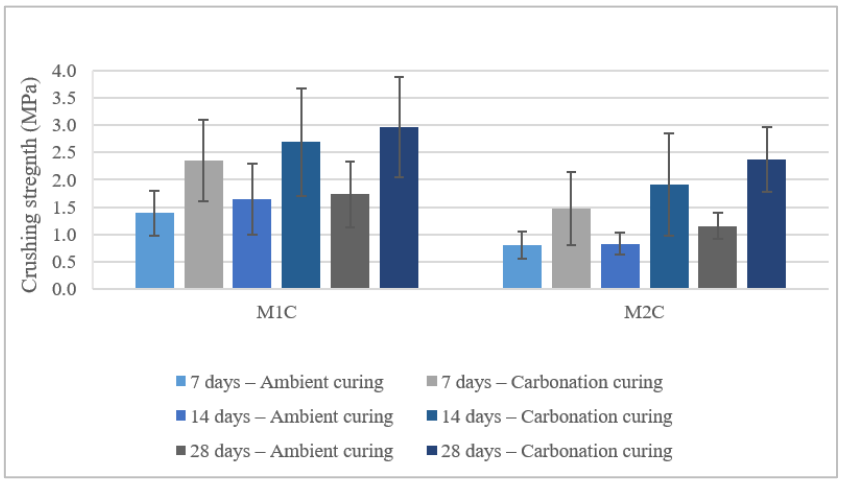


Figure 13. Average single-particle crushing strength of M1C and M2C aggregates under ambient- and carbonation-curing conditions.

For the ambient-cured aggregates, bulk unit weight ranged from approximately 980 to 1150 kg/m³ and generally increased with curing age (Figure 14). Specific gravity remained close to 1.9 for both mixtures (Figure 15), while water absorption ranged from approximately 15% to 16.5% and generally decreased slightly with curing age (Figure 16). Particle-size fraction had only a minor influence on these physical properties, although the 8–16 mm fraction generally

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

exhibited slightly higher water absorption. Compared with the ulexite-based MgO aggregates, the colemanite-based aggregates exhibited lower water absorption and more consistent physical properties.

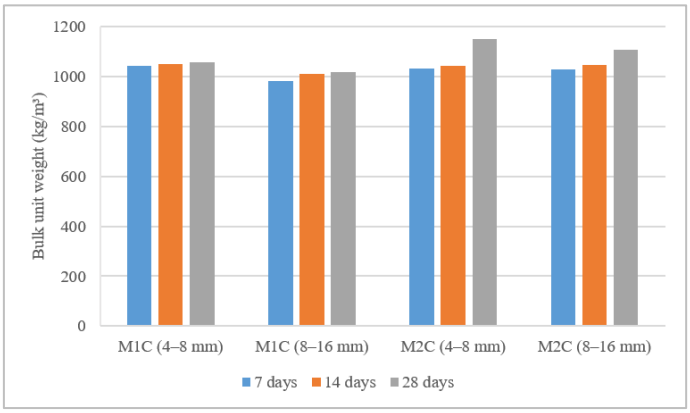


Figure 14. Compacted bulk unit weight of M1C and M2C aggregates under ambient-curing conditions.

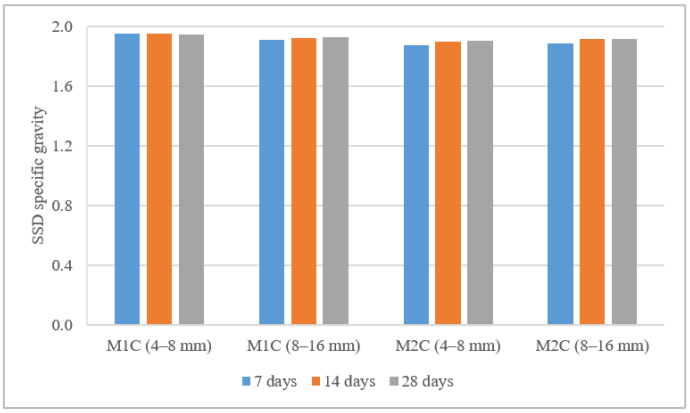


Figure 15. Specific gravity of M1C and M2C aggregates under ambient-curing conditions.

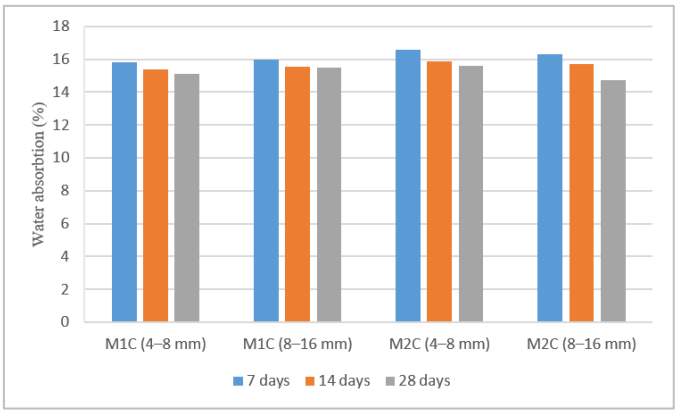


Figure 16. Water absorption of M1C and M2C aggregates under ambient-curing conditions.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

4. CONCLUSIONS

Based on the experimental results obtained in this study, the following conclusions can be drawn:

- Artificial aggregates were successfully produced from finely ground ulexite and colemanite powders using Portland-composite cement and two reactive MgO binders through pelletization. Most of the produced aggregates fell within the target particle-size range of 4–16 mm and exhibited a compact morphology without visible surface cracking.

- Aggregate performance was strongly influenced by both borate source and binder type. Colemanite-based aggregates generally exhibited better water stability than their ulexite-based counterparts, while MgO-bonded aggregates developed considerably higher single-particle crushing strengths than cement-bonded aggregates.

- Accelerated carbonation generally enhanced crushing strength, with particularly pronounced improvements for the MgO-bonded aggregates. However, increased mechanical strength did not necessarily correspond to improved water stability, indicating that strength development alone is insufficient to assess aggregate performance under water exposure.

- Curing age and particle-size fraction generally had limited effects on the measured physical properties compared with the influence of binder and borate type. The colemanite-based MgO aggregates exhibited lower water absorption and more consistent physical properties than the corresponding ulexite-based aggregates.

- Overall, colemanite showed greater potential than ulexite as a borate source for artificial aggregate production, while reactive MgO combined with accelerated carbonation was particularly effective in enhancing mechanical performance. Further optimization of mixture composition and curing conditions, together with microstructural characterization and durability assessment, is required before the practical application of these aggregates in concrete.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Research Fund of Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye. The authors would like to express their sincere gratitude to the Scientific Research Projects Coordination Unit for providing financial support for this project (Project No. FBA-2025-6777).

REFERENCES

[1] Jyosyula, S.K.R., Surana, S. and Raju, S., Role of lightweight materials of construction on carbon dioxide emission of a reinforced concrete building, Materials Today: Proceedings, 27, 984-990, 2020.

[2] Hong, J., Shen, G.Q., Feng, Y., Lau, W.S.T. and Mao, C., Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: A case study in China, Journal of Cleaner Production, 103, 249-259, 2015.

[3] Adesina, A., Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions, Environmental Challenges, 1, 100004, 2020.

[4] Srivastava, A. and Singh, S.K., Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review, Journal of Cleaner Production, 253, 119706, 2020.

[5] Arslan, H. and Baykal, G., Utilization of fly ash as engineering pellet aggregates, Environmental Geology, 50, 5, 761-770, 2006.

[6] Ma, S., Akca, A.H., Esposito, D. and Kawashima, S., Influence of aqueous carbonate species on hydration and carbonation of reactive MgO cement, Journal of CO2 Utilization, 41, 101260, 2020.

[7] Silva, G., Kim, S., Aguilar, R. and Nakamatsu, J., Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry, Sustainable Materials and Technologies, 23, e00132, 2020.

[8] Walczak, P., Szymański, P. and Rózycka, A., Autoclaved Aerated Concrete based on Fly Ash in Density 350 kg/m³ as an Environmentally Friendly Material for Energy-Efficient Constructions, Procedia Engineering, 122, 39-46, 2015.

[9] Botha, A. and Strydom, C.A., Preparation of a magnesium hydroxy carbonate from magnesium hydroxide, Hydrometallurgy, 62, 3, 175-183, 2001.

[10] Terzić, A., Pezo, L., Mitić, V. and Radojević, Z., Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances, Ceramics International, 41, 2, 2714-2726, 2015.

[11] Baykal, G. and Döven, A.G., Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results, Resources, Conservation and Recycling, 30, 1, 59-77, 2000.

[12] Manikandan, R. and Ramamurthy, K., Influence of fineness of fly ash on the aggregate pelletization process, Cement and Concrete Composites, 29, 6, 456-464, 2007.

[13] Harikrishnan, K.I. and Ramamurthy, K., Influence of pelletization process on the properties of fly ash aggregates, Waste Management, 26, 8, 846-852, 2006.

[14] Sahoo, S., Selvaraju, A.K. and Suriya Prakash, S., Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres, Cement and Concrete Composites, 113, 103712, 2020.

[15] Yıldırım, H. and Özturan, T., Impact resistance of concrete produced with plain and reinforced cold-bonded fly ash aggregates. Journal of Building Engineering, 42, 102875, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102875

[16] Nadesan, M.S. and Dinakar, P., Structural concrete using sintered flyash lightweight aggregate: A review, Construction and Building Materials, 154, 928-944, 2017.

[17] Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Li, S. and Fan, Y., Utilization of coal fly and bottom ash pellet for phosphorus adsorption: Sustainable management and evaluation, Resources, Conservation and Recycling, 149, 372-380, 2019.

[18] Kockal, N.U. and Ozturan, T., Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments, Cement and Concrete Composites, 33, 1, 61-67, 2011.

[19] Kockal, N.U. and Ozturan, T., Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes, Journal of Hazardous Materials, 179, 1-3, 954-965, 2010.

[20] Bütüner, R., Emet bölgesi düşük tenörlü kolemanit stoklarının değerlendirilebilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2011.

[21] https://www.etimaden.gov.tr (Accessed: 03.03.2022)

[22] Özdemir, M. and Öztürk, N.U., Utilization of clay wastes containing boron as cement additives, Cement and Concrete Research, 33, 10, 1659-1661, 2003.

[23] https://www.turkcimento.org.tr/ (Accessed: 03.03.2022)

[24] Kavas, K. and Emrullahoğlu, Ö.F., Seydişehir kırmızı çamuru ve Kırka bor atıklarının endüstriyel hammadde olarak kullanımı, I. Batı Anadolu Hammadde Kaynakları Sempozyumu, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 216-225, İzmir, 1999.

[25] Kavas, T., Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick, Building and Environment, 41, 12, 1779-1783, 2006.

[26] Demir, D. and Keleş, G., Radiation transmission of concrete including boron waste for 59.54 and 80.99 keV gamma rays, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 245, 2, 501-504, 2006.

[27] Batar, T., Köksal, N.S. and Yersel, E., Atık Bor, Atık Kâğıt ve Perlit Katkılı Sıva Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Ekoloji Dergisi, 18, 72, 45-53, 2009.

[28] Davraz, M., The effects of boron compounds on the properties of cementitious composites, Science and Engineering of Composite Materials, 17, 1, 1-18, 2010.

[29] Kavas, T., Christogerou, A., Pontikes, Y. and Angelopoulos, G.N., Valorisation of different types of boron-containing wastes for the production of lightweight aggregates, Journal of Hazardous Materials, 185, 2-3, 1381-1389, 2011.

[30] Akyıldız, A., Beton üretiminde bor atıklarının puzzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye, 2012.

[31] Eyyüboğlu, S., Kolemanit konsantratör atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2013.

[32] Murathan, A., Asan, A. and Abdulkarem, T.A., Çevresel atıkların yapı malzemesinde değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28, 2, 409-416, 2013.

[33] Kilicarslan, A., Kurttepeli, Y. and Saridede, M.N., Using of Boron Wastes in Red Brick Production, Advanced Materials Research, 699, 223-227, 2013.

[34] Binici, H., Aksogan, O., Sevinc, A.H. and Kucukonder, A., Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with colemanite, barite, ground basaltic pumice and ground blast furnace slag, Construction and Building Materials, 50, 177-183, 2014.

[35] Turkish Standard: TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri (Cement-Part 1: Composition. Specification and Conformity Criteria for Common Cements), Ankara, 2012.

[36] Aytimur, N., Ulukaya, S. and Akca, A.H., The Effects of Carbonation and Elevated Temperatures on the Properties of Magnesium-Based Mortar. Appl. Sci., *15*, 9264, 2025.

[37] ASTM C136/C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.

[38] ASTM C29/C29M-23, Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2023.

[39] ASTM C127-24, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024.

[40] Cheeseman, C. R., Makinde, A., and Bethanis, S., Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash. Resources, Conservation and Recycling, 43(2), 147-162, 2005.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

PERFORMANCE OF 45 µm COLEMANITE- AND ULEXITE-BASED ARTIFICIAL AGGREGATES PRODUCED WITH CEMENT AND HIGH-CALCINED MgO

Esra IŞIKAKDOĞAN
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
esra.soylu@std.yildiz.edu.tr – 0009-0005-4582-6396

Prof. Orhan CANPOLAT
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
canpolat@yildiz.edu.tr – 0000-0003-2744-7876

Dr. Hasan YILDIRIM
The University of Manchester, Manchester, UK
hasan.yildirim@postgrad.manchester.ac.uk – 0000-0002-3947-142X

Prof. Mücteba UYSAL
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
mucteba@yildiz.edu.tr – 0000-0002-6827-9904

Assoc. Prof. Yurdakul AYGÖRMEZ
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
aygormez@yildiz.edu.tr – 0000-0001-7405-2450

Assoc. Prof. Abdullah Huzeyfe AKCA
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
aakca@yildiz.edu.tr – 0000-0003-1151-5520

Assoc. Prof. Metin MEHMETOĞLU
Istanbul Gelisim University, Istanbul, Türkiye
mashhadani@gelisim.edu.tr – 0000-0002-1646-5879

Asst. Prof. Rafet ŞİŞMAN
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
rafet@yildiz.edu.tr – 0000-0002-2699-0255

Dr. Burcu DİNÇ ŞENGÖNÜL
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
bdinc@yildiz.edu.tr – 0000-0001-8450-3921

Dr. Abdullah ÇELİK
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
celik@yildiz.edu.tr – 0000-0002-2669-3082

Youssef ALKHABAZE
Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye
youssef.alkhabaze@std.yildiz.edu.tr – 0009-0009-1772-9547

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ABSTRACT

This study investigates cold-bonded artificial aggregates manufactured from colemanite and ulexite powders with a maximum particle size of 45 μm using Portland-composite cement and highly calcined magnesium oxide (MgO) as alternative binders. The aggregates were produced using a palletization disc with a binder content of 10% by mass and cured under ambient and carbonation conditions. Their properties were evaluated in terms of single-particle crushing strength, bulk unit weight, specific gravity, water absorption, and resistance to water exposure. Colemanite-based dry mixtures required less water during palletization than ulexite-based dry mixtures. Colemanite aggregates produced with cement exhibited greater resistance to water exposure and retained their shape during immersion in water, whereas the corresponding ulexite aggregates remained water-sensitive. Under ambient curing, colemanite aggregates produced with cement developed higher single-particle crushing strength than the corresponding ulexite aggregates, whereas under carbonation curing, the difference between the two aggregate groups was relatively small. Regardless of the curing condition, the use of MgO resulted in relatively lower crushing strength in colemanite-based aggregates. However, carbonation had a more pronounced effect on the strength development of ulexite aggregates produced with MgO. Both colemanite and ulexite aggregates produced with MgO exhibited dissolution or disintegration upon water exposure under both ambient and carbonation-curing conditions. Further improvement in water resistance is therefore required before these aggregates can be considered for concrete applications.

Keywords: Artificial aggregates; cold bonding; boron minerals; colemanite; ulexite; highly calcined MgO

1. INTRODUCTION

The environmental burden of concrete production is not limited to emissions from cement; the extraction and transport of natural aggregate and the self-weight of structures also contribute to the overall impact [1–4]. A sustainable aggregate should therefore reduce virgin-resource consumption while providing adequate mechanical performance, low unit weight, and long-term stability [4–6]. Because environmentally preferable materials may require specialized processing or incur additional cost [7–9], technical performance and production feasibility must be assessed together.

Artificial-aggregate production offers a route for transforming fine industrial by-products into granular construction materials. Disc pelletization, in particular, has been widely applied to powders such as fly ash through controlled nucleation and particle growth [10–13]. The resulting aggregates can lower structural dead load because of their reduced density [14, 15], yet their strength and behavior in concrete remain sensitive to pelletization parameters, binder selection, and curing method [16–18]. Cold bonding avoids energy-intensive sintering, but extended curing and water absorption associated with open porosity remain important limitations [19, 20].

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

The same strategy may be applicable to fine fractions generated during the processing of boron minerals, for which Türkiye possesses substantial reserves. Boron occurs mainly in calcium-, sodium-, or magnesium-bearing borates, and the commercial value of these minerals is closely related to their B_2O_3 content [21]. Tincal, colemanite, and ulexite are the principal commercial boron minerals in Türkiye, while the glass and ceramic industries are their dominant markets [22]. Clay-rich residues from ore washing and classification can represent both a loss of valuable constituents and an environmental concern, making their conversion into construction products relevant [23].

The construction-related use of boron-bearing materials extends beyond a single product category. Colemanite concentrator residues and boron-containing clays have been examined as cement raw materials or additions, with compliant binders obtained at suitable incorporation levels [23, 24]. Combining boron waste with red mud has produced bricks with low absorption and adequate strength [25], while limited additions to brick bodies have reduced firing temperature and improved mechanical properties [26, 27]. Thermal and mechanical benefits have also been reported for plasters containing calcined tincal, perlite, and wastepaper [28].

Results from lightweight-aggregate and concrete applications vary with the boron-bearing feedstock and processing route. Porous lightweight aggregate has been manufactured by pelletizing selected boron wastes with clay and quartz followed by thermal treatment [29]. Low boron-waste replacement levels in concrete have provided later-age strength and cost benefits [30], and the post-fire behavior of cements containing colemanite residue has also been investigated [31]. Conversely, high absorption in some CaO-rich boron-waste composites has restricted their use in direct contact with water [32]. These contrasting findings show that mechanical capacity and water stability must be evaluated concurrently in boron-derived artificial aggregates.

Cementitious systems containing colemanite or ulexite have additionally been studied for radiation shielding. Concrete incorporating borogypsum and colemanite concentrator waste showed reduced transmission at selected gamma-ray energies [33]. In mortars containing colemanite, barite, basaltic pumice, and blast-furnace slag, low colemanite contents improved compressive strength, whereas larger additions adversely affected setting [34]. Functional benefits from boron minerals therefore cannot be considered independently of their chemical compatibility with cement.

Particle fineness is a distinct design variable in this context. A study using 45 and 75 μm colemanite in natural-hydraulic-lime mortars found that low replacement levels could enhance 28-day compressive strength without markedly changing water absorption [35]. Another investigation covering −3 mm, −75 μm, −45 μm, and finer colemanite fractions showed that smaller particles could improve distribution and contact with the cement matrix [36]. However, those studies used colemanite as a matrix addition; pelletizing a feedstock composed entirely of mineral powder may produce different water demand and bonding mechanisms.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Mineral type also governs the nature and magnitude of interaction with cement hydration. Increasing concentrations of boron compounds have previously been shown to retard hydration and extend setting time [37]. Calorimetric studies of mortars containing colemanite, ulexite, borax, and boron carbide further demonstrated that soluble boron species can suppress early heat release and setting development [38, 39]. Colemanite displayed greater compatibility with Portland cement than ulexite in these comparisons, suggesting that pellets made from the two minerals may follow different early-age strength trajectories.

Curing environment determines how these chemical effects translate into pore structure and mechanical performance. Reviews of cold-bonded aggregate emphasize that absorption, density, and strength arise from the combined effects of precursor, binder, and curing conditions [19]. Suitable humidity promoted hydration-product formation and single-particle strength in phosphogypsum pellets [40], whereas cold-bonded particles made from aggregate-washing sludge absorbed more water than their sintered counterparts [20]. In reactive MgO systems, carbonation can promote hydrated magnesium carbonate formation and thus provides an alternative pathway for strength development [6].

Despite these investigations in the literature, direct comparisons of artificial colemanite and ulexite aggregates pelletized under identical conditions remain scarce. In particular, the combined influence of mineral type, cement or highly calcined MgO binder, and ambient or carbonation curing on water stability and single-particle strength has not been sufficiently clarified. The present study addresses this gap by comparing the production-water demand, physical properties, crushing response, and water-exposure behavior of colemanite- and ulexite-based artificial aggregates.

2. EXPERIMENTAL STUDY

2.1. Materials and Mixture Design

Ground colemanite and ulexite powders with a maximum particle size of 45 μm were used as the principal raw materials. Ulexite is a hydrated sodium–calcium borate mineral with the chemical formula $Na_2O{\cdot}2CaO{\cdot}5B_2O_3{\cdot}16H_2O$, whereas colemanite is a hydrated calcium borate mineral with the chemical formula $2CaO{\cdot}3B_2O_3{\cdot}5H_2O$. Ulexite contains approximately 37% B_2O_3, up to 20% CaO, and at least 3.50% Na_2O, while colemanite contains approximately 40% B_2O_3 and 27% CaO. Both minerals also contain minor amounts of SiO_2, SO_4, Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO, and SrO.

Portland-composite cement (CEM II/A-L 42.5 R [41]) and highly calcined magnesium oxide (MgO) were used separately as binders at a constant dosage of 10% by mass of ulexite or colemanite in the respective mixtures. The MgO binder had a purity of 62.00–65%, with maximum contents of 4.25% SiO_2, 1.85% CaO, 0.99% Fe_2O_3, and 0.75% Al_2O_3, and a loss on ignition of up to 10.35%. The reactivity of the MgO binder was assessed using the acetic acid neutralization time test. No colour change was observed within the 4 min test period. Given that

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

neutralization times of approximately 20–25s have been associated with highly reactive MgO in the literature [42], the absence of neutralization after 4 min indicates that the MgO used in this study had comparatively low reactivity under the conditions of this test. The mixture abbreviations used in the study are CU and CC for cement-bonded ulexite and colemanite aggregates, respectively, and MU and MC for MgO-bonded ulexite and colemanite aggregates, respectively.

2.2. Production of Artificial Aggregates by Pelletization

Artificial aggregates were manufactured through a disc pelletization process, with each mixture produced as an individual batch. At the beginning of each production cycle, the dry constituents were placed in the pelletizer and blended for a few minutes to ensure adequate mixing. Water was subsequently applied gradually by spraying onto the rotating dry material to initiate agglomeration and pellet formation. During the initial 15 min of pelletization, the water dosage varied around between 13% and 18% by mass of the dry mixture (Figure 1), depending on the material type, resulting in the development of fresh, approximately spherical pellets. Once water addition was completed, the process was continued for a further 15 min without additional water to allow the pellets to grow and become more compact. The pelletizer disc was maintained at an inclination of 60° and operated at a rotational speed of 75 rpm throughout the entire process.

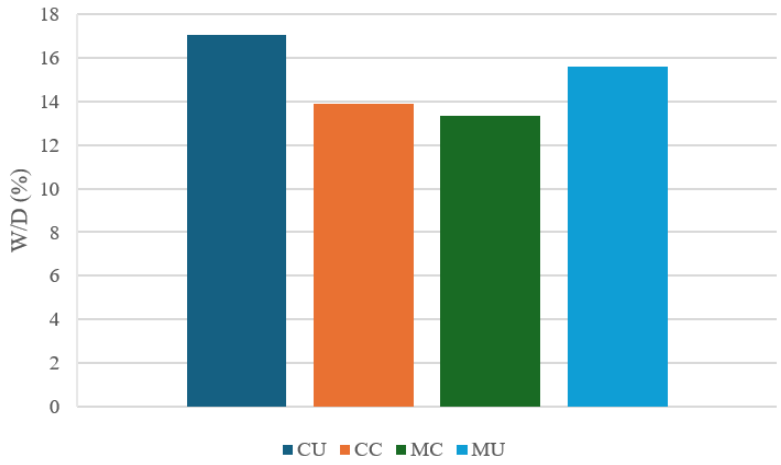


Figure 1. Average water-to-dry-material ratio (by mass) required for pellet formation of each aggregate mixture.

After pelletization, the produced aggregates were subjected to two different curing regimes for periods of 7, 14, and 28 days before testing. Ambient curing was carried out at 21 ± 3 °C and 60 ± 10% relative humidity, whereas accelerated carbonation curing was conducted at the same temperature and relative humidity under a CO_2 concentration of 10%. At the specified curing ages, the aggregates were evaluated for bulk density, water absorption, specific gravity, and crushing strength.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

2.3. Aggregate Characterization

The particle-size distribution of the artificial aggregates was determined by sieve analysis with reference to ASTM C136/C136M [43]. Compacted bulk unit weight was measured in accordance with ASTM C29/C29M [44], while SSD specific gravity and water absorption were determined with reference to ASTM C127 [45]. Single-particle crushing tests were performed by placing individual aggregate particles between two parallel loading plates and applying compressive load until failure. To determine the average single-particle crushing strength, at least 20 individual aggregate particles were tested for each mixture cured under ambient conditions, while at least 10 particles were tested for each mixture subjected to accelerated carbonation curing. The crushing strength of each particle was calculated from the failure load and the distance between the loading plates using equations reported in the literature [17, 46, 47]. In addition, the physical integrity of the aggregates following water exposure was examined to assess any evidence of dissolution or disintegration.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Particle Formation and Water Stability

The majority of the artificial aggregates were produced within the 4–16 mm particle size range and exhibited compact surfaces without visible cracking, suggesting effective pellet formation and densification under the applied pelletization conditions. However, their stability upon water exposure varied considerably with both the borate mineral and binder type. Among the cement-bonded aggregates, CU exhibited pronounced moisture sensitivity, with dissolution or disintegration occurring after 24h of water immersion. Although carbonation curing for 28 days improved its resistance to water exposure, partial dissolution and disintegration were still observed. In contrast, CC maintained its geometry and physical integrity more effectively during immersion, indicating substantially greater water resistance than CU. This difference can primarily be attributed to the lower water solubility of colemanite compared with ulexite. For the MgO-bonded aggregates, both MU and MC underwent dissolution or disintegration upon contact with water, regardless of the curing regime. These findings indicate that the water stability of the produced aggregates (CU, MU, MC), particularly those incorporating MgO as the binder, requires further improvement before their potential use as concrete aggregates.

3.2. Physical Properties of Boron Aggregates

In this study, physical properties were measured only for the ambient-cured aggregates. As shown in Figure 2, the bulk density of CU aggregates increased with curing age, from approximately 823 to 877 kg/m³ for the 8–16 mm fraction and from 852 to 880 kg/m³ for the 4–8 mm fraction between 7 and 28 days, with most of the increase occurring by 14 days. In contrast, CC aggregates exhibited consistently higher and relatively stable bulk densities, ranging from approximately 1071 to 1087 kg/m³ and from 1077 to 1100 kg/m³ for the 8–16 and 4–8 mm fractions, respectively. At 28 days, the bulk densities of CU were approximately 19–

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

20% lower than those of the corresponding CC fractions. The 4–8 mm fraction generally showed slightly higher values than the 8–16 mm fraction, which may be associated with more efficient packing of the smaller particles within the measurement container. The lower bulk density of CU may be related to the different characteristics of the two borate minerals and the higher water demand of the ulexite-based mixture during pelletization, which may have contributed to the development of a less dense pellet structure.

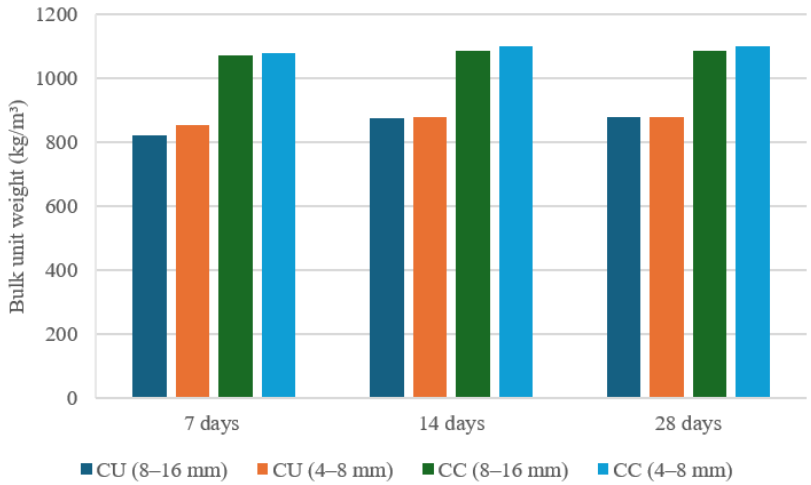


Figure 2. Compacted bulk unit weight of CU and CC aggregates at different particle fractions and curing ages.

As shown in Figure 3, the bulk unit weight of MC aggregates at 28 days was approximately 1060–1070 kg/m³, whereas substantially lower values of approximately 830–840 kg/m³ were obtained for MU. Only minor differences were observed between the 8–16 and 4–8 mm fractions within each aggregate type, suggesting a limited influence of particle fraction on bulk unit weight. Similar to the cement-bonded aggregates, the lower bulk unit weight of MU may be related to the different characteristics of the two borate minerals and the higher water demand of the ulexite-based mixture during pelletization (Figure 1), which may have contributed to the development of a less dense pellet structure.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

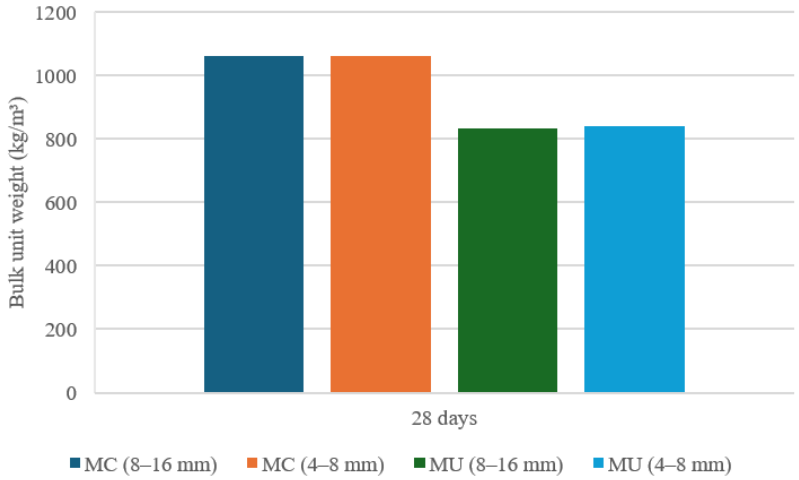


Figure 3. Compacted bulk unit weight of MU and MC aggregates at different particle fractions after 28 days of curing.

As shown in Figure 4, the SSD specific gravity of CC aggregates remained within a narrow range of approximately 2.02–2.05, with only minor variations across curing ages and particle fractions. Similarly, the water absorption values presented in Figure 5 remained relatively stable at approximately 13–14%, with no marked differences observed among curing ages or between the 8–16 and 4–8 mm fractions. These results suggest that neither curing age nor particle fraction markedly influenced the SSD specific gravity or water absorption of CC aggregates within the investigated ranges. Specific gravity and water absorption could not be determined for CU, MU, and MC because of their poor stability during water immersion.

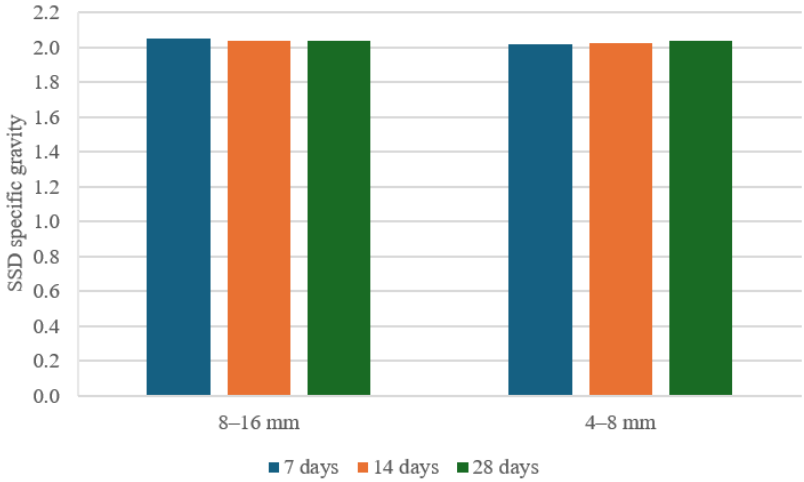


Figure 4. SSD specific gravity of CC aggregates at different particle fractions and curing ages.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

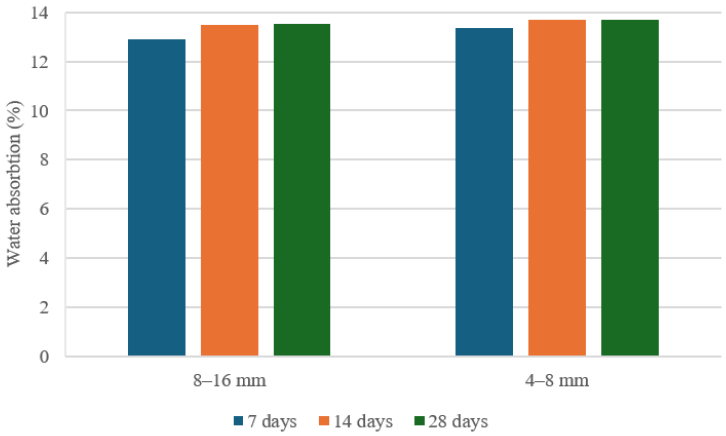


Figure 5. Water absorption of CC aggregates at different particle fractions and curing ages.

3.3. Single-Particle Crushing Strength

As shown in Figure 6, the mean single-particle crushing strength of the ambient-cured aggregates generally increased between 14 and 28 days, although the extent of strength development varied considerably among the mixtures. CC exhibited only a limited increase, from approximately 1.0 to 1.04 MPa, whereas CU increased more noticeably from 0.58 to 0.93 MPa. MC remained comparatively weak, with mean strengths of approximately 0.62 and 0.67 MPa at 14 and 28 days, respectively. In contrast, MU exhibited the highest crushing strength at both ages, increasing from approximately 1.59 to 2.15 MPa. The contrasting behaviour of MU and MC suggests that the strength development of the MgO-bound aggregates was influenced by the type of borate mineral, potentially through differences in the interaction between the mineral and binder and the resulting pellet structure. Notably, the higher bulk unit weight of MC did not translate into greater single-particle crushing strength, indicating that bulk unit weight alone does not govern the mechanical resistance of individual pellets.

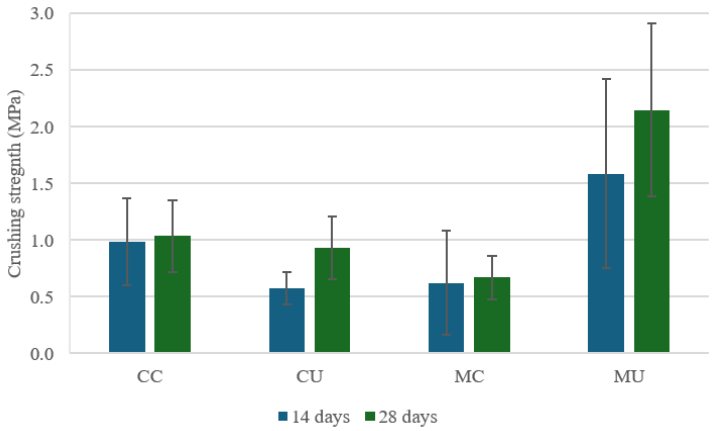


Figure 6. Mean single-particle crushing strength of ambient-cured artificial aggregate series (error bars: standard deviation).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

As shown in Figure 7, the mean single-particle crushing strength of the carbonation-cured aggregates generally increased with curing age, although the magnitude of the increase varied among the mixtures. CC and CU exhibited relatively similar strength development, reaching approximately 1.4–1.5 MPa at 28 days, while MC remained comparatively weaker at approximately 1.2 MPa. In contrast, MU exhibited the highest strength throughout the curing period, increasing from approximately 2.0 MPa at 7 days to 3.3 MPa at 14 days, followed by only a limited further increase to approximately 3.4 MPa at 28 days. This trend suggests that most of the strength development of carbonation-cured MU occurred within the first 14 days. The distinctly different responses of MU and MC may reflect differences in the interaction of the MgO binder with the two borate minerals under carbonation, although further microstructural evidence would be required to establish the underlying mechanism. For both curing regimes (Figures 6 and 7), the relatively large standard deviations, particularly for MU, indicate considerable particle-to-particle variability, which may reflect differences in particle geometry, internal porosity, degree of compaction, and local structural heterogeneity inherent to the pelletization process.

Comparison of Figures 6 and 7 shows that accelerated carbonation curing generally enhanced the single-particle crushing strength of all aggregate series relative to ambient curing at comparable ages, although the magnitude of improvement varied among the mixtures. At 28 days, carbonation increased the mean strength from approximately 1.04 to 1.46 MPa for CC, 0.93 to 1.44 MPa for CU, 0.67 to 1.22 MPa for MC, and 2.15 to 3.37 MPa for MU. The improvement was therefore observed for both cement- and MgO-bound aggregates, although the extent of the response varied considerably with aggregate composition. This strength enhancement may be associated with carbonation reactions and the formation of carbonate-containing solid phases, which could contribute to pore filling and densification of the pellet structure, thereby improving its resistance to crushing.

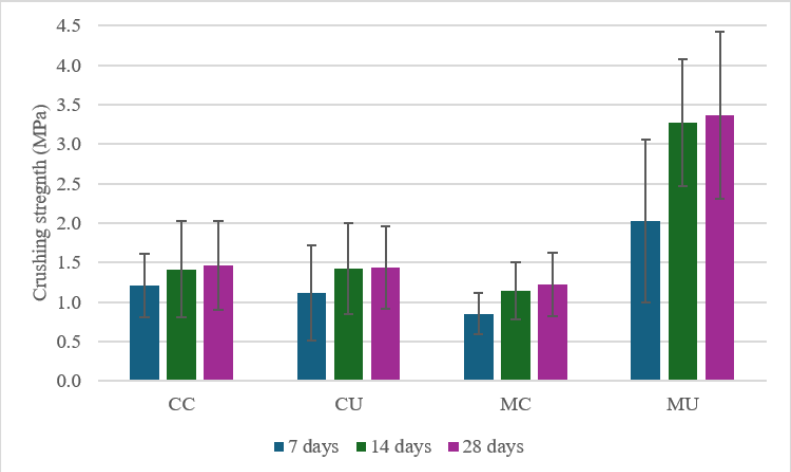


Figure 7. Mean single-particle crushing strength of carbonation-cured artificial aggregate series (error bars: standard deviation).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

4. CONCLUSIONS

Based on the experimental results obtained in this study, the following conclusions can be drawn:

- Colemanite- and ulexite-based artificial aggregates were successfully produced by cold-bonded disc pelletization using Portland-composite cement and highly calcined MgO as binders. Most of the produced aggregates were within the 4–16 mm particle size range and exhibited compact surfaces without visible cracking.
- The water demand during pelletization depended on both the borate mineral and binder type, with ulexite-based mixtures requiring more water than the corresponding colemanite-based mixtures. The ulexite-based aggregates also exhibited lower bulk unit weights than their colemanite-based counterparts for both binder systems.
- Water stability was strongly dependent on aggregate composition. Cement-bonded colemanite aggregates (CC) showed the greatest resistance to water exposure and retained their physical integrity during immersion, whereas CU remained water-sensitive and both MgO-bound series (MU and MC) underwent dissolution or disintegration regardless of the curing regime.
- Single-particle crushing strength varied considerably with mineral–binder combination. Under ambient curing, MU exhibited the highest strength, reaching approximately 2.15 MPa at 28 days, while carbonation curing increased its 28-day strength to approximately 3.37 MPa. In contrast, MC remained the weakest MgO-bound series, demonstrating the markedly different responses of colemanite- and ulexite-based aggregates to the same MgO binder.
- Accelerated carbonation curing generally enhanced the single-particle crushing strength of all aggregate series compared with ambient curing at comparable ages, although the magnitude of improvement depended on aggregate composition. Despite these mechanical improvements, the poor water stability of CU, MU, and MC indicates that further improvement is required before their potential use as concrete aggregates.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Research Fund of Yildiz Technical University, Istanbul, Türkiye. The authors would like to express their sincere gratitude to the Scientific Research Projects Coordination Unit for providing financial support for this project (Project No. FBA-2025-6777).

REFERENCES

[1] Jyosyula, S.K.R., Surana, S. and Raju, S., Role of lightweight materials of construction on carbon dioxide emission of a reinforced concrete building, Materials Today: Proceedings, 27, 984-990, 2020.

[2] Hong, J., Shen, G.Q., Feng, Y., Lau, W.S.T. and Mao, C., Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: A case study in China, Journal of Cleaner Production, 103, 249-259, 2015.

[3] Adesina, A., Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions, Environmental Challenges, 1, 100004, 2020.

[4] Srivastava, A. and Singh, S.K., Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review, Journal of Cleaner Production, 253, 119706, 2020.

[5] Arslan, H. and Baykal, G., Utilization of fly ash as engineering pellet aggregates, Environmental Geology, 50, 5, 761-770, 2006.

[6] Ma, S., Akca, A.H., Esposito, D. and Kawashima, S., Influence of aqueous carbonate species on hydration and carbonation of reactive MgO cement, Journal of CO2 Utilization, 41, 101260, 2020.

[7] Silva, G., Kim, S., Aguilar, R. and Nakamatsu, J., Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry, Sustainable Materials and Technologies, 23, e00132, 2020.

[8] Walczak, P., Szymański, P. and Rózycka, A., Autoclaved Aerated Concrete based on Fly Ash in Density 350 kg/m³ as an Environmentally Friendly Material for Energy-Efficient Constructions, Procedia Engineering, 122, 39-46, 2015.

[9] Botha, A. and Strydom, C.A., Preparation of a magnesium hydroxy carbonate from magnesium hydroxide, Hydrometallurgy, 62, 3, 175-183, 2001.

[10] Terzić, A., Pezo, L., Mitić, V. and Radojević, Z., Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances, Ceramics International, 41, 2, 2714-2726, 2015.

[11] Baykal, G. and Döven, A.G., Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results, Resources, Conservation and Recycling, 30, 1, 59-77, 2000.

[12] Manikandan, R. and Ramamurthy, K., Influence of fineness of fly ash on the aggregate pelletization process, Cement and Concrete Composites, 29, 6, 456-464, 2007.

[13] Harikrishnan, K.I. and Ramamurthy, K., Influence of pelletization process on the properties of fly ash aggregates, Waste Management, 26, 8, 846-852, 2006.

[14] Sahoo, S., Selvaraju, A.K. and Suriya Prakash, S., Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres, Cement and Concrete Composites, 113, 103712, 2020.

[15] Nadesan, M.S. and Dinakar, P., Structural concrete using sintered flyash lightweight aggregate: A review, Construction and Building Materials, 154, 928-944, 2017.

[16] Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Li, S. and Fan, Y., Utilization of coal fly and bottom ash pellet for phosphorus adsorption: Sustainable management and evaluation, Resources, Conservation and Recycling, 149, 372-380, 2019.

[17] Kockal, N.U. and Ozturan, T., Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments, Cement and Concrete Composites, 33, 1, 61-67, 2011.

[18] Kockal, N.U. and Ozturan, T., Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes, Journal of Hazardous Materials, 179, 1-3, 954-965, 2010.

[19] Hao, D.L.C., Razak, R.A., Kheimi, M., Yahya, Z., Abdullah, M.M.A.B., Nergis, D.D.B., Fansuri, H., Ediati, R., Mohamed, R. and Abdullah, A., Artificial lightweight aggregates made from pozzolanic material: A review on the method, physical and mechanical properties, thermal and microstructure, Materials, 15, 11, 3929, 2022.

[20] Özkan, H., Kabay, N. and Miyan, N., Properties of cold-bonded and sintered aggregate using washing aggregate sludge and their incorporation in concrete: A promising material, Sustainability, 14, 7, 4205, 2022.

[21] Bütüner, R., Emet bölgesi düşük tenörlü kolemanit stoklarının değerlendirilebilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2011.

[22] https://www.etimaden.gov.tr

(Accessed: 03.03.2022)

[23] Özdemir, M. and Öztürk, N.U., Utilization of clay wastes containing boron as cement additives, Cement and Concrete Research, 33, 10, 1659-1661, 2003.

[24] https://www.turkcimento.org.tr/

(Accessed: 03.03.2022)

[25] Kavas, K. and Emrullahoğlu, Ö.F., Seydişehir kırmızı çamuru ve Kırka bor atıklarının endüstriyel hammadde olarak kullanımı, I. Batı Anadolu Hammadde Kaynakları Sempozyumu, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 216-225, İzmir, 1999.

[26] Kavas, T., Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick, Building and Environment, 41, 12, 1779-1783, 2006.

[27] Kilicarslan, A., Kurttepeli, Y. and Saridede, M.N., Using of Boron Wastes in Red Brick Production, Advanced Materials Research, 699, 223-227, 2013.

[28] Batar, T., Köksal, N.S. and Yersel, E., Atık Bor, Atık Kâğıt ve Perlit Katkılı Sıva Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Ekoloji Dergisi, 18, 72, 45-53, 2009.

[29] Kavas, T., Christogerou, A., Pontikes, Y. and Angelopoulos, G.N., Valorisation of different types of boron-containing wastes for the production of lightweight aggregates, Journal of Hazardous Materials, 185, 2-3, 1381-1389, 2011.

[30] Akyıldız, A., Beton üretiminde bor atıklarının puzzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye, 2012.

[31] Eyyüboğlu, S., Kolemanit konsantratör atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2013.

[32] Murathan, A., Asan, A. and Abdulkarem, T.A., Çevresel atıkların yapı malzemesinde değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28, 2, 409-416, 2013.

[33] Demir, D. and Keleş, G., Radiation transmission of concrete including boron waste for 59.54 and 80.99 keV gamma rays, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 245, 2, 501-504, 2006.

[34] Binici, H., Aksogan, O., Sevinc, A.H. and Kucukonder, A., Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with colemanite, barite, ground basaltic pumice and ground blast furnace slag, Construction and Building Materials, 50, 177-183, 2014.

[35] Sağlam, S.S., Özer, N. and Özgünler, S.A., Investigation of the effect of ground colemanite additive on hydraulic lime-based mortars, Journal of Architectural Sciences and Applications, 10, 1, 116-125, 2025.

[36] Kütük Sert, T., Stability analyses of submicron-boron mineral prepared by mechanical milling process in concrete roads, Construction and Building Materials, 121, 255-264, 2016.

[37] Davraz, M., The effects of boron compounds on the properties of cementitious composites, Science and Engineering of Composite Materials, 17, 1, 1-18, 2010.

[38] Glinicki, M.A., Antolik, A. and Gawlicki, M., Evaluation of compatibility of neutron-shielding boron aggregates with Portland cement in mortar, Construction and Building Materials, 164, 731-738, 2018.

[39] Antolik, A., Glinicki, M.A. and Gawlicki, M., Effect of boron-containing aggregates on setting and hardening of Portland cement mortars, MATEC Web of Conferences, 163, 04003, 2018.

[40] Wang, G., Ye, Z., Sun, T., Mo, Z., Wang, Z., Ouyang, G., He, J. and Deng, Y., Comparison of curing conditions on physical properties, mechanical strength development, and pore structures of phosphogypsum-based cold-bonded aggregates, Materials, 17, 20, 4971, 2024.

[41] Turkish Standard: TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri (Cement-Part 1: Composition. Specification and Conformity Criteria for Common Cements), Ankara, 2012.

[42] Aytimur, N., Ulukaya, S. and Akca, A.H., The Effects of Carbonation and Elevated Temperatures on the Properties of Magnesium-Based Mortar. Appl. Sci., *15*, 9264, 2025.

[43] ASTM C136/C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.

[44] ASTM C29/C29M-23, Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2023.

[45] ASTM C127-24, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024.

[46] Yıldırım, H. and Özturan, T., Impact resistance of concrete produced with plain and reinforced cold-bonded fly ash aggregates. Journal of Building Engineering, 42, 102875, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102875

[47] Cheeseman, C.R., Makinde, A. and Bethanis, S., Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash, Resources, Conservation and Recycling, 43, 2, 147-162, 2005.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

INFLUENCE OF INFILL TYPE ON THE CHARPY IMPACT BEHAVIOUR OF FFF-PRINTED CARBON FIBRE REINFORCED PLA COMPONENTS

Assist. Prof. Dr. Mehmet Çağatay Akbolat

Gaziantep University

mcakbolat@gantep.edu.tr - 0000-0001-7579-6478

ABSTRACT

The present study investigates the influence of infill pattern on the Charpy impact behaviour of fused filament fabrication (FFF)-printed carbon fibre-reinforced polylactic acid (PLA-CF) components. Specimens with dimensions of 80 mm × 10 mm × 4 mm were manufactured using identical processing parameters and a constant 100% infill ratio, differing only in their internal infill geometry. Four infill patterns, namely rectilinear, concentric, Hilbert curve, and Archimedean chords, were evaluated. Charpy impact tests were conducted in accordance with the ISO 179 standard using unnotched specimens. The results demonstrated a strong dependence of impact performance on infill architecture. Among the investigated configurations, the concentric pattern exhibited the highest impact toughness with an average value of 49.69 ± 2.13 kJ/m², followed by the rectilinear pattern with 30.83 ± 0.72 kJ/m². In contrast, the Hilbert curve and Archimedean chords patterns yielded considerably lower impact toughness values of 14.75 ± 1.63 kJ/m² and 11.69 ± 1.34 kJ/m², respectively. The highest performance of the concentric pattern is attributed to its continuous load-transfer paths and enhanced energy absorption capability, whereas the more complex infill architectures, *i.e.* Hilbert curves and Archimedean chords, promote stress concentration and facilitate crack propagation. The findings highlight the critical role of infill geometry in determining the impact resistance of FFF-printed carbon fibre-reinforced PLA components and provide insight for the design of additively manufactured structures subjected to impact loading.

Keywords: Fused filament fabrication, polylactic acid, carbon fibre reinforcement, Charpy impact test, infill types.

1. INTRODUCTION

Fused filament fabrication (FFF) is a widely adopted additive manufacturing technique in aerospace, medical, and electronics sectors due to its cost efficiency and capability to fabricate geometrically complex parts. The method provides advantages such as rapid production, suitability for functional prototyping, reduced material waste, and compatibility with various thermoplastic polymers [1–3]. Despite these benefits, its application in load-bearing structural components is still limited and needs to be investigated. Accordingly, a detailed understanding of the mechanical behaviour of FFF-printed parts under different loading scenarios is required to broaden their structural use.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Recent studies have extensively examined the mechanical performance of FFF-manufactured components and the parameters affecting their behaviour. Among these parameters, process settings are known to play a decisive role in determining final mechanical properties. For instance, layer thickness influences void formation and distribution within the printed structure, which can significantly reduce mechanical integrity when not optimised. Nozzle temperature directly affects polymer diffusion and interlayer bonding quality, while printing speed governs interlayer adhesion quality as well as molecular alignment during deposition. Beyond processing conditions, structural design parameters such as infill ratio, infill pattern, and raster angle are also key contributors to mechanical response [4–7].

The infill pattern has therefore gained significant attention because it determines the internal structural architecture of printed parts. Variations in infill geometry lead to different load transfer mechanisms and stress distributions, which in turn affect stiffness, impact resistance, and failure behaviour. Recently, many researchers have investigated how different infill designs influence the tensile, compressive, flexural, and impact properties of FFF-fabricated components. However, the behaviour of more complex infill architectures is still not fully understood, particularly under impact loading conditions.

Despite the extensive body of research on tensile and flexural properties, comparatively little attention has been paid to the impact behaviour of FFF-printed components. Understanding impact performance is particularly important for applications involving dynamic or sudden loading conditions. Therefore, the present study investigates the Charpy impact response of FFF-printed PLA specimens fabricated with different infill patterns under a constant 100% infill ratio. Specifically, the effects of rectilinear, concentric, Hilbert curve, and Archimedean chords infill geometries on impact performance are examined. To this end, PLA specimens with dimensions of 80 mm × 10 mm × 4 mm were fabricated using the FFF process with identical processing parameters, differing only in their infill pattern. Charpy impact tests are conducted in accordance with the ISO 179 standard [8]. The experimental results and corresponding discussion are presented in the following sections.

2. MATERIALS, MANUFACTURING, AND METHODS

Carbon fibre-reinforced PLA filaments are supplied by Filameon (Kayseri, Türkiye). The specimens, with dimensions of 80 mm × 10 mm × 4 mm, are fabricated using an FFF 3D printer equipped with a 0.8 mm nozzle. The printing process is carried out at a nozzle temperature of 260 °C and a bed temperature of 60 °C. All specimens are produced with a 100% infill ratio using a rectilinear infill pattern. Charpy impact tests are performed in accordance with the ISO 179 standard [8] using unnotched specimens. The test setup employed a support span (anvil opening) of 55 mm. All specimens are fabricated with a 0° raster orientation (filament deposition parallel to the specimen length) and using four infill patterns: rectilinear, concentric, Hilbert curve, and Archimedean chords.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

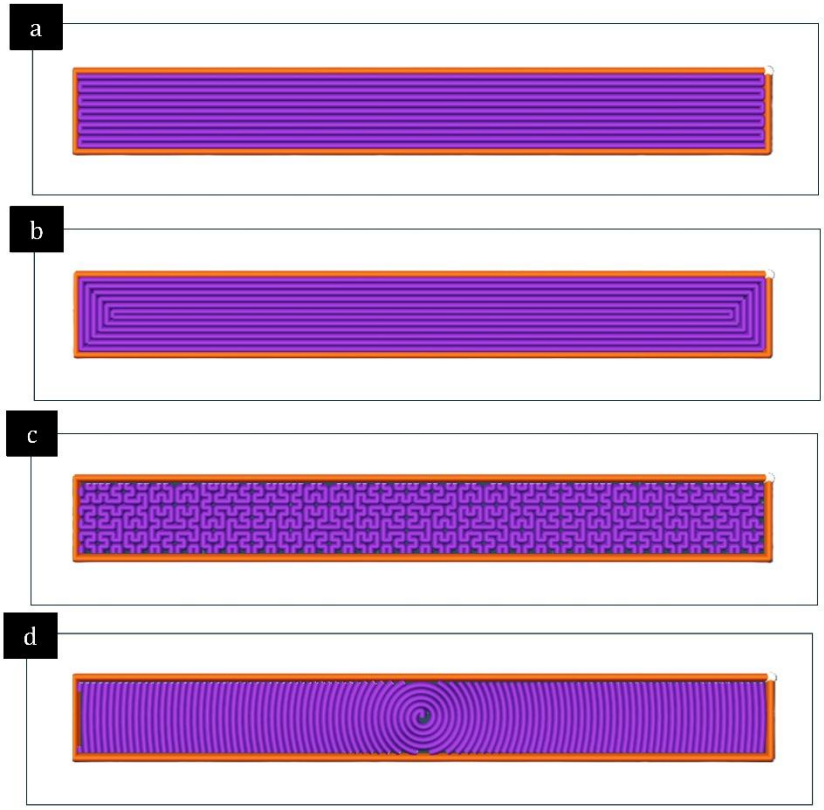


Figure 1| Representative specimens manufactured from carbon fibre-reinforced PLA using different infill patterns: (a) rectilinear, (b) concentric, (c) Hilbert curve, and (d) Archimedean chords.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The measured impact toughness values of the carbon fibre-reinforced PLA specimens manufactured with different infill patterns are presented in Figure 2. A pronounced effect of infill geometry on impact performance is observed. Among the investigated configurations, the concentric infill pattern exhibited the highest impact toughness, reaching 49.69 ± 2.13 kJ/m². The rectilinear pattern shows the second-highest impact toughness with a value of 30.83 ± 0.72 kJ/m². In contrast, the Hilbert curve and Archimedean chords patterns exhibit substantially lower impact toughness values of 14.75 ± 1.63 kJ/m² and 11.69 ± 1.34 kJ/m², respectively. The impact toughness of the concentric specimens is approximately 61% higher than that of the rectilinear specimens and more than three times greater than that of the Hilbert curve and Archimedean chords specimens. These results indicate that the internal load-transfer mechanism created by the infill architecture plays a dominant role in determining the impact response of FFF-printed components. Overall, the results demonstrate that infill architecture has a substantial influence on the Charpy impact behaviour of FFF-printed carbon fibre-reinforced PLA components. Infill patterns that provide continuous load paths and minimise stress concentration regions are more effective in enhancing impact resistance under dynamic loading conditions.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

The fractured specimens after impact loading are presented in Figure 3. Distinct failure characteristics are observed depending on the infill architecture. The concentric specimens (Figure 3a) exhibited more extensive deformation and a larger fractured region, indicating a higher capacity for energy absorption before final failure. This behaviour is consistent with the better impact toughness values measured for this configuration. The continuous filament paths within the concentric structure appear to delay crack propagation and promote the progressive development of damage during impact loading. The rectilinear pattern (Figure 3b) also demonstrated relatively high impact toughness due to its regular and aligned filament arrangement, which facilitates load transfer along the specimen length. However, the presence of intersecting filament paths and directional anisotropy limits its energy absorption capability compared with the concentric configuration. In contrast, specimens manufactured with the Hilbert curve (Figure 3c) and Archimedean chords (Figure 3d) patterns showed more localised fracture regions and relatively brittle failure characteristics. The complex internal geometry of these patterns creates multiple stress concentration sites, which facilitate crack initiation and rapid crack propagation through the structure. As a result, a lower amount of impact energy is absorbed prior to failure. The rectilinear specimens exhibited an intermediate fracture behaviour, showing a more distributed damage pattern than the Hilbert curve and Archimedean chords specimens, but less extensive deformation than the concentric specimens. These observations support the impact toughness results and further demonstrate that infill geometry significantly influences both the energy absorption capability and fracture mechanism of FFF-printed carbon fibre-reinforced PLA components.

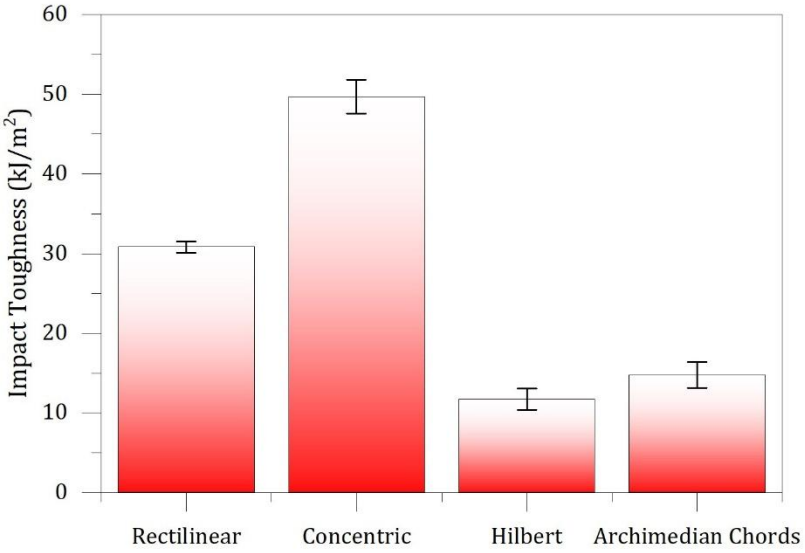


Figure 2. Charpy impact toughness of FFF-printed carbon fibre-reinforced PLA specimens manufactured with different infill patterns.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

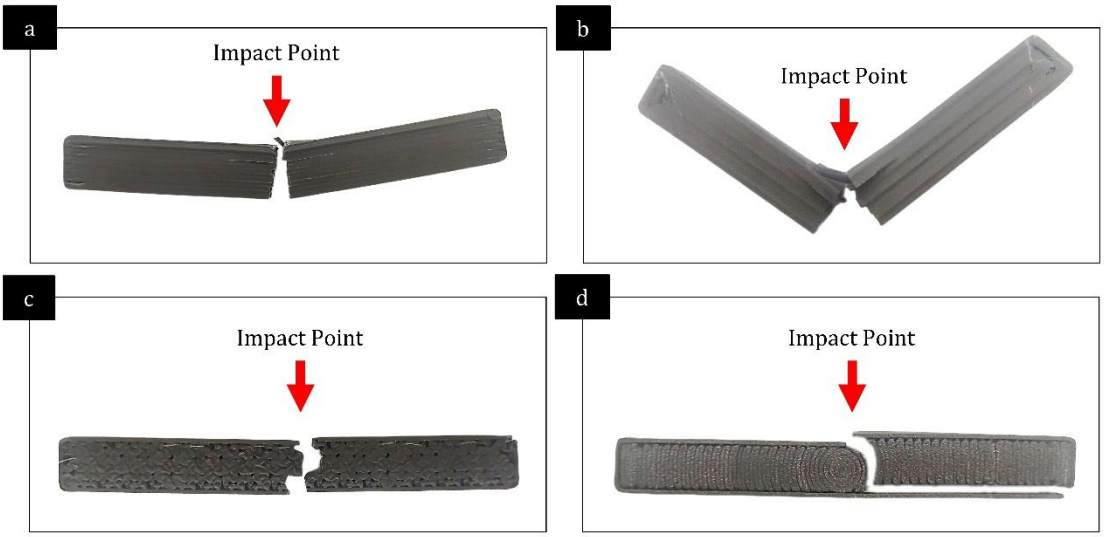


Figure 3. Digital images of the fractured carbon fibre-reinforced PLA specimens after Charpy impact testing: (a) rectilinear, (b) concentric, (c) Hilbert curve, and (d) Archimedean chords infill patterns.

4. CONCLUSIONS

Based on the experimental investigation of the Charpy impact behaviour of FFF-printed carbon fibre-reinforced PLA specimens with different infill patterns, the following conclusions can be drawn:

- Infill geometry significantly influences the impact toughness of FFF-printed carbon fibre-reinforced PLA components, even when the infill ratio and processing parameters are kept constant.
- The concentric infill pattern exhibited the highest impact toughness, achieving an average value of 49.69 ± 2.13 kJ/m², indicating the highest energy absorption capability under impact loading.
- The rectilinear pattern provided intermediate impact performance with an average impact toughness of 30.83 ± 0.72 kJ/m².
- The Hilbert curve and Archimedean chords patterns resulted in considerably lower impact toughness values of 14.75 ± 1.63 kJ/m² and 11.69 ± 1.34 kJ/m², respectively.
- The enhanced performance of the concentric pattern is attributed to its continuous load-transfer paths and reduced stress concentration regions, which improve energy dissipation during fracture.
- Complex infill architectures such as Hilbert curve and Archimedean chords create multiple directional changes and localised stress concentration sites that facilitate crack initiation and propagation, thereby reducing impact resistance.

Overall, the results indicate that selecting an appropriate infill geometry is a highly effective strategy for improving the impact performance of FFF-printed carbon fibre-reinforced PLA

components. Among the investigated patterns, the concentric infill configuration appears to be the most suitable for applications requiring enhanced resistance to impact loading.

REFERENCES

[1] Khosravani MR, Berto F, Ayatollahi MR, Reinicke T. Fracture behavior of additively manufactured components: A review. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2020;109:102763. https://doi.org/10.1016/J.TAFMEC.2020.102763.

[2] Markandan K, Lai CQ. Fabrication, properties and applications of polymer composites additively manufactured with filler alignment control: A review. Compos B Eng 2023;256:110661. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2023.110661.

[3] Sharafi S, Santare MH, Gerdes J, Advani SG. A review of factors that influence the fracture toughness of extrusion-based additively manufactured polymer and polymer composites. Addit Manuf 2021;38:101830. https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101830.

[4] Agrawal AP, Kumar V, Kumar J, Paramasivam P, Dhanasekaran S, Prasad L. An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication. Heliyon 2023;9. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16531.

[5] ELDeeb IS, Esmael E, Ebied S, Diab MR, Dekis M, Petrov MA, et al. Optimization of Nozzle Diameter and Printing Speed for Enhanced Tensile Performance of FFF 3D-Printed ABS and PLA. Journal of Manufacturing and Materials Processing 2025, Vol 9, 2025;9. https://doi.org/10.3390/jmmp9070221.

[6] Chicos LA, Pop MA, Zaharia SM, Lancea C, Buican GR, Pascariu IS, et al. Fused Filament Fabrication of Short Glass Fiber-Reinforced Polylactic Acid Composites: Infill Density Influence on Mechanical and Thermal Properties. Polymers 2022, Vol 14, Page 4988 2022;14:4988. https://doi.org/10.3390/POLYM14224988.

[7] Sanford LT, Jaafar IH, Seibi A, Gohn A. The effect of infill angle, build orientation, and void fraction on the tensile strength and fracture of 3D printed ASA via fused filament fabrication. Manuf Lett 2022;33:569–73. https://doi.org/10.1016/J.MFGLET.2022.07.070.

[8] ISO 179 - Plastics — Determination of Charpy impact properties.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

MİKRON BOYUTLU CAM ELYAF TOZUNUN ODUN-PLASTİK KOMPOZİTLERİN BAZI TEKNOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ferhat ÖZ
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği Bölümü,
ozferhat33@hotmail.com

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ACAR
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği Bölümü,
macar@mu.edu.tr - ORCID ID: 0000-0002-6258-2689

ÖZET

Odun-plastik kompozitler (OPK), dış ortam koşullarında nem, sıcaklık ve UV gibi çevresel etkenlere maruz kaldığında fiziksel ve mekanik direnç kayıpları yaşayabilmektedir. Sürekli veya dokuma sentetik lifler bu performansı artırsa da hammadde ve işleme maliyetlerini belirgin şekilde yükseltmektedir. Bu çalışmada, yüksek performans gerektiren kullanım alanları için düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) matrisli OPK'ların bazı teknolojik özelliklerinin, maliyet-etkin bir ikincil dolgu maddesi olan mikron boyutlu cam elyaf tozu (CET) ilavesiyle iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, matris içerisindeki %1 oranındaki uyumlaştırıcı ajan (MAPE) ve %49 LDPE oranı sabit tutulurken, %50'lik dolgu maddesi kısmında odun ununa ikame olarak 0,25 mikron boyutunda cam elyaf tozu farklı oranlarda (%0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30) kullanılmıştır. Düz presleme yöntemiyle 170 °C sıcaklık ve 24-26 kg/cm² basınç altında 15 dakika preslenerek üretilen hibrit kompozit panellerin fiziksel (yoğunluk, su alma, kalınlığına şişme), mekanik (statik eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, çekme direnci, vida tutma direnci) ve termal (TGA) özellikleri standartlara uygun olarak karakterize edilmiştir. Elde edilen veriler varyans analizi (ANOVA) ve Tukey çoklu karşılaştırma testi ($p < 0,05$) ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, non-higroskopik cam elyaf tozu oranının artmasıyla panel yoğunluğu 1,018 g/cm³'ten 1,203 g/cm³'e yükselmiştir. 28 günlük suda bekletme testleri sonucunda, Kontrol grubuna kıyasla %30 CET ilaveli kompozitlerde su alma oranı %16,20'den %4,87'ye (%69,9

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

azalma), kalınlığına şişme oranı ise %8,41'den %3,08'e (%63,4 azalma) gerileyerek istatistiksel olarak anlamlı seviyede iyileşme göstermiştir. Mekanik testlerde en yüksek eğilme direnci (28,84 MPa), eğilmede elastikiyet modülü (1634,29 MPa) ve vida tutma direnci (7,14 MPa) %5 CET takviyeli grupta elde edilerek Kontrol grubuna kıyasla sırasıyla %30,2, %5,3 ve %17,4 oranında istatistiksel olarak anlamlı artışlar sağlanmıştır. Buna karşın, partikül yapılı cam elyaf tozu ilavesinin tek eksenli çekme direncini olumsuz etkilediği, Kontrol grubunda 12,80 MPa olan çekme direncinin ilave oranına bağlı olarak 7,06 MPa'ya kadar gerilediği tespit edilmiştir. TGA analizlerinde ise CET oranının artmasıyla lignoselüloz bileşenlerinin termal bozunma başlangıç sıcaklığının 202,80 °C'den 232,17 °C'ye yükselerek bozunmanın geciktiği ve 600 °C sonundaki termal kalıntı miktarının %8,59'dan %30,65'e çıktığı belirlenmiştir. Sonuç olarak; yüksek mekanik performans ve vida tutma direnci gerektiren uygulamalarda %5, yüksek nem direnci ve boyut stabilitesi aranan dış ortam şartlarında ise %10–15'e kadar cam elyaf tozu ikamesinin, OPK üretiminde maliyet-etkin alternatif bir hammadde/dolgu malzemesi olabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Odun-Plastik Kompozitler, Cam Elyaf Toz, Düşük Yoğunluklu Polietilen, Su Alma ve Şişme, Mekanik Direnç.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

FORDİZM BAĞLAMINDA KENTSEL PEYZAJIN BİÇİMLENİŞİ: ÜRETİM REJİMİNDEN MEKÂNSAL SÜREKLİLİKLERE

YL. Öğr. Aslıhan UYGUN
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,
imasliuygun@gmail.com - 0009-0002-0193-4481
Doç. Dr. Elif SAĞLIK
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,
elifsaglik@comu.edu.tr - 0000-0002-5230-3869

ÖZET

Fordizm, 20. yüzyıl boyunca sanayi üretiminin temel örgütlenme modeli olarak ekonomik yapıları olduğu kadar kentlerin mekânsal gelişimini de derinden etkilemiştir. Standartlaşma, seri üretim ve katı işbölümüne dayanan bu üretim rejimi, yalnızca fabrika içi süreçleri değil, kentlerin planlanma biçimini, ulaşım sistemlerini ve gündelik yaşamın örgütlenmesini de şekillendirmiştir. Bu çalışma, Fordist üretim rejiminin kent mekânı ve kentsel peyzaj üzerindeki etkilerini tarihsel ve kuramsal bir çerçevede incelemeyi amaçlamaktadır.Çalışmada Fordizmin ortaya çıkışı, temel üretim ilkeleri ve ekonomik-toplumsal yapısı ele alınmış; sanayi alanlarının dağılımı, işçi yerleşimleri, ulaşım altyapıları ve fonksiyonel ayrışmaya dayalı planlama anlayışının kentlerin biçimlenmesindeki rolü değerlendirilmiştir. Fordist üretim modeli, sanayi, konut ve ulaşım işlevlerini birbirinden ayıran mekânsal bir düzen oluşturmuş; otomobil odaklı ulaşım sistemlerinin yaygınlaşmasıyla kentsel yayılmayı hızlandırmıştır. Bu süreç, kentlerde parçalı mekânsal yapılar ve işlevsel ayrışmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Araştırma ayrıca Fordist üretim rejiminin oluşturduğu endüstriyel peyzajı inceleyerek fabrika alanları, organize sanayi bölgeleri ve altyapı sistemlerinin günümüz kentlerinde bıraktığı fiziksel ve morfolojik izleri ortaya koymaktadır. Fordizmin ekonomik ve toplumsal açıdan gerilemesine rağmen, bu dönemde şekillenen mekânsal yapıların günümüzde de varlığını sürdürdüğü görülmektedir. Sonuç olarak çalışma, Fordizmin yalnızca geçmişe ait bir üretim modeli olmadığını, günümüz kentlerinin mekânsal organizasyonunu ve kentsel dönüşüm süreçlerini anlamada önemli bir tarihsel referans oluşturduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fordizm, Kentsel Mekân, Endüstriyel Peyzaj, Kent Planlama, Sanayi Alanları, Kentsel Dönüşüm.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. GİRİŞ

20.yüzyıl boyunca sanayi üretiminde egemen olan Fordist üretim rejimi, yalnızca ekonomik süreçleri değil, kentlerin mekânsal örgütlenmesini, planlama yaklaşımlarını ve gündelik yaşam pratiklerini de belirleyici biçimde dönüştürmüştür. Seri üretim, standartlaşma ve katı işbölümüne dayalı bu sistem, modern kentin biçimlenmesinde temel bir referans çerçevesi oluşturmuş; sanayi alanları, konut bölgeleri ve ulaşım altyapısı Fordist üretim mantığı doğrultusunda yeniden kurgulanmıştır (Türk, 2015; Karakurt, 2006).

Fordizm, çoğu zaman fabrika içi bir üretim modeli olarak ele alınsa da, gerçekte kent ölçeğinde bütüncül bir mekânsal düzenleyici rejim olarak değerlendirilmelidir. Konut, çalışma ve tüketim alanlarının birbirinden ayrılması; ulaşım altyapısının bu ayrışmayı destekleyecek biçimde planlanması ve otomobil odaklı ulaşım sistemlerinin yaygınlaşması, Fordist kentleşmenin ayırt edici özellikleri arasında yer almaktadır. Bu mekânsal kurgu, kentlerin yatayda genişlemesine, kentsel yayılmanın artmasına ve kamusal mekânın parçalanmasına yol açmış; modern planlama anlayışı bu sürecin kurumsal zemini hâline gelmiştir (Uğurlar, 2019; Kunst, 2016).

1970'li yıllardan itibaren Fordist üretim rejiminin ekonomik, çevresel ve toplumsal sınırları daha görünür hâle gelmiş; sanayisizleşme ve esnek üretim biçimleri literatürde yoğun biçimde tartışılmaya başlanmıştır. Ancak bu dönüşüm, Fordist dönemde inşa edilen mekânsal yapıları ortadan kaldırmaktan ziyade, bu yapıların yeni işlevler kazanarak varlığını sürdürmesine neden olmuştur. Günümüz kentlerinde işlevini yitirmiş sanayi alanları, otomobil odaklı ulaşım altyapıları ve modern planlama anlayışının ürettiği morfolojik yapı, Fordist dönemin mekânsal mirasının hâlen okunabilir olduğunu göstermektedir (Rowthorn & Ramaswamy, 1999; Rodrik, 2016).

Bu bağlamda Fordizm, yalnızca tarihsel bir üretim modeli olarak değil, kent mekânını uzun erimli biçimde şekillendiren yapısal bir düzenleyici olarak ele alınmalıdır. Literatürde Fordizm sıklıkla ekonomik ve endüstriyel bir model olarak tartışılsa da, kentsel mekân üzerindeki kalıcı etkilerinin çoğu zaman ikincil düzeyde ele alındığı görülmektedir (Peaucelle, 2000). Bu çalışma, Fordist üretim rejimini kent, sanayi ve mekân ilişkileri bağlamında bütüncül bir çerçevede ele alarak, Fordist dönemde şekillenen mekânsal örgütlenmenin günümüz kentlerindeki sürekliliğini tarihsel ve kuramsal bir perspektifle tartışmayı amaçlamaktadır.

Bu yapısal etki, yalnızca kentsel form ve işlev dağılımı üzerinden değil, kentsel peyzajın biçimlenişi üzerinden de okunmalıdır. Fordist üretim anlayışı; sanayi alanları, ulaşım altyapıları ve açık alan düzenleri aracılığıyla özgün bir peyzaj üretmiş; bu peyzaj günümüz kentlerinde dönüştürülmesi gereken endüstriyel boşluklar, altyapı artıkları ve ekolojik kopukluklar

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

biçiminde varlığını sürdürmüştür. Bu çalışma, Fordist üretim rejiminin peyzaj tasarımı açısından okunmasını, kentsel açık alanların tarihsel arka planını anlamak açısından önemli bir analitik araç olarak değerlendirmektedir.

2. FORDİZMİN ORTAYA ÇIKIŞI

2.1. Tarihsel Arka Plan: Sanayi Devrimi'nden 20. Yüzyıla

Fordist üretim rejiminin ortaya çıkışı, Sanayi Devrimi ile başlayan uzun erimli bir dönüşüm sürecinin sonucu olarak değerlendirilmelidir. 18. yüzyılın sonlarından itibaren mekanizasyonun artması, üretimin atölye ölçeğinden fabrika ölçeğine taşınmasına yol açmış; bu süreç emek örgütlenmesinde, üretim ilişkilerinde ve mekânsal yapılanmada köklü değişimlere neden olmuştur. Buhar gücüne dayalı üretim sistemleri, zamanla yerini elektrik enerjisiyle çalışan makinelere bırakmış; üretim süreçleri daha büyük ölçekli, daha yoğun ve daha merkezi yapılara dönüşmüştür (Türk, 2015).

19.yüzyıl boyunca sanayileşme, kentlerin ekonomik ve demografik yapısını belirleyen temel unsur hâline gelmiş; fabrikalar kentsel gelişmenin çekirdeğini oluşturmuştur. Bu dönemde üretimin artan ölçeği, işgücünün disipline edilmesini ve üretim süreçlerinin rasyonelleştirilmesini zorunlu kılmıştır. Taylorizm ve Fayolizm gibi erken dönem yönetim yaklaşımları, üretimin bilimsel olarak düzenlenmesi, iş süreçlerinin parçalanması ve hiyerarşik denetimin güçlendirilmesi yoluyla modern sanayi üretiminin kurumsal altyapısını hazırlamıştır (Littler, 1978; Berber, 2016).

20.yüzyılın başına gelindiğinde, artan kent nüfusları, genişleyen pazarlar ve teknolojik gelişmeler, daha yüksek verimlilik sağlayan yeni bir üretim rejiminin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Fordizm, bu tarihsel bağlam içinde, sanayi kapitalizminin olgunlaşma aşamasında ortaya çıkan ve üretimi kitleselleştiren bir model olarak şekillenmiştir.

2.2. Henry Ford ve Seri Üretim Modeli

Fordist üretim rejimi, adını Henry Ford'un otomotiv sanayisinde geliştirdiği seri üretim modelinden almaktadır. Ford'un 1910'lu yıllarda uygulamaya koyduğu hareketli montaj hattı sistemi, üretim sürecini radikal biçimde dönüştürmüş; standartlaştırılmış ürünlerin çok kısa sürede ve düşük maliyetle üretilmesini mümkün kılmıştır. Bu sistem, üretim sürecini küçük, tekrar eden iş adımlarına bölerek emek sürecini yeniden tanımlamış ve üretkenliği benzeri görülmemiş ölçüde artırmıştır.

Henry Ford'un modeli, yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda üretim ve tüketim arasındaki ilişkiyi yeniden kurgulayan bütüncül bir sistemdir. Yüksek ücret politikası, işçilerin aynı zamanda üretilen malların tüketicisi hâline gelmesini hedeflemiş; bu durum kitle üretimi

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ile kitle tüketimi arasında doğrudan bir bağ kurulmasına olanak tanımıştır. Böylece Fordizm, üretim süreçleriyle sınırlı kalmayan, toplumsal ve ekonomik yaşamın bütününe yayılan bir düzenleyici rejim olarak ortaya çıkmıştır (Peaucelle, 2000).

Ford'un geliştirdiği seri üretim modeli, kısa sürede otomotiv sektörünün ötesine geçerek farklı sanayi kollarında da benimsenmiş; Fordist üretim ilkeleri, 20. yüzyıl boyunca sanayileşmiş ülkelerde baskın üretim biçimi hâline gelmiştir. Bu model, üretim mekânlarının ölçeğini büyütmüş, fabrika sistemini merkezîleştirmiş ve sanayi faaliyetlerinin kent mekânındaki ağırlığını artırmıştır.

2.3. Fordizmin Ekonomik ve Toplumsal Temelleri

Fordist üretim rejimi, yalnızca teknik bir üretim modeli değil, belirli ekonomik ve toplumsal koşullar üzerine inşa edilmiş bütüncül bir sistemdir. Bu rejimin temelinde, ulusal pazarların genişlemesi, devlet müdahalesinin artması ve sanayi kapitalizminin istikrarlı bir büyüme dönemine girmesi yer almaktadır. Fordizm, özellikle II. Dünya Savaşı sonrasında Keynesyen ekonomi politikalarıyla birlikte, yüksek istihdam, ücret artışları ve kitlesel tüketim üzerine kurulu bir büyüme modeli olarak kurumsallaşmıştır (Rowthorn & Ramaswamy, 1999).

Toplumsal düzeyde Fordizm, emek sürecinin standartlaştırılması ve disipline edilmesi yoluyla işçi sınıfının gündelik yaşamını da dönüştürmüştür. Çalışma saatlerinin düzenlenmesi, ücretli emeğin yaygınlaşması ve sosyal refah politikalarının gelişmesi, Fordist üretim rejiminin toplumsal boyutunu oluşturmuştur. Bu düzen, iş ve boş zamanın kesin sınırlarla ayrıldığı, gündelik yaşamın belirli ritimler etrafında örgütlendiği bir toplumsal yapı üretmiştir.

Ekonomik ve toplumsal bu yapı, kent mekânında da karşılığını bulmuştur. Sanayi alanları, işçi konutları ve ulaşım altyapısı, Fordist üretim ve tüketim ilişkilerini destekleyecek biçimde planlanmış; kentler, üretim süreçlerinin mekânsal uzantısı hâline gelmiştir. Bu nedenle Fordizm, yalnızca sanayi üretimini değil, kentsel mekânın organizasyonunu ve toplumsal yaşamın mekânsal düzenini belirleyen temel bir rejim olarak değerlendirilmelidir (Rodrik, 2016).

3. FORDİST ÜRETİM MODELİNİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

3.1. Standartlaşma ve Seri Üretim

Fordist üretim modelinin ayırt edici temel özelliklerinden biri, üretim süreçlerinin yüksek düzeyde standartlaştırılmasıdır. Standartlaşma, hem ürün tasarımında hem de üretim sürecinin her aşamasında tekrar edilebilirliği esas alan bir yaklaşımı ifade etmektedir. Bu bağlamda Fordist üretim, çeşitlilikten ziyade tek tip ürünlerin büyük miktarlarda üretilmesine dayanmaktadır. Standart ürünler, üretim sürecinin hızlandırılmasını ve maliyetlerin

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

düşürülmesini mümkün kılmış; bu durum seri üretimin sanayi kapitalizminin baskın biçimi hâline gelmesine yol açmıştır.

Seri üretim, üretim sürecinin zaman ve mekân açısından kesin olarak tanımlanmasını gerektirmiştir. Üretimin belirli bir ritim içinde ilerlemesi, iş süreçlerinin önceden planlanması ve üretim akışının kesintisiz hâle getirilmesi, Fordist sistemin temel ilkeleri arasında yer almıştır. Bu yaklaşım, üretim sürecinin öngörülebilirliğini artırmış; sanayi üretiminin ölçek ekonomilerinden faydalanmasını sağlamıştır (Peaucelle, 2000).

Standartlaşmaya dayalı seri üretim anlayışı, yalnızca fabrika içi organizasyonu değil, sanayi üretiminin kent mekânındaki örgütlenmesini de etkilemiştir. Büyük ölçekli üretim tesisleri, yüksek kapasite gereksinimi nedeniyle geniş alanlara yayılmış; bu durum sanayi alanlarının kent içinde veya kent çeperlerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır.

3.2. İşbölümü ve Emek Organizasyonu

Fordist üretim modelinin ikinci temel özelliği, emek sürecinin ileri düzeyde parçalanmasına dayanan işbölümüdür. Taylorizmden beslenen bu yaklaşım, üretim sürecini basit, tekrar eden ve uzmanlaşmış iş adımlarına ayırarak işgücünün verimliliğini artırmayı amaçlamıştır. Her işçi, üretim sürecinin yalnızca belirli bir bölümünden sorumlu hâle gelmiş; bu durum emeğin niteliksel çeşitliliğini azaltırken üretim hızını artırmıştır (Littler, 1978).

Bu emek organizasyonu, işçilerin üretim süreci üzerindeki kontrolünü sınırlandırmış ve üretimin merkezi bir otorite tarafından denetlenmesini mümkün kılmıştır. İş sürecinin planlanması ile uygulanması arasındaki ayrım, Fordist üretimin temel kurumsal özelliklerinden biri hâline gelmiştir. Yönetim, üretimin nasıl yapılacağını belirlerken; işçiler, bu planları uygulayan birer üretim unsuru olarak konumlandırılmıştır (Berber, 2016).

Fordist emek organizasyonu, yalnızca fabrika içindeki ilişkileri değil, toplumsal yaşamın örgütlenmesini de etkilemiştir. Çalışma saatlerinin kesin biçimde tanımlanması, iş ve boş zamanın ayrıştırılması ve ücretli emeğin gündelik yaşamın merkezine yerleşmesi, Fordist üretim rejiminin toplumsal boyutunu oluşturmuştur.

3.3. Fabrika Sistemi ve Mekânsal Düzen

Fordist üretim modelinin bir diğer temel özelliği, üretimin büyük ölçekli, merkezi ve kapalı mekânlarda yoğunlaşmasını öngören fabrika sistemidir. Fabrika, yalnızca üretimin gerçekleştirildiği bir mekân değil; üretim sürecinin disipline edildiği, denetlendiği ve zamansal olarak düzenlendiği bir organizasyon birimi olarak işlev görmüştür. Üretimin tek bir mekânda yoğunlaşması, hem işgücünün denetlenmesini hem de üretim sürecinin kesintisizliğini sağlamıştır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Bu mekânsal örgütlenme, kent ölçeğinde de belirleyici olmuştur. Fabrikalar, yüksek işgücü talebi nedeniyle çevresinde işçi yerleşimlerinin oluşmasına yol açmış; sanayi alanları ile konut alanları arasında işlevsel ilişkiler kurulmuştur. Ancak bu ilişkiler, modern planlama anlayışı doğrultusunda çoğu zaman mekânsal ayrışma temelinde kurgulanmıştır. Sanayi, konut ve ulaşım alanlarının ayrı ayrı planlanması, Fordist üretim mantığının kent mekânındaki karşılığı olarak ortaya çıkmıştır (Türk, 2015; Karakurt, 2006).

Fabrika sisteminin gerektirdiği bu mekânsal düzen, kentlerin büyüme biçimini de etkilemiş; ulaşım altyapısı, sanayi alanları ile konut bölgeleri arasındaki bağlantıyı sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Böylece Fordist üretim modeli, kentsel mekânın biçimlenmesinde dolaylı ancak güçlü bir belirleyici hâline gelmiştir.

3.4. Kitle Üretimi – Kitle Tüketimi İlişkisi

Fordist üretim modelinin sürdürülebilirliğini sağlayan temel unsur, kitle üretimi ile kitle tüketimi arasındaki karşılıklı ilişkidir. Seri üretim yoluyla üretilen standart ürünlerin geniş pazarlara ulaşabilmesi, ancak bu ürünleri satın alabilecek geniş bir tüketici kitlesinin varlığıyla mümkün olmuştur. Bu nedenle Fordist sistem, üretim ve tüketimi birbirini besleyen bir bütün olarak ele almıştır.

Henry Ford'un yüksek ücret politikası, işçilerin aynı zamanda tüketici hâline gelmesini hedeflemiş; bu yaklaşım, Fordist büyüme modelinin temel dinamiklerinden biri olmuştur. Ücret artışları, istikrarlı istihdam ve sosyal refah uygulamaları, kitle tüketimini destekleyerek üretim kapasitesinin sürekli artmasını sağlamıştır (Peaucelle, 2000).

Kitle üretimi–kitle tüketimi ilişkisi, kent mekânında da belirgin izler bırakmıştır. Tüketim odaklı alanların, alışveriş merkezlerinin ve ulaşım altyapılarının yaygınlaşması, Fordist üretim rejiminin mekânsal uzantıları olarak ortaya çıkmıştır. Bu süreç, kentlerin yalnızca üretim değil, aynı zamanda tüketim merkezleri hâline gelmesine yol açmış; gündelik yaşamın mekânsal örgütlenmesini köklü biçimde dönüştürmüştür (Uğurlar, 2019).

4. FORDİZMİN KENTSEL MEKÂN ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

4.1. Sanayi Alanlarının Mekânsal Dağılımı

Fordist üretim rejimi, sanayi faaliyetlerinin kent mekânı içindeki konumlanışını belirleyici biçimde etkilemiştir. Seri üretime dayalı büyük ölçekli sanayi tesisleri, yüksek işgücü gereksinimi, ulaşım olanakları ve altyapı kapasitesi nedeniyle belirli bölgelerde yoğunlaşma eğilimi göstermiştir. Bu süreç, sanayi alanlarının kent içinde ya da kent çeperlerinde kümelenmesine yol açmış; sanayi, kentsel mekânın örgütlenmesinde merkezî bir rol üstlenmiştir (Türk, 2015).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Fordist dönemde sanayi alanlarının mekânsal dağılımı, rastlantısal değil; üretim verimliliğini artırmaya yönelik rasyonel planlama ilkeleri doğrultusunda şekillenmiştir. Fabrikaların demiryolu hatlarına, limanlara veya ana ulaşım akslarına yakın konumlandırılması, üretim ve dağıtım süreçlerinin kesintisizliğini sağlamayı amaçlamıştır. Bu durum, sanayi bölgelerinin kent dokusu içinde belirgin sınırlarla ayrışmasına ve mekânsal olarak tanımlı üretim alanlarının oluşmasına neden olmuştur (Karakurt, 2006).

Sanayi alanlarının bu biçimde yoğunlaşması, kentsel mekânda işlevsel hiyerarşilerin ortaya çıkmasına yol açmış; üretim faaliyetleri, kentin ekonomik ve mekânsal organizasyonunun temel belirleyeni hâline gelmiştir. Fordist üretim rejiminin çözülmesiyle birlikte bu alanların bir kısmı işlevini yitirmiş olsa da, sanayi bölgelerinin kent mekânındaki izleri günümüzde hâlâ okunabilir durumdadır.

4.2. Konut Alanları ve İşçi Yerleşimleri

Fordist üretim rejimi, yalnızca sanayi alanlarının değil, konut alanlarının mekânsal örgütlenmesini de doğrudan etkilemiştir. Büyük ölçekli sanayi tesislerinin ortaya çıkışı, yoğun bir işgücü talebi yaratmış; bu durum sanayi alanlarına yakın işçi yerleşimlerinin oluşmasına yol açmıştır. İşçi konutları, üretim mekânlarına erişimi kolaylaştıracak biçimde konumlandırılmış; konut ve çalışma alanları arasında işlevsel bir ilişki kurulmuştur.

Ancak bu ilişki, çoğu zaman mekânsal bütünlükten ziyade işlevsel ayrışma temelinde kurgulanmıştır. Modern planlama anlayışı doğrultusunda sanayi ve konut alanları farklı zonlar içinde ele alınmış; bu durum, işçi yerleşimlerinin homojen, standart ve çoğu zaman düşük nitelikli mekânlar olarak şekillenmesine neden olmuştur (Türk, 2015). Konut üretiminde standart tipolojilerin benimsenmesi, Fordist üretim mantığının mekânsal bir uzantısı olarak değerlendirilebilir.

Fordist dönemde konut, yalnızca barınma ihtiyacını karşılayan bir mekân değil; üretim sürecinin sürekliliğini sağlayan bir unsur olarak ele alınmıştır. İşçi yerleşimlerinin mekânsal düzeni, gündelik yaşamın üretim ritmine uyum sağlayacak biçimde planlanmış; çalışma saatleri, ulaşım süreleri ve konut alanlarının konumu bu bütünlük içinde değerlendirilmiştir.

4.3. Ulaşım Altyapısı ve Kentsel Yayılma

Fordist üretim rejiminin kentsel mekân üzerindeki en belirgin etkilerinden biri, ulaşım altyapısının biçimlenişinde görülmektedir. Konut, sanayi ve tüketim alanlarının mekânsal olarak ayrışması, bu alanlar arasında yoğun bir ulaşım ihtiyacı doğurmuş; ulaşım altyapısı Fordist kentsel düzenin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir.

Özellikle otomobilin kitle üretimiyle birlikte yaygınlaşması, Fordist üretim–tüketim ilişkilerinin mekânsal bir aracı olarak kentlerde merkezi bir konum kazanmıştır. Otomobil odaklı ulaşım politikaları, geniş yolların, otoyolların ve otopark alanlarının kent mekânında yaygınlaşmasına yol açmış; bu durum kentsel yayılmayı hızlandırmıştır (Uğurlar, 2019; Kunst, 2016).

Ulaşım altyapısındaki bu dönüşüm, kentlerin yatayda büyümesini teşvik etmiş; düşük yoğunluklu yerleşim alanlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kentsel yayılma, yalnızca mekânsal bir genişleme değil, aynı zamanda kamusal alanların parçalanması ve yaya odaklı kentsel yaşamın zayıflaması gibi toplumsal sonuçlar da üretmiştir. Bu bağlamda ulaşım altyapısı, Fordist kentleşmenin mekânsal sonuçlarını derinleştiren temel bir unsur olarak değerlendirilebilir.

Bu mekânsal örgütlenme, açık alanların da üretim süreçlerine bağlı olarak kurgulanmasına neden olmuş; peyzaj, çoğu zaman üretim ve ulaşım altyapısının tamamlayıcı bir unsuru olarak ele alınmıştır. Böylece Fordist kent, peyzajın estetik bir bileşen olmaktan ziyade işlevsel ve altyapıya bağlı bir mekânsal eleman olarak şekillendiği bir kentsel düzen üretmiştir.

4.4. Fonksiyonel Ayrışma ve Modern Planlama Yaklaşımları

Fordist üretim rejiminin kentsel mekâna yansıyan temel ilkelerinden biri, fonksiyonel ayrışmaya dayalı planlama anlayışıdır. Modern planlama yaklaşımları, kenti üretim, konut, rekreasyon ve ulaşım gibi temel işlevlere ayırarak düzenlemeyi amaçlamış; bu yaklaşım, Fordist üretim mantığının kent ölçeğindeki kurumsal karşılığı olarak ortaya çıkmıştır (Karakurt, 2006).

Fonksiyonel ayrışma, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmayı hedeflemiş olsa da, kent mekânında bütüncül bir parçalanmaya yol açmıştır. İşlevlerin mekânsal olarak ayrıştırılması, gündelik yaşamın farklı alanlar arasında bölünmesine ve ulaşım bağımlılığının artmasına neden olmuştur. Bu durum, Fordist kent modelinin çevresel ve toplumsal sınırlarının daha görünür hâle gelmesine yol açmıştır.

Modern planlama anlayışının bu yaklaşımı, 1970'li yıllardan itibaren eleştirilmiş; esneklik, karma kullanım ve katılımcılık gibi kavramlar ön plana çıkmıştır. Ancak bu eleştiriler, Fordist dönemde şekillenen mekânsal yapıları ortadan kaldırmamış; aksine bu yapıların dönüştürülmesi ve yeniden yorumlanması gerekliliğini gündeme getirmiştir. Dolayısıyla fonksiyonel ayrışma, Fordist üretim rejiminin kentsel mekânda bıraktığı en kalıcı ve tartışmalı miraslardan biri olarak değerlendirilebilir.

5. FORDİST PEYZAJ VE MEKÂNSAL İZLER

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Fordizmi yalnızca bir üretim ya da kentleşme modeli olarak değil, peyzajı biçimlendiren tarihsel bir üretim rejimi olarak ele almaktadır. Fordist üretim anlayışı, fabrika alanları, ulaşım altyapıları ve işlevsel ayrışmaya dayalı kentsel düzen aracılığıyla özgün bir peyzaj üretmiş; bu peyzaj, günümüz kentlerinde dönüştürülmesi gereken açık alanlar, endüstriyel boşluklar ve ekolojik kopukluklar biçiminde varlığını sürdürmüştür. Bu bağlamda Fordist peyzajın okunması, çağdaş peyzaj tasarımı ve kentsel açık alan planlama yaklaşımlarının kavramsal arka planını oluşturmak açısından kritik bir önem taşımaktadır.

5.1. Endüstriyel Peyzaj Kavramı

Endüstriyel peyzaj kavramı, sanayi üretiminin doğal ve kentsel çevre üzerinde bıraktığı fiziksel, mekânsal ve görsel izleri ifade etmektedir. Bu kavram, peyzajı yalnızca estetik bir olgu olarak değil; üretim süreçleri, teknolojik altyapılar ve toplumsal ilişkiler tarafından biçimlendirilen tarihsel bir yapı olarak ele alır. Fordist üretim rejimi, endüstriyel peyzajın oluşumunda belirleyici bir rol oynamış; büyük ölçekli üretim tesisleri, altyapı ağları ve işlevsel ayrışmaya dayalı mekânsal düzen, kent peyzajının temel bileşenleri hâline gelmiştir.

Fordist dönemde endüstriyel peyzaj, üretimin sürekliliğini ve verimliliğini esas alan rasyonel bir mantıkla şekillenmiştir. Fabrikalar, depolar, enerji tesisleri ve ulaşım altyapıları, kentsel mekânda teknik işlevleri doğrultusunda konumlandırılmış; bu durum, peyzajın üretim odaklı bir karakter kazanmasına yol açmıştır. Endüstriyel peyzaj bu bağlamda, Fordist üretim rejiminin mekânsal bir ifadesi olarak değerlendirilebilir (Whitehand, 2007).

5.2. Fabrika Alanları ve Organize Sanayi Bölgeleri

Fordist üretim rejimi, üretimin büyük ölçekli ve merkezi mekânlarda yoğunlaşmasını gerektirmiş; bu durum fabrika alanlarının kent mekânında belirgin biçimde tanımlanmasına yol açmıştır. Fabrikalar, yalnızca üretim yapılan yapılar değil; aynı zamanda üretim sürecinin disipline edildiği, işgücünün denetlendiği ve zamansal olarak düzenlendiği mekânlar olarak işlev görmüştür. Bu mekânsal organizasyon, Fordist üretimin rasyonelleştirilmiş ve standartlaştırılmış yapısını yansıtmaktadır.

Zamanla sanayi faaliyetlerinin artan ölçeği, sanayinin kent içinde belirli bölgelerde yoğunlaşmasını zorunlu kılmış; bu süreç organize sanayi bölgelerinin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Organize sanayi bölgeleri, Fordist üretim mantığının mekânsal karşılığı olarak, altyapı olanakları, ulaşım bağlantıları ve işgücü erişimi açısından rasyonel biçimde planlanmıştır. Bu bölgeler, üretimin mekânsal olarak ayrıştırılmasını sağlarken, aynı zamanda sanayi peyzajının kent çeperlerinde yoğunlaşmasına neden olmuştur (Özcan & Gündoğar, 2015).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Fordist dönemin sona ermesiyle birlikte birçok fabrika alanı ve sanayi bölgesi işlevini yitirmiş olsa da, bu alanlar kent mekânında güçlü izler bırakmıştır. Günümüzde bu alanlar, dönüşüm, yeniden işlevlendirme veya terk edilmişlik durumlarıyla Fordist üretim rejiminin mekânsal mirasını görünür kılmaktadır.

5.3. Fordizmin Bıraktığı Fiziksel ve Morfolojik İzler

Fordist üretim rejimi, kent mekânında yalnızca işlevsel değil, aynı zamanda morfolojik izler de bırakmıştır. Büyük parseller, geniş yapı kütleleri, düşük geçirgenlikli alanlar ve tek işlevli bölgeler, Fordist mekânsal düzenin ayırt edici morfolojik özellikleri arasında yer almaktadır. Bu özellikler, üretim süreçlerinin gerektirdiği ölçek ve düzen anlayışının kentsel forma yansıması olarak ortaya çıkmıştır.

Modern planlama yaklaşımlarının Fordist üretim mantığıyla birleşmesi, kentsel dokunun parçalı ve hiyerarşik bir yapıya bürünmesine neden olmuştur. Tarihsel katmanların göz ardı edilmesi, parça–bütün ilişkilerinin zayıflaması ve mekânın niceliksel ölçütlerle ele alınması, Fordist dönemin kentsel morfolojide bıraktığı kalıcı etkiler arasında yer almaktadır (Ünlü, 2017; Whitehand, 2007).

Bu morfolojik yapı, post-Fordist dönüşümlere rağmen büyük ölçüde varlığını sürdürmektedir. İşlevini yitirmiş sanayi alanları, günümüzde çoğu zaman çevresiyle bütünleşemeyen, parçalı ve kopuk mekânlar olarak kent dokusu içinde yer almakta; bu durum Fordist mirasın mekânsal sürekliliğini ortaya koymaktadır.

5.4. Ekolojik Etkiler ve Çevresel Sonuçlar

Fordist üretim rejiminin mekânsal etkileri, ekolojik ve çevresel boyutlarda da önemli sonuçlar doğurmuştur. Seri üretime dayalı sanayi faaliyetleri, yoğun enerji tüketimi, hammadde kullanımı ve atık üretimi ile çevresel baskıları artırmıştır. Sanayi alanlarının yoğunlaşması, hava, su ve toprak kirliliği gibi çevresel sorunların kent ölçeğinde yaygınlaşmasına yol açmıştır. Bununla birlikte Fordist kentleşme modeli, otomobil odaklı ulaşım sistemlerini teşvik ederek fosil yakıt tüketimini artırmış; bu durum karbon salınımlarının yükselmesine ve ekolojik dengenin bozulmasına neden olmuştur. Kentsel yayılmanın hızlanması, doğal alanların yapılaşmaya açılması ve yeşil alanların azalması, Fordist mekânsal düzenin çevresel sonuçları arasında yer almaktadır (Uğurlar, 2019).

Günümüzde sürdürülebilirlik tartışmaları, büyük ölçüde Fordist üretim ve kentleşme modelinin çevresel sınırlarına bir tepki olarak ortaya çıkmıştır. Ancak Fordist dönemde şekillenen mekânsal yapıların varlığını sürdürmesi, bu çevresel sorunların tamamen ortadan kalkmasını

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

zorlaştırmakta; endüstriyel peyzajın dönüştürülmesi ve yeniden yorumlanması gerekliliğini gündeme getirmektedir.

6. FORDİZMİN GÜNÜMÜZDEKİ YERİ

Bu bölümde ele alınan endüstriyel peyzaj, Fordist üretim rejiminin peyzaj tasarımı açısından bıraktığı mekânsal mirası anlamak için kritik bir çerçeve sunmaktadır. Fordist peyzaj, fabrika alanları, altyapı koridorları ve işlevsel açık alanlar aracılığıyla oluşmuş; günümüz peyzaj tasarımı pratikleri için dönüştürülmesi gereken özgün bir mekânsal katman üretmiştir.

6.1. Fordizmin Sınırları ve Eleştiriler

Fordist üretim rejimi, 20. yüzyıl boyunca sanayi kapitalizminin baskın örgütlenme biçimi olmuş; ancak bu sistem, özellikle 1970'li yıllardan itibaren ekonomik, toplumsal ve çevresel sınırları nedeniyle yoğun eleştirilere konu olmuştur. Standartlaşmaya dayalı seri üretim, uzun süre yüksek verimlilik sağlamakla birlikte, değişen tüketici taleplerine ve artan küresel rekabete uyum sağlamakta giderek zorlanmıştır. Bu durum, Fordist üretim modelinin esnek olmayan yapısını görünür kılmıştır (Peaucelle, 2000).

Ekonomik açıdan Fordizm, büyümenin sürekliliğini yüksek istihdam ve kitle tüketimi üzerinden sağlamaya çalışmış; ancak bu model, kriz dönemlerinde kırılgan bir yapı sergilemiştir. Sanayi sektöründe verimlilik artışlarının istihdam yaratma kapasitesini aşması, sanayisizleşme sürecini hızlandırmış; birçok kentte üretim faaliyetleri gerilemiş ve sanayi alanları işlevsizleşmiştir (Rowthorn & Ramaswamy, 1999). Bu süreç, Fordist üretim rejiminin uzun vadeli sürdürülebilirliğini sorgulanır hâle getirmiştir.

Toplumsal düzeyde ise Fordist emek organizasyonu, emeğin parçalanması ve üretim sürecinin katı biçimde denetlenmesi nedeniyle eleştirilmiştir. İşçilerin üretim süreci üzerindeki kontrolünün sınırlanması, yabancılaşma ve iş doyumsuzluğu gibi sorunları beraberinde getirmiştir. Bu eleştiriler, Fordizmin yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda toplumsal bir kriz ürettiğini ortaya koymuştur (Littler, 1978).

Çevresel açıdan bakıldığında Fordist üretim ve kentleşme modeli, yoğun enerji tüketimi, kaynak kullanımı ve atık üretimiyle ekolojik sınırları zorlamıştır. Otomobil odaklı ulaşım sistemleri ve kentsel yayılma, çevresel baskıları artırmış; bu durum, Fordist mekânsal düzenin ekolojik sürdürülebilirlik açısından ciddi sorunlar barındırdığını göstermiştir (Uğurlar, 2019). Bu çok yönlü eleştiriler, Fordizmin yerini esnek, çeşitlenmiş ve daha az merkezi üretim biçimlerine bırakmasına zemin hazırlamıştır.

6.2. Günümüz Kentlerinde Fordist Mirasın Okunması

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Fordist üretim rejiminin çözülmesine ve post-Fordist dönüşümlerin ortaya çıkmasına rağmen, Fordist dönemde şekillenen mekânsal yapıların büyük ölçüde varlığını sürdürdüğü görülmektedir. Günümüz kentlerinde işlevini yitirmiş sanayi alanları, büyük ölçekli üretim yapıları, otomobil odaklı ulaşım altyapıları ve fonksiyonel ayrışmaya dayalı planlama şemaları, Fordist mirasın somut göstergeleri olarak okunabilmektedir.

Bu mekânsal miras, yalnızca fiziksel kalıntılarla sınırlı değildir; aynı zamanda kentsel planlama pratikleri ve mekânsal düşünme biçimleri üzerinde de etkisini sürdürmektedir. Modern planlama anlayışının Fordist üretim mantığıyla kurduğu ilişki, günümüzde dahi tek işlevli bölgeler, geniş ulaşım koridorları ve düşük yoğunluklu yerleşim alanları biçiminde kendini göstermektedir (Karakurt, 2006; Ünlü, 2017). Bu durum, Fordist mekânsal düzenin yalnızca tarihsel bir olgu değil, güncel kentsel sorunların arka planında yer alan yapısal bir miras olduğunu ortaya koymaktadır.

Günümüz peyzaj tasarımı açısından Fordist miras; büyük ölçekli endüstriyel alanlar, parçalı açık alan sistemleri ve ekolojik sürekliliği zayıflatan altyapı düzenleri üzerinden okunabilir. Bu okuma, peyzaj tasarımının yalnızca biçimsel değil, tarihsel ve yapısal bir müdahale alanı olduğunu ortaya koymaktadır.

Fordist mirasın okunması, aynı zamanda bu mirasın dönüştürülmesi ve yeniden yorumlanması gerekliliğini de gündeme getirmektedir. İşlevini yitirmiş sanayi alanlarının yeniden işlevlendirilmesi, endüstriyel peyzajın korunması ve kentsel dönüşüm süreçlerinde tarihsel sürekliliğin gözetilmesi, Fordist dönemin mekânsal izleriyle kurulan eleştirel ilişkinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir (Whitehand, 2007).

Bu bağlamda Fordizm, günümüz kentlerinde aşılmış bir üretim modeli olmaktan ziyade, mekânsal sürekliliği olan bir referans çerçevesi olarak ele alınmalıdır. Fordist mirasın kavranması, çağdaş kentsel dönüşüm, sürdürülebilirlik ve planlama tartışmalarının sağlıklı biçimde yürütülebilmesi açısından temel bir öneme sahiptir.

7. SONUÇ

Bu çalışma, Fordist üretim rejiminin yalnızca bir sanayi üretim modeli değil, aynı zamanda kent mekânını çok katmanlı biçimde şekillendiren tarihsel bir düzenleyici olduğunu ortaya koymuştur. Sanayi üretiminin standartlaşma, seri üretim ve merkeziyet ilkeleri doğrultusunda örgütlenmesi; kentlerin mekânsal yapısında sanayi alanları, konut bölgeleri ve ulaşım altyapıları arasında belirgin bir işlevsel ayrışmayı beraberinde getirmiştir. Bu ayrışma, modern planlama anlayışıyla kurumsallaşarak Fordist kent modelinin temelini oluşturmuştur (Türk, 2015; Karakurt, 2006).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Fordist üretim rejimi, kentleri üretim süreçlerinin mekânsal uzantıları hâline getirmiş; fabrika sistemleri, işçi yerleşimleri ve ulaşım ağları kentsel gelişmenin ana belirleyicileri olarak öne çıkmıştır. Bu süreçte kent mekânı, üretimin sürekliliğini ve verimliliğini destekleyen bir araç olarak ele alınmış; mekânsal kararlar büyük ölçüde ekonomik rasyonaliteye dayandırılmıştır. Sonuç olarak Fordist kent, işlevsel açıdan parçalanmış, otomobil odaklı ve geniş ölçekli bir mekânsal yapıya bürünmüştür.

Fordizmin çözülmeye başladığı dönemde dahi bu mekânsal düzenin bütünüyle ortadan kalkmadığı; aksine kentlerin fiziksel, morfolojik ve altyapısal yapılarında kalıcı izler bıraktığı görülmektedir. İşlevini yitirmiş sanayi alanları, büyük parseller, tek işlevli bölgeler ve ulaşım altyapıları, Fordist dönemin mekânsal mirasının günümüzde de okunabilir olduğunu göstermektedir (Whitehand, 2007; Ünlü, 2017). Bu durum, Fordizmin kent ve mekân üzerindeki belirleyici rolünün tarihsel bir olgu olmanın ötesine geçtiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmadan elde edilen temel kavramsal çıkarım, Fordizmin kent mekânı üzerinde kurduğu ilişkinin yalnızca üretim süreçleriyle sınırlı olmadığıdır. Fordizm, üretim, tüketim, ulaşım ve gündelik yaşam pratiklerini kapsayan bütüncül bir mekânsal düzen üretmiş; bu düzen, post-Fordist dönüşümlere rağmen kentlerin yapısal arka planını oluşturmaya devam etmiştir. Bu nedenle Fordizm, geçmişte kalmış bir üretim rejimi olarak değil, güncel kentsel sorunların anlaşılmasında referans alınması gereken tarihsel bir çerçeve olarak ele alınmalıdır.

Bir diğer önemli çıkarım, Fordist mekânsal mirasın günümüz kentsel dönüşüm süreçlerinde eleştirel biçimde okunmasının gerekliliğidir. Sanayi alanlarının yeniden işlevlendirilmesi, endüstriyel peyzajın korunması ve fonksiyonel ayrışmaya dayalı planlama anlayışının sorgulanması, Fordist dönemin mekânsal etkilerinin doğru biçimde kavranmasına bağlıdır. Aksi hâlde dönüşüm süreçleri, yalnızca fiziksel yenilemeye odaklanan ve tarihsel sürekliliği göz ardı eden müdahaleler olarak kalma riski taşımaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, Fordist üretim rejiminin kent ve mekân üzerindeki etkilerini tarihsel, kuramsal ve mekânsal boyutlarıyla ele alarak, Fordist mirasın günümüz kentlerindeki sürekliliğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, çağdaş kent planlama, sürdürülebilirlik ve kentsel dönüşüm tartışmalarına eleştirel bir perspektif sunmakta; Fordist dönemde şekillenen mekânsal yapıların yeniden değerlendirilmesi için kavramsal bir zemin oluşturmaktadır. Bu yönüyle Fordist peyzaj, çağdaş peyzaj tasarımının eleştirel biçimde ele alması gereken tarihsel bir mekânsal miras olarak değerlendirilmelidir.

Not: Bu çalışma, 1.yazarın 2.yazar danışmanlığında yürütmüş olduğu yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKÇA

(Bildiri Kitabı)

[1] Ünlü, T., Mekânın Biçimlendirilmesi ve Kentsel Morfoloji, II. Kentsel Morfoloji Sempozyumu Bildirileri, 2017.

[2] Whitehand, J.W.R., Conzenian Urban Morphology and Urban Landscapes, 6th International Space Syntax Symposium, İstanbul, 2007.

(Makale)

[3] Berber, A., 100 Yıl Öncesine Bir Yolculuk: "Genel ve Endüstriyel Yönetim" ve Fransa'da Fayolizm–Taylorizm Kutuplaşması, İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 45 (Özel Sayı), 118-132, 2016.

[4] Karakurt, E., Kentsel Mekânı Düzenleme Önerileri: Modern Kent Planlama Anlayışı ve Postmodern Kent Planlama Anlayışı, Erciyes Üniversitesi İİBF Dergisi, 26, 1-25, 2006.

[5] Kunst, F., From Rail-Oriented to Automobile-Oriented Urban Development and Back, TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment, 21-34, 2016.

[6] Littler, C.R., Understanding Taylorism, The British Journal of Sociology, 29(2), 185-202, 1978.

[7] Özcan, K. ve Gündoğar, R., Organize Sanayi Yatırımlarının Mekânsal Gelişim Süreçlerine Etkileri: Tuzla (İstanbul) Örneği, Türk Coğrafya Dergisi, 64, 11-18, 2015.

[8] Peaucelle, J.-L., From Taylorism to Post-Taylorism, Journal of Organizational Change Management, 13(5), 452-467, 2000.

[9] Rodrik, D., Premature Deindustrialization, Journal of Economic Growth, 21(1), 1-33, 2016.

[10] Rowthorn, R. ve Ramaswamy, R., Growth, Trade, and Deindustrialization, IMF Staff Papers, 46(1), 18-41, 1999.

[11] Türk, S.M., 20. Yüzyıl Kent Kuramları, Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 2(3), 41-59, 2015.

[12] Uğurlar, A., Kentsel Ulaşımda Özel Araç Odaklı Düzenlemelere Eleştirel Bir Bakış, OPUS – Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi, 13(19), 1978-2005, 2019. DOI: 10.26466/opus.607571.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Comparison of Oilseed Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Genotypes for Yield and Selected Agronomic Traits under Muş Ecological Conditions

Muş Ekolojik Koşullarında Yağlık Ayçiçeği (Helianthus annuus L.) Genotiplerinin Verim ve Bazı Agronomik Özellikler Yönünden Karşılaştırılması

Mustafa YAŞAR[1]*, Remzi EKİNCİ[2]

[1] Muş Alparslan University, Faculty of Applied Sciences, Department of Plant Production and Technologies, Muş, Türkiye
ORCID: 0000-0001-9348-7978, e-mail: mustafa.yasar@alparslan.edu.tr, phone: +90 553 053 18 24
[2] Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Diyarbakır, Türkiye
ORCID: 0000-0003-4165-6631, e-mail: remzi.ekinci@dicle.edu.tr, phone: +90 536 466 13 59

**** Corresponding author:*** Mustafa YAŞAR; e-mail: mustafa.yasar@alparslan.edu.tr

ÖZET

Ayçiçeği (*Helianthus annuus*L.), Türkiye'nin bitkisel yağ açığının azaltılmasında stratejik öneme sahip bir yağ bitkisidir; ancak üretim büyük ölçüde geleneksel yetiştiricilik bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nde yüksek rakım, kısa yetişme dönemi ve düşük sıcaklıklar ayçiçeği yetiştiriciliğini sınırlandırabilmektedir. Bu araştırma, farklı yağlık ayçiçeği çeşit ve hatlarının Muş ekolojik koşullarındaki tane verimi ve bazı agronomik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla yürütülmüştür. Deneme, 2022 yılında Muş/TİGEM arazisinde tesadüf blokları deneme desenine göre dört tekerrürlü olarak kurulmuştur. Dört ticari çeşit ve Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü tarafından geliştirilen on aday hat olmak üzere toplam 14 genotip değerlendirilmiştir. Bitki boyu, tabla çapı, hektolitre ağırlığı, tane nem içeriği ve tane verimi incelenmiştir. Veriler varyans analiziyle değerlendirilmiş; genotip etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu özelliklerde ortalamalar Fisher'in korumalı LSD testiyle $\alpha = 0,05$ düzeyinde karşılaştırılmıştır. Genotip etkisi hektolitre ağırlığında $p < 0,05$, tane nem içeriği ve tane veriminde $p < 0,01$ düzeyinde önemli; bitki boyu ve tabla çapında ise önemsiz bulunmuştur. Tane verimi 1.381–2.696 kg ha^{-1} arasında değişmiş ve genel ortalama 2.161 kg ha^{-1} olmuştur. En yüksek tane verimi TTAE IMI 21-32 hattından elde edilmiş; TTAE IMI 21-58 ve TTAE IMI 21-67, $\alpha = 0,05$ düzeyinde bu hatla istatistiksel olarak farklı bulunmamıştır. TTAE IMI 21-78 düşük tane nemi ve yüksek hektolitre ağırlığıyla öne çıkmıştır. Bulgular, özellikle hektolitre ağırlığı, tane nem içeriği ve tane verimi bakımından genotipler arasında istatistiksel farklılaşma bulunduğunu göstermiştir; ancak sonuçlar tek yıl ve tek lokasyona dayandığından ön adaptasyon bulguları olarak değerlendirilmelidir. Ümitvar hatların çeşit önerisine konu edilmeden önce çok yıllı ve çok lokasyonlu denemelerle doğrulanması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğu Anadolu; genotip değerlendirmesi; ön adaptasyon; tane verimi; yağlık ayçiçeği

ABSTRACT

Sunflower (*Helianthus annuus*L.) is an oilseed crop of strategic value for reducing Türkiye's vegetable oil deficit, yet its production remains concentrated in a few traditional growing regions. In Eastern Anatolia, high altitude, a short growing season, and low temperatures can limit sunflower cultivation. This study compared the seed yield and selected agronomic traits of oilseed sunflower cultivars and candidate lines under the ecological conditions of Muş. The experiment was conducted in 2022 at the Muş/TİGEM experimental field in a randomized complete block design with four replications. Four commercial cultivars and ten candidate lines developed by the Trakya Agricultural Research Institute

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

were evaluated. Plant height, head diameter, test weight, seed moisture content, and seed yield were recorded. Data were subjected to analysis of variance, and means were separated using Fisher's protected least significant difference (LSD) test at $\alpha = 0.05$ only for traits with a significant overall genotype F-test. The genotype effect was significant for test weight ($p < 0.05$) and highly significant for seed moisture content and seed yield ($p < 0.01$), but was not significant for plant height or head diameter. Seed yield ranged from 1,381 to 2,696 kg ha^{-1}, with an overall mean of 2,161 kg ha^{-1}. TTAE IMI 21-32 produced the highest seed yield, whereas TTAE IMI 21-58 and TTAE IMI 21-67 were not significantly different from TTAE IMI 21-32 at $\alpha = 0.05$. TTAE IMI 21-78 was distinguished by low seed moisture and high test weight. These results demonstrate significant genotype differentiation for test weight, seed moisture content, and seed yield under Muş conditions; however, because the trial was conducted in a single year at one location, the findings should be regarded as preliminary adaptation evidence. Promising lines should therefore be validated in multi-year, multi-location trials before any cultivar recommendation is made.

Keywords: Eastern Anatolia; genotype evaluation; oilseed sunflower; preliminary adaptation; seed yield

INTRODUCTION

Sunflower (*Helianthus annuus* L.) is one of the world's major oil crops owing to its seed oil content, the nutritional and industrial value of its oil, and its adaptation to a wide range of production environments. Seed yield, oil content, and stress tolerance are complex quantitative traits, so accurate field phenotyping remains essential even as marker-assisted and genomic selection are used more widely in sunflower breeding (Dimitrijevic & Horn, 2018). Crop wild relatives and other genetic resources also supply useful alleles for improving adaptation and resistance to biotic and abiotic stresses (Kantar et al., 2015; Seiler et al., 2017). According to FAOSTAT, global sunflower seed production has stayed above 50 million metric tons in recent years (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2024).

Although Türkiye has diverse agroecological conditions, official statistics indicate that sunflower seed production is concentrated in a limited number of provinces and fluctuates among years (TÜİK, 2025). Improving productivity in established production zones remains important, but evaluating contrasting production environments can also broaden the evidence base for regional adaptation, provided that local screening is followed by multi-environment testing before recommendations are made.

In the Eastern Anatolia Region of Türkiye, high elevation, a relatively short frost-free period, and low temperatures can restrict crop establishment and seed maturation. Studies comparing sunflower genotypes in low- and high-altitude environments in Türkiye have shown that yield and quality responses vary across agroecological conditions and that genotype choice should be environment-specific (Gül & Coban, 2020). Under Erzurum conditions, significant differences among oilseed sunflower genotypes have likewise been reported for yield and yield components (Sefaoğlu & Kaya, 2018). A multi-year study in the Bingöl transition zone also demonstrated year-dependent differences in cultivar performance for seed yield and agronomic traits (Boydak & Fırat, 2019). More recently, cultivar-dependent yield and quality responses were documented under semiarid irrigated conditions in northeastern Türkiye (Gül et al., 2023). In Adana and Muş, Yaşar et al. (2023) reported significant genotype, location, and genotype × location effects for several traits, reinforcing the need to interpret local genotype rankings within their environmental context.

Muş represents a high-elevation production environment in Eastern Anatolia where genotype choice should account for maturity, seed yield, harvest moisture, and agronomic adaptation. Comparative field evidence for oilseed sunflower under Muş conditions remains limited; therefore, a single-site preliminary adaptation trial can serve as an initial screening step, provided that its restricted environmental scope is explicitly acknowledged.

Sunflower yield reflects the effects of genotype, environment, and genotype × environment interaction. Multi-environment studies have shown that sunflower genotypes can change rank across locations or seasons and that test environments differ in their ability to discriminate among materials (de la Vega et al., 2001; de la Vega & Chapman, 2006, 2010; Jocković et al., 2019; Ghaffari et al., 2021). AMMI and

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

GGE biplot approaches are widely used to characterize genotype × environment interaction patterns and to support interpretation of mean performance, stability, and specific adaptation (Gauch, 2006; Yan et al., 2007). Recent work has combined yield performance with multi-trait selection indices to avoid selection based on yield alone (Baraki et al., 2024), and studies from Türkiye likewise demonstrate environmentally dependent genotype performance (Kaya & Atakişi, 2002; Yaşar & Sezgin, 2022; Yaşar et al., 2023). Because the present study included only one year and one location, it cannot quantify genotype × environment interaction or yield stability; its role is limited to identifying initial genotype differentiation under Muş conditions.

The objective of this study was to compare oilseed sunflower cultivars and candidate lines under the ecological conditions of Muş for seed yield, plant height, head diameter, test weight, and seed moisture content, and to identify promising materials for advancement to multi-year, multi-location adaptation trials without inferring yield stability or broad adaptation from this single-environment experiment.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted during the 2022 growing season at the Muş/TİGEM experimental field in the central district of Muş Province. Four commercial cultivars (P64LL62, LG 55.82, Deray, and SY Granit) and ten candidate lines developed by the Trakya Agricultural Research Institute (TTAE 21-33, TTAE 21-53, TTAE 21-60, TTAE 21-80, TTAE 21-81, TTAE 21-88, TTAE IMI 21-32, TTAE IMI 21-58, TTAE IMI 21-67, and TTAE IMI 21-78) were evaluated. The experimental material therefore comprised 14 oilseed sunflower genotypes (four commercial cultivars and ten candidate lines), rather than 14 cultivars. The "IMI" designation identifies materials selected for tolerance to imidazolinone-group herbicides. Trial-site coordinates are presented in Table 1, mean climate data for the 2010–2021 reference period together with 2022 observations in Table 2, and soil properties in Table 3.

Table 1. Location information for the test site

Location	Altitude (m)	Latitude	Longitude
Muş/TİGEM	1268	38°47'19.63"N	41°34'41.76"E

Table 2. Mean monthly climate data for the 2010–2021 reference period and observations for 2022 at the experimental site

Month	Precip. (mm) 2010–2021	Precip. (mm) 2022	Temp. (°C) 2010–2021	Temp. (°C) 2022	RH (%) 2010–2021	RH (%) 2022
May	66.5	91.6	16.1	13.5	68.8	68.2
June	13.6	16.0	21.7	21.1	58.8	55.9
July	7.6	0.0	26.3	25.5	42.7	43.1
August	4.9	0.0	26.5	26.6	38.7	40.2
September	5.2	17.2	21.7	21.4	41.9	42.4
October	49.4	21.4	14.4	15.1	60.7	57.9

Source: General Directorate of Meteorology (MGM), 2022. RH: relative humidity.

Table 3. Selected physical and chemical properties of the experimental soil (0–30 cm)

Location	Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	pH	Lime (%)	Salinity (%)	OM (%)	P_2O_5 (kg ha^{-1})	K_2O (kg ha^{-1})	Texture
Muş/TİGEM	0–30	36.64	17.45	45.91	7.67	19.6	0.9	2.15	222	1400	Clay

OM: organic matter.

Design and Conduct of the Trial

The trial was established in a randomized complete block design with four replications. Sowing was performed on 2 June 2022 at a depth of 6–8 cm, with 70 cm between rows and 30 cm between plants within rows. Each plot consisted of four 7.5-m rows; measurements and harvested seed samples were obtained from the two central rows to minimize border effects.

Based on the soil analysis, 80 kg N ha^{-1} and 50 kg P_2O_5 ha^{-1} were applied. When plants reached 10–15 cm in height, hoeing was carried out by hand within rows and mechanically between rows. Heads were harvested on 12 October 2022, after the marginal bracts and leaves had dried and seed moisture had

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

approached 10%. Plant height, head diameter, test weight, seed moisture content, and seed yield were determined at plot level for each replication, and seed yield was expressed as kg ha^{-1}.

Statistical Analysis

Data were analyzed by analysis of variance (ANOVA) according to a randomized complete block design. The model was $Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + \varepsilon_{ij}$, where Y_{ij} is the observation for genotype i in block j, μ is the overall mean, G_i is the fixed effect of genotype i, B_j is the block effect, and ε_{ij} is the random error (i = 1, …, 14; j = 1, …, 4). Analyses were performed in JMP Pro 13 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Fisher's protected least significant difference (LSD) test was used at $\alpha = 0.05$ only when the overall genotype F-test for the corresponding trait was significant. Accordingly, no mean-separation letters were assigned to traits with a nonsignificant overall genotype effect.

RESULTS AND DISCUSSION

ANOVA showed a significant genotype effect for test weight ($p < 0.05$) and highly significant effects for seed moisture content and seed yield ($p < 0.01$). Genotype effects on plant height and head diameter were not significant (Table 4). Coefficients of variation ranged from 9.41% to 14.44%. These values describe residual variability relative to the corresponding trait means; they should not be interpreted as compensating for the absence of year and location replication, which limits the external generalization of the findings.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Table 4. Mean squares from the analysis of variance for the traits examined

Source of variation	DF	Plant height	Head diameter	Test weight	Seed moisture	Seed yield
Genotype	13	312.927	4.10885	38.7988*	7.39479**	426499.00**
Block	3	62.642	4.64643	9.2993	1.31113	23589.00
Error	39	190.078	2.43822	17.1968	1.36831	41357.00
CV (%)	–	9.51	9.93	11.32	14.44	9.41

** p < 0.05; ** p < 0.01. Values without an asterisk are not statistically significant. CV: coefficient of variation; DF: degrees of freedom. The table reports mean squares; therefore, dimensional units are the squared units of the corresponding original traits and are omitted from the trait column headings for clarity.*

Genotype means ranged from 131.6 to 158.0 cm for plant height, 14.1 to 17.2 cm for head diameter, 31.2 to 43.6 kg hL^{-1} for test weight, 5.5% to 10.6% for seed moisture content, and 1,381 to 2,696 kg ha^{-1} for seed yield (Table 5). The corresponding overall means were 144.9 cm, 15.7 cm, 36.6 kg hL^{-1}, 8.1%, and 2,161 kg ha^{-1}.

Table 5. Genotype means for seed yield and selected agronomic traits

No.	Genotype	Plant height (cm)	Head diameter (cm)	Test weight (kg hL^{-1})	Seed moisture (%)	Seed yield (kg ha^{-1})
1	P64LL62 (C)	133.9	16.5	35.1 bcd	7.2 d	1,738 e
2	LG 55.82 (C)	133.1	17.2	39.4 ab	6.8 de	2,182 cd
3	Deray (C)	137.6	15.5	36.4 bcd	8.3 bcd	2,006 de
4	SY Granit (C)	152.0	15.5	38.7 ab	7.5 d	2,304 bc
5	TTAE 21-33	146.6	16.6	39.0 ab	7.9 bcd	1,381 f
6	TTAE 21-53	158.0	16.9	32.3 cd	9.5 ab	2,057 cd
7	TTAE 21-60	145.7	14.1	37.2 bc	8.0 bcd	2,119 cd
8	TTAE 21-80	153.2	14.8	34.1 bcd	7.4 d	2,317 bc
9	TTAE 21-81	151.4	16.2	36.3 bcd	10.6 a	2,111 cd
10	TTAE 21-88	131.6	16.5	36.1 bcd	7.7 cd	2,310 bc
11	TTAE IMI 21-32	146.0	14.2	31.2 d	10.1 a	2,696 a
12	TTAE IMI 21-58	141.9	16.1	37.9 abc	8.0 bcd	2,476 ab
13	TTAE IMI 21-67	157.7	15.8	35.9 bcd	9.2 abc	2,476 ab
14	TTAE IMI 21-78	140.9	14.5	43.6 a	5.5 e	2,077 cd
	Mean	144.9	15.7	36.6	8.1	2,161

(C): commercial control cultivar. Within each trait column, means sharing at least one letter are not significantly different at α = 0.05 according to Fisher's protected LSD test. Mean-separation letters are shown only for traits with a significant overall genotype F-test; therefore, plant height and head diameter were not letter-coded.

Plant height ranged from 131.6 to 158.0 cm, but the overall genotype effect was not significant; therefore, the observed numerical range does not constitute statistical evidence of genotype differences for plant height in this experiment. Studies conducted across contrasting elevations or under semiarid irrigated conditions in Türkiye have shown that plant stature and other agronomic traits can respond to both genotype and environment (Gül & Coban, 2020; Gül et al., 2023). Long-term breeding evidence likewise indicates that agronomic traits should be interpreted jointly with yield and adaptation rather than as isolated selection criteria (de la Vega et al., 2007a, 2007b).

Head diameter ranged from 14.1 to 17.2 cm, but the overall genotype effect was not significant. Although the highest-yielding line, TTAE IMI 21-32, was not among the materials with the largest heads, this descriptive contrast does not establish an association between head diameter and seed yield. Because no correlation, regression, or path analysis was performed, the direction and magnitude of the head-diameter–yield relationship cannot be quantified from these means.

The genotype effect on test weight was significant at $p < 0.05$. The highest value was recorded for TTAE IMI 21-78 (43.6 kg hL^{-1}) and the lowest for TTAE IMI 21-32 (31.2 kg hL^{-1}), with TTAE 21-53 also

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

showing a low value (32.3 kg hL^{-1}). Test weight expresses seed mass per defined bulk volume and is a bulk-density-related physical trait influenced by factors such as seed size, hull proportion, seed filling, and moisture. It should therefore not be interpreted as a direct proxy for dry-matter accumulation, oil content, or oil yield (Kaya & Eryiğit, 2020).

The genotype effect on seed moisture content was significant at $p < 0.01$. TTAE IMI 21-78 had the lowest seed moisture (5.5%), whereas TTAE 21-81 (10.6%) and TTAE IMI 21-32 (10.1%) had the highest values. Lower harvest moisture may reduce postharvest drying requirements; however, the relatively high harvest moisture of the highest-yielding line, TTAE IMI 21-32, indicates that seed yield and harvest moisture should be considered jointly rather than assuming that superior performance in one trait necessarily implies superiority in the other.

The genotype effect on seed yield was significant at $p < 0.01$. TTAE IMI 21-32 produced the highest yield (2,696 kg ha^{-1}), followed by TTAE IMI 21-58 and TTAE IMI 21-67 (both 2,476 kg ha^{-1}), which were not significantly different from the highest-yielding line at $\alpha = 0.05$. TTAE 21-33 had the lowest yield (1,381 kg ha^{-1}). The 1,315 kg ha^{-1} difference between the extreme genotype means, together with the significant overall genotype F-test, demonstrates meaningful yield differentiation in this environment; nevertheless, the LSD grouping shows that not every pairwise difference was statistically significant. Genotypic differences in sunflower yield have also been reported under high-altitude and semiarid conditions in Türkiye (Sefaoğlu & Kaya, 2018; Gül & Coban, 2020; Gül et al., 2023). Direct numerical comparison among studies is not appropriate because climate, crop management, genotype sets, and experimental years differ.

The present ranking is specific to Muş in 2022. In multi-environment sunflower trials, environmental effects and genotype × environment interaction can account for substantial portions of yield variation (de la Vega et al., 2001; de la Vega & Chapman, 2010; Jocković et al., 2019; Ghaffari et al., 2021). AMMI and GGE analyses can then characterize interaction structure and support joint interpretation of mean performance and stability (Balalić et al., 2013; Gauch, 2006; Yan et al., 2007; Yaşar & Sezgin, 2022). Yaşar and Sezgin (2022) evaluated 12 oilseed sunflower genotypes across six locations over two years and reported strong environmental and interaction effects, whereas Yaşar et al. (2023) demonstrated significant location-related responses in trials conducted in Adana and Muş. The current experiment does not permit genotype × environment or stability analysis; it provides only a basis for identifying candidate materials for subsequent multi-environment testing.

Considering the measured traits together avoids a yield-only reading. TTAE IMI 21-32 was the highest-yielding line but also had relatively high seed moisture and the lowest test weight, whereas TTAE IMI 21-78 combined the lowest moisture with the highest test weight but was not in the top yield group. Multi-trait selection indices can formalize such trade-offs once breeding goals and trait weights are defined (Baraki et al., 2024). Oil content and fatty-acid composition can also vary with genotype and environment (Zheljazkov et al., 2008); these traits were not measured here, so no quality inference should be drawn from test weight alone. The present assessment is therefore descriptive and restricted to the five recorded traits.

CONCLUSIONS

Fourteen oilseed sunflower genotypes grown under Muş ecological conditions in 2022 were compared for seed yield and selected agronomic traits. Genotype significantly affected test weight, seed moisture content, and seed yield, but not plant height or head diameter. TTAE IMI 21-32 produced the highest seed yield, while TTAE IMI 21-58 and TTAE IMI 21-67 were not significantly different from it at $\alpha = 0.05$. TTAE IMI 21-78 was notable for its low seed moisture and high test weight. These findings identify materials for further testing and indicate that seed yield, harvest moisture, and test weight represent distinct selection dimensions in this dataset. Because the trial covered only one year and one location, it cannot support claims of yield stability, broad adaptation, cultivar registration, or direct producer recommendation. Promising lines should be evaluated across multiple years and representative locations before adaptation claims or producer recommendations are made, with stability and genotype × environment analyses applied when multi-environment data become available. Future trials should

also measure oil content, oil yield, fatty-acid composition, phenology, and relevant stress responses so that agronomic adaptation and product quality can be assessed jointly.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Trakya Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture and Forestry, Türkiye, and Agricultural Engineer Mehmet İbrahim Yılmaz for providing the oilseed sunflower material used in this study.

REFERENCES

Balalić, I., Branković, G., Zorić, M., Miklič, V., Jocić, S., & Šurlan-Momirović, G. (2013). Sunflower mega-environments in Serbia revealed by GGE biplot analysis. Ratarstvo i Povrtarstvo, 50(2), 20–27. https://doi.org/10.5937/ratpov50-4041

Baraki, F., Gebregergis, Z., Belay, Y., Teame, G., Gebremedhin, Z., Berhe, M., Fisseha, D., Araya, G., & Gebregergs, G. (2024). Identification of adaptable sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes using yield performance and multiple-traits index. Heliyon, 10(9), e29405. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29405

Boydak, E., & Fırat, R. (2019). Bazı farklı ayçiçeği (*Helianthus annuus*) genotiplerinin geçit bölgelerindeki performanslarının belirlenmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(1), 288–294. https://doi.org/10.21597/jist.438776

de la Vega, A. J., Chapman, S. C., & Hall, A. J. (2001). Genotype by environment interaction and indirect selection for yield in sunflower: I. Two-mode pattern analysis of oil and biomass yield across environments in Argentina. Field Crops Research, 72(1), 17–38. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00162-9

de la Vega, A. J., & Chapman, S. C. (2006). Defining sunflower selection strategies for a highly heterogeneous target population of environments. Crop Science, 46(1), 136–144. https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0170

de la Vega, A. J., DeLacy, I. H., & Chapman, S. C. (2007a). Progress over 20 years of sunflower breeding in central Argentina. Field Crops Research, 100(1), 61–72. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.05.012

de la Vega, A. J., DeLacy, I. H., & Chapman, S. C. (2007b). Changes in agronomic traits of sunflower hybrids over 20 years of breeding in central Argentina. Field Crops Research, 100(1), 73–81. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.05.007

de la Vega, A. J., & Chapman, S. C. (2010). Mega-environment differences affecting genetic progress for yield and relative value of component traits. Crop Science, 50(2), 574–583. https://doi.org/10.2135/cropsci2009.04.0209

Dimitrijevic, A., & Horn, R. (2018). Sunflower hybrid breeding: From markers to genomic selection. Frontiers in Plant Science, 8, 2238. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02238

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). Crops and livestock products: Sunflower seed [Data set]. FAOSTAT. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Gauch, H. G. (2006). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. Crop Science, 46(4), 1488–1500. https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0193

Ghaffari, M., Gholizadeh, A., Andarkhor, S. A., Zareei Siahbidi, A., Kalantar Ahmadi, S. A., Shariati, F., & Rezaeizad, A. (2021). Stability and genotype × environment analysis of oil yield of sunflower single-cross hybrids in diverse environments of Iran. Euphytica, 217, Article 187. https://doi.org/10.1007/s10681-021-02921-w

Gül, V., & Coban, F. (2020). Determination of yield and quality parameters of oil sunflower genotypes grown in Turkey. Turkish Journal of Field Crops, 25(1), 9–17. https://doi.org/10.17557/tjfc.609749

Gül, V., Gıdık, B., & Sefaoğlu, F. (2023). Evaluation of yield and quality characteristics of oil sunflower (*Helianthus annuus* L.) varieties cultivated in semiarid irrigated conditions in the northeast of Turkey. Turkish Journal of Field Crops, 28(2), 130–137. https://doi.org/10.17557/tjfc.1255415

Jocković, M., Cvejić, S., Jocić, S., Marjanović-Jeromela, A., Miladinović, D., Jocković, B., Miklič, V., & Radić, V. (2019). Evaluation of sunflower hybrids in multi-environment trial (MET). Turkish Journal of Field Crops, 24(2), 202–210. https://doi.org/10.17557/tjfc.645276

Kantar, M. B., Sosa, C. C., Khoury, C. K., Castañeda-Álvarez, N. P., Achicanoy, H. A., Bernau, V., Kane, N. C., Marek, L., Seiler, G., & Rieseberg, L. H. (2015). Ecogeography and utility to plant breeding of the crop wild

relatives of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Frontiers in Plant Science, 6, 841. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00841

Kaya, A. R., & Eryiğit, T. (2020). Bazı yağlık ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) çeşitlerinin önemli kalite özelliklerinin tespiti üzerine bir araştırma. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(3), 2143–2152. https://doi.org/10.21597/jist.699619

Kaya, Y., & Atakişi, İ. K. (2002). Ayçiçeğinde (*Helianthus annuus* L.) farklı verim karakterlerinde stabilite analizi. Anadolu, 12(2), 1–20.

Sefaoğlu, F., & Kaya, C. (2018). Bazı yağlık ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) genotiplerinin Erzurum ekolojik koşullarında adaptasyon kabiliyetlerinin belirlenmesi. Alinteri Journal of Agriculture Sciences, 33(1), 37–41. https://doi.org/10.28955/alinterizbd.348071

Seiler, G. J., Qi, L. L., & Marek, L. F. (2017). Utilization of sunflower crop wild relatives for cultivated sunflower improvement. Crop Science, 57(3), 1083–1101. https://doi.org/10.2135/cropsci2016.10.0856

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). Yağlık ayçiçeği üretim istatistikleri [Data set]. https://data.tuik.gov.tr

Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P. L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. Crop Science, 47(2), 643–653. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374

Yaşar, M., & Sezgin, M. (2022). Farklı çevre şartlarında yetiştirilen yağlık ayçiçeği genotiplerinin AMMI analizi ile genotip × çevre interaksiyonlarının incelenmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(4), 2532–2542. https://doi.org/10.21597/jist.1159707

Yaşar, M., Çil, A. N., & Çil, A. (2023). Investigation of genotype × environment interaction in some sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes in different environmental conditions. MAS Journal of Applied Sciences, 8(1), 42–55. https://doi.org/10.5281/zenodo.7642289

Zheljazkov, V. D., Vick, B. A., Ebelhar, M. W., Buehring, N. W., Baldwin, B. S., Astatkie, T., & Miller, J. F. (2008). Yield, oil content, and composition of sunflower grown at multiple locations in Mississippi. Agronomy Journal, 100(3), 635–642. https://doi.org/10.2134/agronj2007.0253

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Combining Ability and Heterosis for Some Yield and Fiber Traits in Interspecific Cotton (*Gossypium hirsutum* L. × *Gossypium barbadense* L.) Crosses

Türler Arası Pamuk (*Gossypium hirsutum* L. × *Gossypium barbadense* L.) Melezlerinde Bazı Verim ve Lif Özellikleri İçin Kombinasyon Yeteneği ve Heterosis

Mustafa YAŞAR[1]*, Remzi EKİNCİ[2]

[1] Muş Alparslan University, Faculty of Applied Sciences, Department of Plant Production and Technologies, Muş, Türkiye
ORCID: 0000-0001-9348-7978, e-mail: mustafa.yasar@alparslan.edu.tr, phone: +90 553 053 18 24
[2] Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Diyarbakır, Türkiye
ORCID: 0000-0003-4165-6631, e-mail: remzi.ekinci@dicle.edu.tr, phone: +90 536 466 13 59

*** Corresponding author:** Mustafa YAŞAR; e-mail: mustafa.yasar@alparslan.edu.tr

ÖZET

Bu araştırmada, türler arası pamuk melezlerinde kütlü pamuk verimi ve bazı lif özellikleri bakımından ebeveynlerin genel kombinasyon yeteneklerinin (GKY) ve F_1 melezlerinin özel kombinasyon yeteneklerinin (ÖKY) belirlenmesi amaçlanmıştır. Dört *G. hirsutum* L. hattı (Özaltın 404, DP 499, Zena 1010 ve MAY 404), iki *G. barbadense* L. testeri (Giza 45 ve Bahar 14) ile hat × tester düzeninde melezlenmiştir. Altı ebeveyn ve sekiz F_1 melezi, izleyen yetiştirme sezonunda tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak değerlendirilmiştir. Kütlü pamuk verimi, çırçır randımanı, 100 tohum ağırlığı ve lif uzunluğu incelenmiştir. Genotip etkisi bütün özelliklerde önemli bulunmuştur ($p < 0,001$). Hat etkisi kütlü pamuk verimi, 100 tohum ağırlığı ve lif uzunluğunda; tester etkisi kütlü pamuk verimi ve çırçır randımanında; hat × tester etkileşimi ise kütlü pamuk verimi ve 100 tohum ağırlığında önemli olmuştur. En yüksek kütlü pamuk verimleri MAY 404 × Bahar 14 (6156,50 kg ha^{-1}) ve MAY 404 × Giza 45 (6060,20 kg ha^{-1}) melezlerinden elde edilmiştir. MAY 404, kütlü pamuk verimi (+679,00) ve lif uzunluğu (+0,40) için en yüksek olumlu hat GKY etkisini göstermiştir. Özaltın 404 × Giza 45, kütlü pamuk veriminde en yüksek olumlu ÖKY etkisine (+454,40) sahip olmuştur. Bütün melezlerde kütlü pamuk verimi yönünden olumlu ve önemli üstün ebeveyn heterosisi belirlenmiş; en yüksek değerler Özaltın 404 × Giza 45 (%29,90) ve MAY 404 × Bahar 14 (%29,53) melezlerinde görülmüştür. Buna karşılık hiçbir melez lif uzunluğunda üstün ebeveyni aşmamıştır.

Varyans bileşeni analizi; kütlü pamuk verimi, çırçır randımanı ve 100 tohum ağırlığında eklemeli olmayan gen etkilerinin, lif uzunluğunda ise eklemeli gen etkilerinin baskın olduğunu ve en yüksek dar anlamda kalıtımın lif uzunluğuna ait olduğunu göstermiştir.

Sonuçlar, MAY 404 × Bahar 14 ve Özaltın 404 × Giza 45 kombinasyonlarının verim bakımından, Özaltın 404 × Bahar 14 kombinasyonunun ise 100 tohum ağırlığı bakımından ileri generasyonlara aktarılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *G. hirsutum* L.; *G. barbadense* L.; hat × tester; GKY; ÖKY; heterosis; kalıtım

ABSTRACT

This study aimed to determine the general combining ability (GCA) of parents and the specific combining ability (SCA) of F_1 hybrids for seed cotton yield and selected fiber-related traits in interspecific cotton crosses. Four *G. hirsutum* L. lines (Özaltın 404, DP 499, Zena 1010, and MAY 404) were crossed with two *G. barbadense* L. testers (Giza 45 and Bahar 14) in a line × tester mating design. Six parents and eight F_1 hybrids were evaluated in the following growing season in a randomized complete block design with three replications. Seed cotton yield, ginning yield, 100-seed weight, and

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

fiber length were recorded. The genotype effect was significant for all traits ($p < 0.001$). Line effects were significant for seed cotton yield, 100-seed weight, and fiber length; tester effects for seed cotton yield and ginning yield; and line × tester interaction for seed cotton yield and 100-seed weight. The highest seed cotton yields came from MAY 404 × Bahar 14 (6,156.50 kg ha^{-1}) and MAY 404 × Giza 45 (6,060.20 kg ha^{-1}). MAY 404 had the highest positive line GCA effects for seed cotton yield (+679.00) and fiber length (+0.40). Özaltın 404 × Giza 45 had the highest positive SCA effect for seed cotton yield (+454.40). All crosses showed significant positive better-parent heterosis for seed cotton yield, the largest values in Özaltın 404 × Giza 45 (29.90%) and MAY 404 × Bahar 14 (29.53%); in contrast, none exceeded the better parent for fiber length.

Variance-component analysis showed that non-additive gene effects predominated for seed cotton yield, ginning yield and 100-seed weight, whereas additive effects predominated for fiber length, which had the highest narrow-sense heritability.

The results indicate that MAY 404 × Bahar 14 and Özaltın 404 × Giza 45 can be advanced for yield, while Özaltın 404 × Bahar 14 merits consideration for 100-seed weight.

Keywords: *G. hirsutum* L.; *G. barbadense* L.; line × tester; GCA; SCA; heterosis; heritability

INTRODUCTION

Cotton is a multifaceted industrial crop that, in addition to fiber production, also supplies raw materials to the oil and feed industries. The primary objective of breeding programs is to combine high and consistent yields with the fiber characteristics desired by the textile industry within the same genotype. However, negative correlations between yield and fiber quality can complicate parent selection and the evaluation of hybrid combinations. Since the relationships between yield and fiber traits can vary depending on the environment, breeding material must be evaluated on the basis of multiple traits and environmental conditions (Yaşar, 2023; Istipliler et al., 2024; Lamlom et al., 2024). It is therefore necessary to examine not only the averages of the parents but also their overall performance in hybrids and the hybrid vigor resulting from specific crosses (Abdelghany et al., 2024; Polat et al., 2025).

G. hirsutum L. is the dominant species in global cotton production owing to its broad adaptability and high yield potential. *G. barbadense* L., in turn, is an important source of quality because of its long, fine fibers. Crossbreeding between these two tetraploid species is used to broaden the genetic base of *G. hirsutum* L. and to introduce beneficial fiber traits from *G. barbadense* L. However, since yield, ginning yield, and fiber traits may not change in the same direction in interspecific hybrids, superior F_1 performance may follow a different pattern in later generations because of segregation and recombination. It has been reported that combining high yield in *G. hirsutum* L. with high fiber quality from *G. barbadense* L. rests on a wide phenotypic variation, and that pedigree selection in later generations can be beneficial in this respect (Salama et al., 2024; Lamlom et al., 2024). Introgression material developed from interspecific hybrids also demonstrates the breeding value of gene transfer between these two species (Zhang et al., 2016; Çınar & Ünay, 2025).

Line × tester analysis allows a large number of parents to be evaluated through a more limited number of hybrids. General combining ability indicates a parent's average contribution across different crosses, while specific combining ability indicates the deviation of a particular hybrid that cannot be explained by the general effects of its parents. GCA is mostly associated with additive gene effects, whereas SCA is associated with non-additive effects such as dominance and epistasis; however, these interpretations are limited to the set of parents under study and the experimental environment. Diallel and line × tester studies in cotton have shown that GCA and SCA may not carry equal weight for yield and fiber traits, and that parent selection should be trait-specific (Basal & Turgut, 2003; Basal et al., 2009; Karademir et al., 2009; Munir et al., 2018; Yaşar, 2018; Makhdoom et al., 2019; Queiroz et al., 2021). Estimating the additive and non-additive variance components and the associated heritabilities complements the combining-ability analysis by indicating the type of gene action and the expected efficiency of selection (Jenkins et al., 2009; Liu et al., 2011). Similar results have also been reported for current cotton materials (Abdel-Aty et al., 2023; Abdelghany et al., 2024; Gören & Canavar, 2024; Polat et al., 2025).

The objective of this study was to determine the levels of GCA, SCA, and heterosis for seed cotton yield, ginning yield, 100-seed weight, and fiber length in eight F_1 hybrids produced from four *G. hirsutum* L. lines and two *G. barbadense* L. testers, to estimate the genetic variance components and heritabilities of these traits, and to identify the parents and hybrids that can be used in subsequent generations.

MATERIALS AND METHODS

Plant Material

Six cotton genotypes were used as parents in the study. The genotypes Özaltın 404, DP 499, Zena 1010, and MAY 404, belonging to *G. hirsutum* L., were used as female parents (lines); the genotypes Giza 45 and Bahar 14, belonging to *G. barbadense* L., were used as male parents (testers). Lines and testers were crossed in a full line × tester design during the 2024 growing season at the Dicle University Faculty of Agriculture experimental field, producing eight F_1 combinations (Table 1).

Table 1. Cotton parents used in the study and their roles in the line × tester design

Code	Genotype	Species	Role in hybridization
1	Giza 45	*G. barbadense* L.	Tester (male parent)
2	Özaltın 404	*G. hirsutum* L.	Line (female parent)
3	DP 499	*G. hirsutum* L.	Line (female parent)
4	Bahar 14	*G. barbadense* L.	Tester (male parent)
5	Zena 1010	*G. hirsutum* L.	Line (female parent)
6	MAY 404	*G. hirsutum* L.	Line (female parent)

Establishment of the Trial and Measurements

The six parents and eight F_1 hybrids were established in 2025 at the experimental field of the Faculty of Agriculture, Dicle University, in a randomized complete block design with three replications. Each plot consisted of two rows, 12 m long at planting and 10 m long at harvest. Row spacing was 0.70 m and in-row spacing 0.15 m; planting was done by hand on 21 April. Plots were fertilized with 120 kg ha^{-1} N and 60 kg ha^{-1} P_2O_5. Half of the nitrogen and all of the phosphorus were applied at planting, and the remaining nitrogen during the boll-formation period. Weed control was achieved with two hand weedings and three mechanical cultivations, with a single pre-planting herbicide application. Beginning with the first irrigation on 22 June, flood irrigation was applied seven times at 10–15-day intervals, totalling about 750 mm of water. Harvesting was done manually on two dates, 30 October and 22 November.

Seed cotton yield (SCY) was calculated from the plot harvest and expressed as kg ha^{-1}. Ginning yield (GY) was determined as the percentage ratio of lint weight to seed cotton weight. Hundred-seed weight (HSW) was measured in grams on a precision balance. Fiber length (LU) was measured with an HVI M-1000 instrument at the fiber-quality laboratory of the GAP International Agricultural Research and Training Center.

Statistical Analysis

The data were first analyzed with the model $Y_{ij} = \mu + B_j + G_i + \varepsilon_{ij}$ for a randomized complete block design. The genotype sum of squares was orthogonally partitioned into parents, F_1 hybrids, and the parents-versus-F_1 contrast. The variation among the F_1 hybrids was then partitioned into line, tester, and line × tester sources. The general combining ability (GCA) of the parents and the specific combining ability (SCA) of the hybrids were computed following the principles of Kempthorne (1957), using the replicated observations of the eight F_1 hybrids. The proportional contributions of the line, tester, and interaction sums of squares to the total sum of squares among the F_1 hybrids are also reported.

The combining-ability effects were interpreted as fixed for this specific set of parents. In addition, to characterize the gene action, additive (σ^2A) and dominance (σ^2D) variance components were estimated from the line and line × tester mean squares following the line × tester genetic-parameter formulas of Kempthorne (1957) and Singh and Chaudhary (1985); these were combined with the error variance

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

(σ^2E) to obtain the genotypic ($\sigma^2G = \sigma^2A + \sigma^2D$) and phenotypic ($\sigma^2F = \sigma^2G + \sigma^2E$) variances and the broad- ($h^2g = \sigma^2G/\sigma^2F$) and narrow-sense ($h^2d = \sigma^2A/\sigma^2F$) heritabilities. Because these estimates were obtained in a single environment, the genotype × environment component is confounded with the genetic variances, so the heritabilities—particularly in the broad sense—represent upper-bound, preliminary values for this parent set.

Mid-parent heterosis (Ht) was calculated as $Ht = [(F_1 - MP)/MP] \times 100$ and better-parent heterosis (Hb) as $Hb = [(F_1 - BP)/BP] \times 100$. For traits with a significant genotype effect, means were compared using Fisher's protected least significant difference (LSD) test ($\alpha = 0.05$). Heterosis values were tested with t-tests using the standard errors of the mid- and better-parent comparisons. Homogeneity of variances was confirmed for all traits by the Brown–Forsythe test ($p > 0.66$). A deviation from normality was detected in the 100-seed-weight residuals (Shapiro–Wilk $p = 0.003$); however, since logarithmic and Box–Cox transformations did not change the underlying pattern of significance, results are presented on the original scale for interpretability. Computations were performed in Python 3.12 using NumPy 2.3.5, pandas 2.2.3, and SciPy 1.17.0.

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of Variance and Genotype Means

The genotype effect was significant for all four traits ($p < 0.001$; Table 2). The contrast between parents and F_1 hybrids was significant at $p < 0.001$ for SCY and GY and at $p < 0.01$ for HSW, but not significant for LU ($p = 0.061$). These results indicate that, on average, the hybrids differed from the parents in yield and some seed traits but did not clearly differ from the overall parental mean in fiber length. The line effect was significant for SCY, HSW, and LU; the tester effect for SCY and GY; and the line × tester interaction for SCY and HSW. In recent cotton studies the relative importance of GCA and SCA has likewise varied among traits, with both additive and non-additive effects contributing to yield and fiber traits (Yaşar, 2018; Makhdoom et al., 2019; Abdel-Aty et al., 2023; Abdelghany et al., 2024; Gören & Canavar, 2024).

Table 2. Analysis of variance for parents and F_1 hybrids (mean squares)

Source of variation	DF	SCY	GY	HSW	LU
Replication	2	43343.700	0.022	0.038	0.041
Genotype	13	3090098.000***	3.175***	0.657***	7.644***
Parents	5	2593353.300***	5.205***	0.620***	18.929***
Parents vs F_1	1	21289111.200***	9.728***	0.832**	0.495
F_1 hybrids	7	845056.600***	0.788**	0.659***	0.605**
Line (GCA)	3	1330457.600***	0.368	0.830***	1.037***
Tester (GCA)	1	124904.600***	3.330***	0.052	0.132
Line × tester (SCA)	3	599706.300***	0.362	0.690***	0.331
Error	26	8040.500	0.169	0.068	0.129
CV (%)	–	1.86	0.95	2.70	1.15

** $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. SCY: seed cotton yield; GY: ginning yield; HSW: 100-seed weight; LU: fiber length; GCA: general combining ability; SCA: specific combining ability; CV: coefficient of variation; DF: degrees of freedom.*

Seed cotton yield ranged from 2,760.30 to 6,156.50 kg ha^{-1} (Table 3). MAY 404 × Bahar 14 (6,156.50 kg ha^{-1}) and MAY 404 × Giza 45 (6,060.20 kg ha^{-1}) formed the same upper statistical group. The highest GY was recorded in the parent Zena 1010 (44.32%); among the F_1 hybrids, DP 499 × Giza 45 (44.11%) and Özaltın 404 × Giza 45 (43.95%) stood out. For 100-seed weight, the parent MAY 404 (10.32 g) and the hybrid Özaltın 404 × Bahar 14 (10.30 g) were in the top group. For fiber length, the parents Bahar 14 (34.54 mm) and Giza 45 (34.05 mm) had the highest values, while the hybrids ranged from 30.56 to 31.70 mm. This shows that the yield advantage of the interspecific hybrids was not accompanied by fiber length at the level of the superior parent, reflecting the difficulty of combining yield and fiber quality in one combination and the environmental sensitivity of fiber traits (Yaşar, 2018; Shahzad et al., 2019; Yaşar, 2023; Istipliler et al., 2024; Çınar & Ünay, 2025).

Table 3. Means of parents and F_1 hybrids and Fisher LSD groups

Genotype / hybrid		SCY (kg ha^{-1})	GY (%)	HSW (g)	LU (mm)
Giza 45 × Giza 45	1 × 1	2847.30 f	41.35 g	10.21 a	34.05 a
Özaltın 404 × Özaltın 404	2 × 2	4428.00 e	42.10 ef	9.21 bc	29.23 e
DP 499 × DP 499	3 × 3	4437.30 e	41.37 g	10.07 a	29.19 e
Bahar 14 × Bahar 14	4 × 4	2760.30 f	41.76 fg	9.62 b	34.54 a
Zena 1010 × Zena 1010	5 × 5	4718.20 d	44.32 a	9.42 b	29.68 e
MAY 404 × MAY 404	6 × 6	4752.90 d	43.93 ab	10.32 a	29.72 e
Özaltın 404 × Giza 45	2 × 1	5752.20 b	43.95 ab	9.48 b	30.85 cd
Özaltın 404 × Bahar 14	2 × 4	4699.00 d	43.61 bc	10.30 a	30.56 d
DP 499 × Giza 45	3 × 1	4831.80 d	44.11 ab	10.16 a	31.24 bc
DP 499 × Bahar 14	3 × 4	5236.30 c	42.68 de	9.36 bc	31.63 b
Zena 1010 × Giza 45	5 × 1	5361.80 c	43.63 abc	8.92 c	31.68 b
Zena 1010 × Bahar 14	5 × 4	5337.10 c	43.20 cd	9.22 bc	30.97 cd
MAY 404 × Giza 45	6 × 1	6060.20 a	43.57 bc	9.35 bc	31.68 b
MAY 404 × Bahar 14	6 × 4	6156.50 a	42.79 d	9.40 b	31.70 b
$LSD_{0.05}$		150.50	0.689	0.438	0.602

Codes are given in Table 1; 1 × 1 – 6 × 6 denote parents and differently coded combinations denote F_1 hybrids. Within a column, means with no common letter differ at $p < 0.05$ by Fisher's protected LSD test.

General Combining Ability (GCA) and Specific Combining Ability (SCA)

Among the lines, MAY 404 had the highest positive GCA effect for SCY (+679.00) and LU (+0.40) (Table 4). Özaltın 404 had the highest GCA effect for GY (+0.34), and DP 499 was also positive for HSW (+0.23). Among the testers, Giza 45 was positive for SCY (+72.10) and GY (+0.37), while Bahar 14 had an equal-magnitude negative GCA effect for the same traits. Because the line main effect for GY was not significant, the small numerical GCA differences among lines for this trait were not treated as a strong selection criterion on their own.

Of the sum of squares among the F_1 hybrids, the line source accounted for 67.47% for SCY, 54.00% for HSW, and 73.42% for LU, whereas the tester source accounted for the largest share for GY (60.34%). The line × tester interaction contributed 30.41% for SCY and 44.87% for HSW. This distribution indicates that, within the present parent set, line selection is important for yield and fiber length, tester selection for ginning yield, and both the line and the specific combination for 100-seed weight. These percentages are not genetic variance components but the within-trial distribution of the sum of squares among F_1 hybrids; the estimated genetic variance components are given in Table 7.

Table 4. Parental GCA effects and proportional contributions to the sum of squares among F_1 hybrids

Parent / source	SCY[1]	GY	HSW	LU
1 Giza 45 (tester)	+72.10	+0.37	−0.05	+0.07
2 Özaltın 404 (line)	−203.80	+0.34	+0.37	−0.58
3 DP 499 (line)	−395.30	−0.05	+0.23	+0.14
4 Bahar 14 (tester)	−72.10	−0.37	+0.05	−0.07
5 Zena 1010 (line)	−79.90	−0.03	−0.45	+0.04
6 MAY 404 (line)	+679.00	−0.26	−0.15	+0.40
Line contribution (%)	**67.47**	**19.98**	**54.00**	**73.42**
Tester contribution (%)	**2.11**	**60.34**	**1.13**	**3.12**
Line × tester contribution (%)	**30.41**	**19.68**	**44.87**	**23.46**

GCA effects were computed from the replicated data of the eight F_1 hybrids. [1] For SCY, GCA effects are in kg ha^{-1}; the contribution rows are percentages (%). Contribution percentages are the ratios of the line, tester, and line × tester sums of squares to the total sum of squares among the F_1 hybrids for each trait.

Because the SCA effect was significant for SCY and HSW, hybrid-level interpretation is limited to these two traits (Table 5). For SCY, the highest positive SCA effect was in Özaltın 404 × Giza 45 (+454.40). DP 499 × Bahar 14 (+274.40) and MAY 404 × Bahar 14 (+120.30) also showed positive and significant SCA effects. MAY 404 × Bahar 14 is especially noteworthy because it combines a positive SCA effect

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

with a high mean yield, whereas the high yield of MAY 404 × Giza 45, despite its negative SCA effect, stemmed from the strong GCA of MAY 404. For HSW, DP 499 × Giza 45 (+0.45) and Özaltın 404 × Bahar 14 (+0.37) had the highest positive SCA effects. Earlier studies have noted that high mean performance should be judged together with the appropriate GCA/SCA effects, and that specific crosses can be as important as a parent's overall contribution for fiber traits (Braden et al., 2009; Berger et al., 2012; Campbell et al., 2016; Queiroz et al., 2021; Abdel-Aty et al., 2023; Polat et al., 2025).

Table 5. Specific combining ability (SCA) effects of the F_1 hybrids

F_1 hybrid		SCY	GY	HSW	LU
Özaltın 404 × Giza 45	2 × 1	+454.40***	−0.20	−0.37***	+0.07
Özaltın 404 × Bahar 14	2 × 4	−454.40***	+0.20	+0.37***	−0.07
DP 499 × Giza 45	3 × 1	−274.40***	+0.34	+0.45***	−0.27
DP 499 × Bahar 14	3 × 4	+274.40***	−0.34	−0.45***	+0.27
Zena 1010 × Giza 45	5 × 1	−59.70	−0.16	−0.10	+0.28
Zena 1010 × Bahar 14	5 × 4	+59.70	+0.16	+0.10	−0.28
MAY 404 × Giza 45	6 × 1	−120.30***	+0.02	+0.02	−0.09
MAY 404 × Bahar 14	6 × 4	+120.30***	−0.02	−0.02	+0.09

**** $p < 0.001$. Because the overall line × tester term for GY and LU was not significant ($p > 0.05$), the individual SCA values in these columns were not interpreted inferentially.*

Genetic Components and Heritability

The additive and dominance variance components and the broad- and narrow-sense heritabilities are presented in Table 6. Dominance variance exceeded additive variance for seed cotton yield (σ^2D = 786,007 versus σ^2A = 487,168), 100-seed weight (0.765 versus 0.094) and ginning yield (0.291 versus 0.004), indicating that non-additive gene effects predominated in the inheritance of these traits within the present parent set. This is consistent with the significant line × tester (SCA) mean squares for seed cotton yield and 100-seed weight (Table 2) and with reports that seed cotton yield is governed largely by non-additive effects in cotton line × tester and diallel studies (Jenkins et al., 2009; Ekinci & Başbağ, 2015; Polat et al., 2025). For ginning yield, the very low additive estimate should be read with caution, because the additive component here is derived from the line (female) effect, whereas the significant combining-ability source for this trait was the tester (Table 2).

In contrast, additive variance exceeded dominance variance for fiber length (σ^2A = 0.470 versus σ^2D = 0.161), in agreement with the highly significant line mean square and the non-significant line × tester term for this trait (Table 2). Broad-sense heritabilities were high for all traits (h^2g = 0.67–0.99), whereas narrow-sense heritabilities differed markedly: fiber length had the highest value (h^2d = 0.56), followed by seed cotton yield (0.38), while 100-seed weight (0.10) and ginning yield (0.01) were very low. The large gap between broad- and narrow-sense heritabilities for yield, ginning yield and 100-seed weight reflects the dominance-dominated architecture of these traits and implies that direct phenotypic selection in early segregating generations (F_2–F_3) would be inefficient; strategies that exploit non-additive variance—hybrid breeding or reciprocal recurrent selection with selection delayed to later generations—are more suitable. The comparatively high narrow-sense heritability of fiber length indicates that early-generation pedigree or mass selection can be effective for this trait and supports the transfer of fiber-length superiority into homozygous lines. Comparable contrasts between additively controlled fiber traits and non-additively controlled yield have been reported in upland and interspecific cotton (Jenkins et al., 2009; Liu et al., 2011; Gören & Canavar, 2024). Because σ^2E here represents only the within-trial error of a single environment, the genotype × environment interaction is confounded with the genetic components; the broad-sense heritabilities in particular are likely overestimated, so these values should be treated as preliminary and confirmed under multi-environment testing (Liu et al., 2011).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Table 6. Estimated genetic variance components and heritabilities for the traits examined

Genetic parameter	SCY	GY	HSW	LU
Genotypic variance (σ^2G)	1,273,175	0.295	0.858	0.631
Additive variance (σ^2A)	487,168	0.004	0.094	0.470
Dominance variance (σ^2D)	786,007	0.291	0.765	0.161
Environmental variance (σ^2E)	10,201	0.144	0.116	0.211
Phenotypic variance (σ^2F)	1,283,376	0.439	0.974	0.842
Broad-sense heritability (h^2g)	0.992	0.673	0.881	0.750
Narrow-sense heritability (h^2d)	0.380	0.008	0.096	0.559

σ^2A was estimated from the line component and σ^2D from the line × tester component of the line × tester analysis (Kempthorne, 1957; Singh & Chaudhary, 1985); σ^2E is the error variance. $\sigma^2G = \sigma^2A + \sigma^2D$; $\sigma^2F = \sigma^2G + \sigma^2E$; $h^2g = \sigma^2G/\sigma^2F$; $h^2d = \sigma^2A/\sigma^2F$. SCY components are in kg² ha⁻², consistent with Tables 2–3. Estimates come from a single environment and are therefore preliminary.

Heterosis and Breeding Implications

All eight hybrids significantly exceeded both the mid-parent and the better parent for seed cotton yield (Table 7). Mid-parent heterosis ranged from 30.74% to 63.88% and better-parent heterosis from 6.12% to 29.90%. MAY 404 × Bahar 14 had the highest mid-parent heterosis (63.88%), while Özaltın 404 × Giza 45 had the highest better-parent heterosis (29.90%). Yield heterosis of this magnitude is associated with the potential of interspecific cotton material to broaden the genetic base and generate new recombinations. It has been reported that high hybrid performance may not be explained by parental means alone and that specific combinations require separate evaluation (Zhang et al., 2016; Bourgou et al., 2022, 2023).

For GY, the hybrids Özaltın 404 × Giza 45, Özaltın 404 × Bahar 14, DP 499 × Giza 45, and DP 499 × Bahar 14 showed positive mid- and better-parent heterosis. For HSW, the only hybrid with positive and significant heterosis in both comparisons was Özaltın 404 × Bahar 14. For fiber length, all hybrids showed negative better-parent heterosis: the fiber length of the interspecific F_1 hybrids stayed above that of the short-staple *G. hirsutum* L. lines but did not reach that of the long-staple *G. barbadense* L. testers. This pattern shows that no single combination is superior for all target traits and that multi-trait family selection is needed in later generations. Rehman et al. (2020), Lamlom et al. (2024), Çınar and Ünay (2025), and Polat et al. (2025) likewise reported that evaluating yield and fiber traits together is more appropriate than single-trait selection.

Table 7. Mid-parent heterosis (Ht) and better-parent heterosis (Hb) in the F_1 hybrids, %

F_1 Hybrid		SCY Ht	SCY Hb	GY Ht	GY Hb	HSW Ht	HSW Hb	LU Ht	LU Hb
Özaltın 404 × Giza 45	2 × 1	58.13***	29.90***	5.34***	4.40***	−2.40	−7.15**	−2.49**	−9.39***
Özaltın 404 × Bahar 14	2 × 4	30.74***	6.12**	4.00***	3.59***	9.42***	7.10**	−4.15***	−11.50***
DP 499 × Giza 45	3 × 1	32.66***	8.89***	6.66***	6.63***	0.20	−0.49	−1.22	−8.26***
DP 499 × Bahar 14	3 × 4	45.50***	18.00***	2.69***	2.21*	−4.94*	−7.05**	−0.75	−8.43***
Zena 1010 × Giza 45	5 × 1	41.75***	13.64***	1.86*	−1.55	−9.05***	−12.57***	−0.58	−6.95***
Zena 1010 × Bahar 14	5 × 4	42.73***	13.12***	0.37	−2.53**	−3.13	−4.16	−3.56***	−10.34***
MAY 404 × Giza 45	6 × 1	59.48***	27.50***	2.18**	−0.83	−8.91***	−9.43***	−0.65	−6.97***
MAY 404 × Bahar 14	6 × 4	63.88***	29.53***	−0.12	−2.59**	−5.73**	−8.94***	−1.33	−8.21***

** $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. A positive value means the hybrid exceeds the corresponding parental comparison; a negative value means it falls short.*

Three patterns stand out for breeding. MAY 404 × Bahar 14 combines the highest SCY, a positive SCA effect, and high heterosis. Özaltın 404 × Giza 45 is a balanced candidate for lint yield and ginning yield, with a high positive SCA. Özaltın 404 × Bahar 14 stands out for 100-seed weight through its positive SCA and positive better-parent heterosis. In contrast, direct F_1 superiority for fiber length was not achieved, and the low narrow-sense heritabilities of yield and its components reinforce that gains in these traits will depend on exploiting non-additive variance rather than on early phenotypic selection. Yield, ginning yield, and fiber length should therefore be monitored together in the F_2 and later generations of these hybrids, with long-fiber individuals selected from high-yielding families. Because genotype and environmental effects may weigh differently on yield and fiber traits, the present single-

environment findings should be read as a basis for preliminary selection of parents and hybrids rather than as a recommendation of commercial cultivars (Shahzad et al., 2019; Istipliler et al., 2024).

CONCLUSIONS

Significant differences were found among the cotton genotypes for seed cotton yield, ginning yield, 100-seed weight, and fiber length. The line effect was significant for SCY, HSW, and LU; the tester effect for SCY and GY; and the line × tester interaction for SCY and HSW. MAY 404 was the most suitable general combiner line for SCY and LU. Among the hybrids, MAY 404 × Bahar 14 combined a high mean yield, a positive SCA effect, and high yield heterosis; Özaltın 404 × Giza 45 had the highest positive SCA effect and the highest better-parent heterosis for SCY; and Özaltın 404 × Bahar 14 was notable for 100-seed weight. None of the F_1 hybrids surpassed the long-fiber parents for fiber length. Variance-component estimates indicated that seed cotton yield, ginning yield, and 100-seed weight were governed mainly by non-additive gene effects with low narrow-sense heritability, whereas fiber length showed predominantly additive control and the highest narrow-sense heritability; selection for fiber length can therefore be effective in early generations, while yield improvement will rely more on exploiting non-additive variance through hybrid or recurrent-selection strategies.

REFERENCES

Abdel-Aty, M. S., Sorour, F. A., Yehia, W. M. B., Kotb, H. M. K., Abdelghany, A. M., Lamlom, S. F., Shah, A. N., & Abdelsalam, N. R. (2023). Estimating the combining ability and genetic parameters for growth habit, yield, and fiber quality traits in some Egyptian cotton crosses. *BMC Plant Biology*, 23, 121. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04131-z

Abdelghany, A. M., El-Banna, A. A. A., Lamlom, S. F., El-Sorady, G. A., Salama, E. A. A., Ren, H., Shaibu, A. S., & Yehia, W. M. B. (2024). Combining ability of Egyptian cotton (*Gossypium barbadense* L.) reveals genetic potential for improved yield and fiber quality. *Journal of Cotton Research*, 7, 12. https://doi.org/10.1186/s42397-024-00174-1

Basal, H., & Turgut, I. (2003). Heterosis and combining ability for yield components and fiber quality parameters in a half diallel cotton (*Gossypium hirsutum* L.) population. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(4), 207–212.

Basal, H., Ünay, A., Canavar, Ö., & Yavaş, İ. (2009). Combining ability for fiber quality parameters and within-boll yield components in intraspecific and interspecific cotton populations. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(2), 364–374. https://doi.org/10.5424/sjar/2009072-428

Berger, G., Hague, S., & Smith, C. W. (2012). Diallel analysis of fiber traits for extra-long staple cotton progeny. *Crop Science*, 52(2), 683–689. https://doi.org/10.2135/cropsci2010.11.0648

Bourgou, L., Dever, J. K., Sheehan, M., Kelly, C. M., Diané, S. K., & Sawadogo, M. (2022). Diallel crosses of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from Burkina Faso and Texas A&M AgriLife Research—1: Analysis of agronomic traits to improve elite varieties from Burkina Faso. *Agronomy*, 12(4), 939. https://doi.org/10.3390/agronomy12040939

Bourgou, L., Dever, J. K., Sheehan, M., Kelly, C. M., Diané, S. K., & Sawadogo, M. (2023). Diallel crosses of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)—Enhancement of fiber properties in future cultivars for Burkina Faso. *Agronomy*, 13(12), 2864. https://doi.org/10.3390/agronomy13122864

Braden, C. A., Smith, C. W., & Hequet, E. F. (2009). Combining ability for fiber length in near-long-staple upland cotton. *Crop Science*, 49(3), 756–762. https://doi.org/10.2135/cropsci2008.07.0418

Campbell, B. T., Greene, J., Wu, J., & Jones, D. C. (2016). Genetic variation for agronomic and fiber quality traits in a population derived from high-quality cotton germplasm. *Crop Science*, 56(4), 1689–1697. https://doi.org/10.2135/cropsci2015.10.0657

Çınar, V. M., & Ünay, A. (2025). Combining suitable brown lint color, fiber quality, and yield in F_2 cotton hybrids. Industrial Crops and Products, 224, 119674. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119674

Ekinci, R., & Başbağ, S. (2015). Combining Ability for Yield and its Components in Diallel Crosses of Cotton, *Not Sci Biol*, 2015, 7(1):72-80. https://doi.org/10.15835/nsb.7.1.9430.

Gören, H. K., & Canavar, Ö. (2024). Genetic analysis of yield and fiber quality traits in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under full and deficit irrigation conditions using full diallel method. *Euphytica*, 220, 115. https://doi.org/10.1007/s10681-024-03348-9

Istipliler, D., Ekizoğlu, M., Çakaloğulları, U., & Tatar, Ö. (2024). The impact of environmental variability on cotton fiber quality: A comparative analysis of primary cotton-producing regions in Türkiye. *Agronomy*, 14(6), 1276. https://doi.org/10.3390/agronomy14061276

Jenkins, J. N., McCarty, J. C., Wu, J., & Gutiérrez, O. A. (2009). Genetic variance components and genetic effects among eleven diverse upland cotton lines and their F_2 hybrids. *Euphytica*, 167(3), 397–408. https://doi.org/10.1007/s10681-009-9902-y

Karademir, C., Karademir, E., Ekinci, R., & Gencer, O. (2009). Combining ability estimates and heterosis for yield and fiber quality of cotton in line × tester design. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37(2), 228–233. https://doi.org/10.15835/nbha3723071

Kempthorne, O. (1957). An introduction to genetic statistics. John Wiley & Sons.

Lamlom, S. F., Yehia, W. M. B., Kotb, H. M. K., Abdelghany, A. M., Shah, A. N., Salama, E. A. A., Abdelhamid, M. M. A., & Abdelsalam, N. R. (2024). Genetic improvement of Egyptian cotton (*Gossypium barbadense* L.) for high yield and fiber quality properties under semi-arid conditions. Scientific Reports, 14, 7723. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57676-w

Liu, S., Llewellyn, D. J., Stiller, W. N., Jacobs, J., Lacape, J.-M., & Constable, G. A. (2011). Heritability and predicted selection response of yield components and fibre properties in an inter-specific derived RIL population of cotton. *Euphytica*, 178(3), 309–320. https://doi.org/10.1007/s10681-010-0289-6

Makhdoom, K., Khan, N. U., Khan, S. U., Gul, R., Bibi, Z., Gul, S., Ali, S., Khan, S. M., & Ali, N. (2019). Genetic effects assessment through line × tester combining ability for development of promising hybrids based on quantitative traits in *Gossypium hirsutum* L. *Journal of Agricultural Sciences*, 25(1), 47–61. https://doi.org/10.15832/ankutbd.538997

Munir, S., Qureshi, M. K., Shahzad, A. N., Manzoor, H., Shahzad, M. A., Aslam, K., & Athar, H.-u.-R. (2018). Assessment of gene action and combining ability for fibre and yield contributing traits in interspecific and intraspecific hybrids of cotton. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 54(2), 71–77. https://doi.org/10.17221/54/2017-CJGPB

Polat, F., Çınar, V. M., & Ünay, A. (2025). Transgressive segregation in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) affects the combining ability and heterotic patterns. *Euphytica*, 221, 78. https://doi.org/10.1007/s10681-025-03534-3.

Queiroz, D. R., Farias, F. J. C., da Silva, E. F., Elias, J. J., Teodoro, L. P. R., & Teodoro, P. E. (2021). Using combining ability as a strategy of upland cotton selection for high fiber quality. *Euphytica*, 217, 184. https://doi.org/10.1007/s10681-021-02917-6

Rehman, A., Mustafa, N., Du, X., & Azhar, M. T. (2020). Heritability and correlation analysis of morphological and yield traits in genetically modified cotton. *Journal of Cotton Research*, 3, 23. https://doi.org/10.1186/s42397-020-00067-z

Salama, E. A. A., Farid, M. A., El-Mahalawy, Y. A., El-Akheder, A. A. A., Aboshosha, A. A., Fayed, A. M., Yehia, W. M. B., & Lamlom, S. F. (2024). Exploring agro-morphological and fiber traits diversity in cotton (*Gossypium barbadense* L.). *BMC Plant Biology*, 24, 403. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04912-0

Shahzad, K., Li, X., Qi, T., Guo, L., Tang, H., Zhang, X., Wang, H., Zhang, M., Zhang, B., Qiao, X., Xing, C., & Wu, J. (2019). Genetic analysis of yield and fiber quality traits in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivated in different ecological regions of China. Journal of Cotton Research, 2, 14. https://doi.org/10.1186/s42397-019-0031-4

Singh, R. K., & Chaudhary, B. D. (1985). Biometrical methods in quantitative genetic analysis (Rev. ed.). Kalyani Publishers.

Yaşar, M. (2018). Genetic analysis of yield and fiber technological properties through interspecies (*Gossypium hirsutum* L. and *Gossypium barbadense* L.) hybridization in cotton [Doctoral dissertation]. Dicle University Institute of Science, Diyarbakır.

Yaşar, M. (2023). Yield and fiber quality traits of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars analyzed by biplot method. *Journal of King Saud University—Science*, 35(4), 102632. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102632

Zhang, J., Wu, M., Yu, J., Li, X., & Pei, W. (2016). Breeding potential of introgression lines developed from interspecific crossing between upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and *Gossypium barbadense* L. Heterosis, combining ability and genetic effects. *PLOS ONE*, 11(1), e0143646. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143646

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SÜT SIĞIRCILIĞINDA OTOMATİK SAĞIM SİSTEMLERİNDE ROBOT YEMLEMESİNİN SAĞIM YÖNETİMİ VE SÜRÜ PERFORMANSINA ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKDAĞ

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü

ahmeta@ogu.edu.tr – https://orcid.org/0000-0002-0154-7839

ÖZET

Otomatik sağım sistemleri ve/veya sağım robotları süt sığırcılığında işgücünün minimize edilmesi ve süt veriminin artmasına neden olan araçlar olarak giderek yaygınlaşmaktadır. İnekler sağım robotu bulunan işletmelerde sağıma gönüllü olarak katılırlar ve bu konuda en güçlü teşvik sağım sırasında yem tüketecek olmalarıdır. İneklere sağım sırasında robot tarafından çoğunlukla lezzetli kesif yemler, bazen de kaba-kesif yem karışımları sunulmaktadır. Bu robotik yemleme hayvanların sağım robotunu ziyaret etme sıklığını ve motivasyonunu etkilemektedir. Hayvanlar tarafından olumlu bir deneyim olarak algılanan sağım sırasındaki yem tüketimi, sistemin ve üretimin sürdürülebilir ve yönetilebilir olması için içeriği ve miktarı özenle ayarlanması gereken bir konudur. Robotta sunulan yemin ve yem miktarının sağım sıklığı ve hayvan trafiği üzerine etkileri, yemin lezzet ve formu, robotta sunulan yem ile hayvanların yaşam alanlarında günlük tüm besin madde ihtiyaçlarını karşılamak üzere sunulan kaba-kesif yem karmaları arasındaki denge, aşırı robot yemi tüketiminin rumen sağlığı açısından riskleri, laktasyon dönemine özel robot yemleme programları ve bireysel yemleme sistemleri otomatik sağım sistemlerinde robot yemlemesinin sağım yönetimi ve sürü performansına etkileri açısından dikkat edilmesi gereken konulardır. Sonuç olarak süt sığırcılığında bir devrim niteliğinde olan ve işgücünü azaltarak süt veriminin iyileşmesine/korunmasına sebep olan otomatik sağım sistemleri günlük sağım sayısının yönetilmesi, sağım aralıklarının düzenlenmesi ve hayvan refahına uygun şekilde üretim yapılmasına olanak sağlarken, aşırı robot yemi tüketimi hayvanların ihtiyaçları için formüle edilen yem karışımlarını tüketmelerini olumsuz etkileyerek rumen sağlığını ve besleme dengesini bozabilir. Bu nedenle, otomatik sağım sistemiyle sağılan süt sığırlarının, günlük besin madde ihtiyaçlarını karşılamak için özenle hazırlanan karmaları ne denli tükettiklerinin gözlemlendiği, laktasyon dönemi ve verim seviyelerinin dikkate alındığı, robotik yemlemenin hem hayvan sağlığı hem de sağım yönetimi üzerine etkilerinin incelendiği kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Otomatik sağım sistemleri, robotik yemleme, süt sığırcılığı

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

EFFECTS OF ROBOTIC FEEDING ON MILKING MANAGEMENT AND HERD PERFORMANCE IN AUTOMATIC MILKING SYSTEMS FOR DAIRY CATTLE

ABSTRACT

Automatic milking systems and/or milking robots are becoming increasingly widespread in dairy farming as tools that minimize labor requirements and increase milk yield. In farms equipped with milking robots, cows voluntarily participate in milking, with the intake of feed during milking serving as the strongest incentive. During milking, cows are typically offered palatable concentrates, and sometimes mixtures of forages and concentrates, by the robot. This robotic feeding influences the frequency with which animals visit the milking robot and their motivation to do so. Feed intake during milking, which the animals perceive as a positive experience, involves composition and quantity that must be carefully adjusted to ensure the system and production remain sustainable and manageable. Key considerations regarding robotic feeding in automatic milking systems include the effects of the amount and frequency of feed provided by the robot on milking frequency and animal traffic, feed palatability and form, the balance between robot-dispensed feed and the forage-concentrate mixtures provided in the animals' living areas to meet total daily nutrient requirements; the risks to rumen health associated with excessive feed intake during milking, and lactation-specific feeding programs and individual feeding systems. In conclusion, while automatic milking systems, which represent a revolution in dairy farming by reducing labor and improving or maintaining milk yield, facilitate the management of daily milking frequency, the regulation of milking intervals, and production practices aligned with animal welfare, excessive intake of "robotic feed" can disrupt rumen health and nutritional balance by negatively affecting the intake of feed mixtures formulated to meet the animals' specific needs. Therefore, there is a need for comprehensive research on dairy cows milked via automatic systems that monitor the intake of carefully prepared diets designed to meet daily nutrient requirements, accounts for lactation stages and yield levels, and examines the effects of robotic feeding on both animal health and milking management.

Key Words: Automatic milking systems, dairy cattle, robotic feeding

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

YEM BİTKİLERİNDE HASAT KAYIPLARI: NEDENLER, BOYUTLAR VE AZALTMA STRATEJİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Zübeyir AĞIRAĞAÇ
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Van, Türkiye
E-posta: zubeyiragiragac@yyu.edu.tr ORCID ID: 0000-0003-1414-1472
Talha KİTAPÇI
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Van, Türkiye
E-posta: talhakitapci@hotmail.com ORCID ID: 0000-0002-7107-1135
Prof. Dr. Şeyda ZORER ÇELEBİ
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Van, Türkiye
E-posta: seydazorer@yyu.edu.tr ORCID ID: 0000-0003-1278-1994

ÖZET

Yem bitkileri, sürdürülebilir hayvancılık sistemlerinin temelini oluşturmakta ve işletmelerdeki toplam üretim maliyetlerinin yaklaşık %70'lik devasa bir bölümünü tek başına karşılamaktadır. Güncel verilere göre Türkiye'de yıllık 43 milyon tonun üzerinde kaliteli kaba yem açığı bulunmaktadır. Bu nedenle, mevcut tarımsal üretim potansiyeli dahilinde hasat kayıplarının en aza indirilmesi, yeni üretim alanları açmaktan çok daha ekonomik, akılcı ve sürdürülebilir bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Yem bitkilerinde hasat süreci; biçme, soldurma, tırmıklama, balyalama ve depolama gibi birbirini izleyen mekanik aşamalardan oluşmaktadır. Bu süreçler boyunca önemli düzeyde kuru madde, ham protein ve sindirilebilirlik kayıpları yaşanmaktadır. Özellikle yonca gibi yaprak oranı yüksek baklagillerde meydana gelen mekanik yaprak dökülmeleri, yemin besleme değerini doğrudan ve hızla düşürmektedir. En yüksek kayıp oranları ise çoğunlukla tırmıklama ve balyalama aşamalarında görülmektedir. Meydana gelen bu kayıpların boyutları; hasat edilen bitkinin biyolojik özelliklerine, çevresel iklim şartlarına, seçilen hasat makinesinin yapısal özelliklerine, makine ayarlarına ve operatör deneyimine bağlı olarak şekillenmektedir.

Söz konusu hasat kayıplarını asgari düzeye indirmek için bitki fizyolojisine en uygun hasat zamanının hassasiyetle belirlenmesi ve makine ayarlarının titizlikle optimize edilmesi kesinlikle şarttır. Ayrıca günümüzde GPS destekli dümenleme sistemleri, yakın kızılötesi (NIR) sensörleri, insansız hava araçları ve yapay zekâ destekli gelişmiş karar sistemleri gibi yeni nesil hassas tarım teknolojilerinin üretim sürecine entegre edilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu yenilikçi uygulamalar sayesinde ekonomik kayıplar engellenerek, ülkenin kaba yem ihtiyacı sürdürülebilir biçimde karşılanabilmektedir.

Anahtar Kelimeler : Hasat kayıpları, hassas tarım teknolojileri, kaba yem, sürdürülebilir hayvancılık, yem bitkileri

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

YEM BİTKİLERİNDE HASAT KAYIPLARI: NEDENLER, BOYUTLAR VE AZALTMA STRATEJİLERİ

1. GİRİŞ

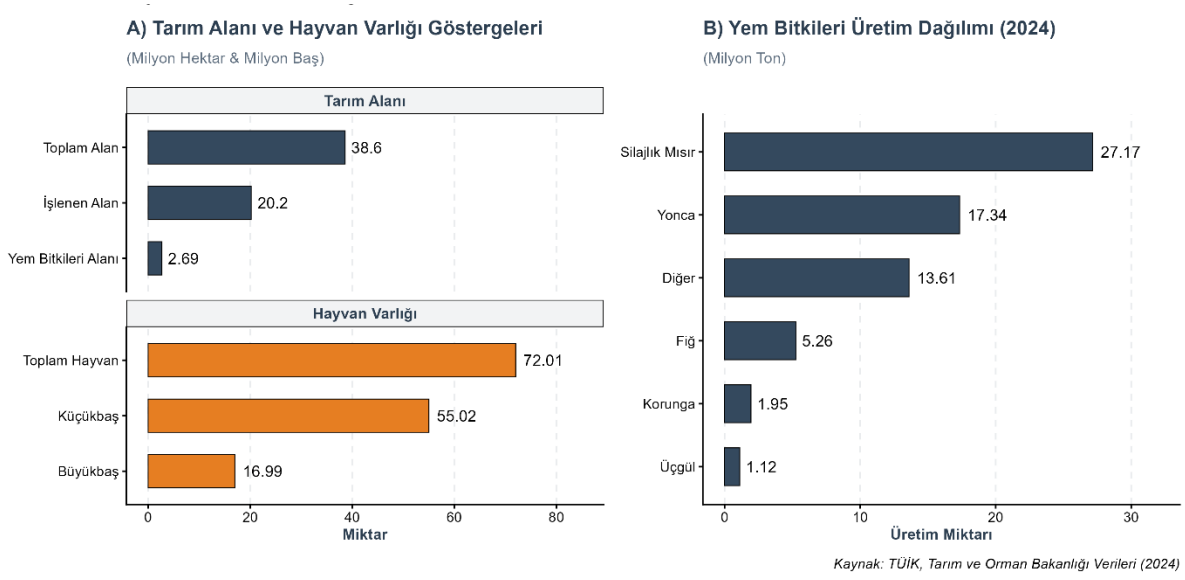
Yem bitkileri, hayvancılık işletmelerinde ekonomik, sürdürülebilir ve kaliteli kaba yem üretiminin temelini oluşturan stratejik tarla bitkileridir. Dünya genelinde artan nüfus, yükselen hayvansal protein talebi ve iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki baskıları, kaliteli kaba yem üretiminin önemini her geçen gün artırmaktadır. Ruminant hayvanların beslenmesinde enerji, protein, vitamin ve mineral gereksinimlerinin karşılanmasında kaliteli yem bitkileri vazgeçilmez bir rol üstlenirken, aynı zamanda yem maliyetlerinin azaltılmasına, hayvan sağlığının korunmasına ve süt ile et veriminin artırılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir hayvancılık sistemlerinin başarısı büyük ölçüde yüksek verimli ve kaliteli yem bitkileri üretimine bağlıdır (Nave, 2025),(Fuglie et al., 2021). Yem bitkileri yalnızca hayvan besleme açısından değil, tarımsal üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği bakımından da önemli ekolojik işlevlere sahiptir. Özellikle baklagil yem bitkileri biyolojik azot fiksasyonu sayesinde kimyasal azotlu gübre kullanımını azaltırken, çok yıllık yem bitkileri toprak organik maddesinin korunmasına, erozyonun önlenmesine, karbon depolanmasına ve biyolojik çeşitliliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bunun yanında yem bitkilerinin münavebe sistemlerinde kullanılması toprak yapısını iyileştirmekte, su kullanım etkinliğini artırmakta ve tarımsal üretim sistemlerinin iklim değişikliğine karşı dayanıklılığını güçlendirmektedir. Son yıllarda sürdürülebilir tarım yaklaşımlarında yem bitkileri, yalnızca yem kaynağı olarak değil aynı zamanda ekosistem hizmetleri sağlayan stratejik bitkiler olarak değerlendirilmektedir (Wróbel et al., 2025),(Sweetman et al., 2022). Hayvancılık işletmelerinde yem giderleri toplam üretim maliyetlerinin en büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle birim alandan elde edilen yem miktarının artırılması kadar, üretilen yemin kalite özelliklerinin korunması da büyük önem taşımaktadır. Yem bitkilerinde yüksek sindirilebilirlik, uygun ham protein içeriği ve düşük lif oranı, hayvan performansını doğrudan etkileyen temel kalite kriterleri arasında yer almaktadır. Ancak kaliteli yem üretimi yalnızca uygun çeşit seçimi ve başarılı yetiştiricilik uygulamalarına bağlı olmayıp, hasat zamanının doğru belirlenmesi ve hasat sürecinin etkin Görselde yönetilmesini de gerektirmektedir. Bitkinin uygun olmayan gelişme döneminde hasat edilmesi veya hasat işlemlerinin hatalı uygulanması, yem kalitesinde önemli düşüşlere ve besin maddesi kayıplarına neden olabilmektedir (Wróbel et al., 2025). Yem bitkilerinde hasat süreci, üretim zincirinin en kritik aşamalarından biridir. Hasat sırasında meydana gelen mekanik kayıplar, yaprak dökülmesi, biçim yüksekliğinin yanlış ayarlanması, makine kaynaklı kayıplar, kurutma sürecinde oluşan solunum kayıpları ve olumsuz hava koşulları nedeniyle ortaya çıkan kalite kayıpları, hem kuru madde verimini hem de yemin besleme değerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle yaprak oranı yüksek baklagil yem bitkilerinde mekanik işlemler sırasında meydana gelen yaprak dökülmeleri ham protein kayıplarını artırırken, uygun olmayan hasat zamanı ise sindirilebilirliğin azalmasına ve lif oranının yükselmesine neden olmaktadır. Bu kayıplar yalnızca biyolojik verimi azaltmakla kalmayıp, üreticilerin ekonomik gelirlerini de doğrudan olumsuz etkilemektedir (Wróbel et al., 2025). Son yıllarda hassas tarım uygulamaları, akıllı hasat makineleri, sensör teknolojileri, uzaktan algılama sistemleri ve veri destekli hasat yönetimi gibi teknolojik gelişmeler, yem bitkilerinde hasat kayıplarının azaltılması ve kalite kayıplarının en aza indirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bununla birlikte uygun hasat zamanı, doğru makine ayarları, operatör eğitimi ve etkili hasat sonrası yönetim uygulamaları da sürdürülebilir kaba yem üretiminin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Hasat sürecinde meydana gelen kayıpların azaltılması, aynı üretim alanından daha fazla kaliteli yem elde edilmesine olanak sağlayarak hem işletme ekonomisine hem de çevresel

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunmaktadır (Ponnampalam et al., 2025),(Nave, 2025). Bu derlemede yem bitkilerinde hasat sürecinde meydana gelen kuru madde ve kalite kayıplarının temel nedenleri, kayıpların boyutları, ekonomik ve besleme açısından oluşturduğu etkiler ile bu kayıpların azaltılmasına yönelik güncel teknolojiler ve yönetim stratejileri kapsamlı bir Görselde değerlendirilmiştir.

2. TÜRKİYE'DE YEM BİTKİLERİ: TÜİK VERİLERİ VE MEVCUT DURUM

Türkiye, sahip olduğu yaklaşık 38,6 milyon hektarlık tarım alanı ve farklı agroekolojik koşulları sayesinde çok sayıda yem bitkisinin yetiştirilmesine elverişli önemli bir üretim potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, 2024 yılı itibarıyla yem bitkileri ekim alanı 2,69 milyon hektar olup, bu alan toplam tarım alanlarının yaklaşık %7,0'ını, işlenen tarım alanlarının ise %13,3'ünü oluşturmaktadır (TÜİK, 2024). Son yıllarda yem bitkileri üretiminin artırılmasına yönelik destekleme politikaları, sertifikalı tohum kullanımının yaygınlaşması ve özellikle silajlık mısır yetiştiriciliğindeki gelişmeler sayesinde ekim alanlarında önemli artışlar sağlanmış olsa da, yem bitkilerinin toplam tarım alanı içerisindeki payı gelişmiş hayvancılık ülkeleriyle karşılaştırıldığında hâlen istenilen düzeyde değildir. Bu durum, artan hayvan varlığına bağlı olarak kaliteli kaba yem ihtiyacının karşılanmasını güçleştiren temel faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Türkiye'de yem bitkileri üretimi son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir. Özkurt ve Çınar (2020), 2014–2018 döneminde kuru ot bazında yem bitkileri üretiminin yaklaşık 10 milyon tondan 13 milyon tona yükseldiğini ve üretim miktarı bakımından silajlık mısır, yonca ve fiğin ilk üç sırada yer aldığını bildirmiştir. Aynı dönemde silajlık mısır ekim alanının 414.953 hektardan 472.642 hektara yükselmesi, buna karşılık yonca ve fiğ ekim alanlarında sınırlı azalmalar görülmesi, üretim deseninde silajlık mısırın giderek daha fazla önem kazandığını ortaya koymaktadır. Ayrıca yonca, korunga ve fiğ ekim alanlarının toplam yem bitkileri alanının yaklaşık %75'ini oluşturması, bu türlerin Türkiye'nin kaba yem üretimindeki stratejik konumunu göstermektedir (Özkurt & Çınar, 2020).

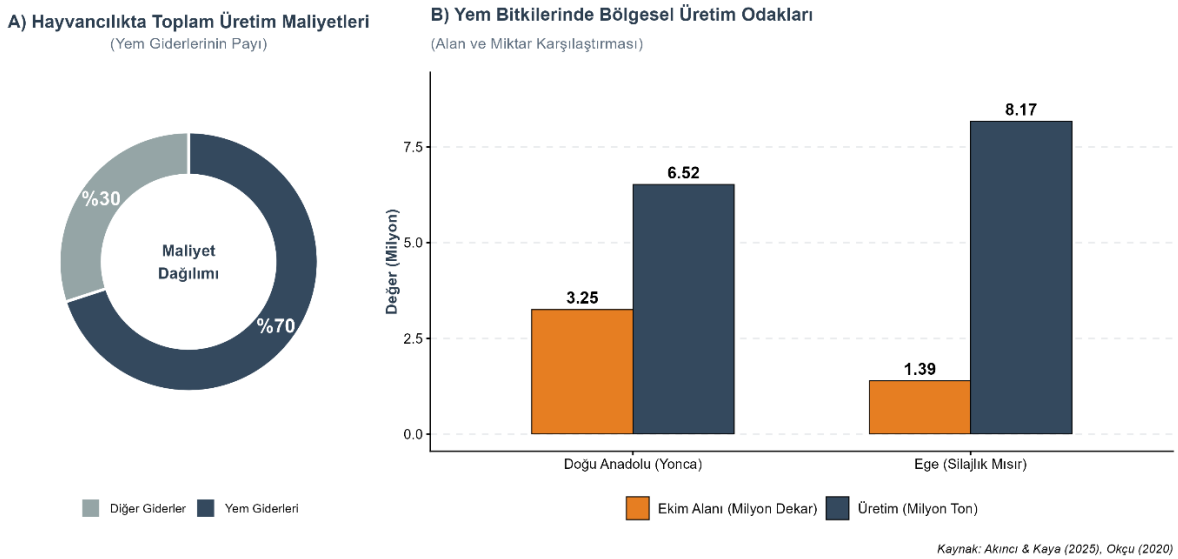


Görsel 1. Türkiye Tarımsal Göstergeleri ve Yem Bitkileri Üretim Profili

Güncel TÜİK verilerine göre ise 2024 yılında Türkiye'de toplam yem bitkileri üretimi yaklaşık 66,45 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Üretimin en büyük bölümünü 27,17 milyon ton (%40,9) ile silajlık mısır oluştururken, bunu 17,34 milyon ton (%26,1) ile yonca izlemiştir. Fiğ üretimi 5,26 milyon ton, korunga üretimi 1,95 milyon ton ve üçgül üretimi ise 1,12 milyon ton

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

olarak kaydedilmiştir. Böylece yalnızca silajlık mısır ve yonca, toplam yem bitkileri üretiminin yaklaşık %67'sini oluşturarak Türkiye'nin kaliteli kaba yem üretiminin temelini meydana getirmektedir (TÜİK, 2024). Özellikle süt sığırcılığı işletmelerinde yüksek verim ve kaliteli kaba yem ihtiyacının karşılanmasında bu iki tür belirleyici bir rol üstlenmektedir.



Kaynak: Akıncı & Kaya (2025), Okçu (2020)

Görsel 2. Hayvancılıkta Yem Ekonomisi ve Bölgesel Üretim Dinamikleri

Yem bitkileri üretimi bölgesel açıdan değerlendirildiğinde de önemli farklılıklar görülmektedir. Okçu (2020), Doğu Anadolu Bölgesi'nin yaklaşık 3,25 milyon dekar ekim alanı ve 6,52 milyon ton üretim ile yonca yetiştiriciliğinde ilk sırada yer aldığını bildirirken, Ege Bölgesi'nin ise 1,39 milyon dekar alanda yaklaşık 8,17 milyon ton silajlık mısır üretimiyle öne çıktığını belirtmiştir. Bu durum, yem bitkileri üretiminin iklim koşulları, sulama olanakları ve hayvancılık yoğunluğuna bağlı olarak bölgesel düzeyde önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yem bitkileri üretimindeki artışa rağmen Türkiye'de hayvancılık sektörünün kaliteli kaba yem ihtiyacı tam olarak karşılanamamaktadır. TÜİK verilerine göre 2024 yılında ülkede yaklaşık 16,99 milyon büyükbaş ve 55,02 milyon küçükbaş olmak üzere toplam 72 milyonun üzerinde hayvan varlığı bulunmaktadır (TÜİK, 2024). Dönmez (2024) ise Büyükbaş Hayvan Birimi esas alındığında Türkiye'de yaklaşık 19,4 milyon BBHB bulunduğunu ve buna bağlı olarak yıllık kaba yem ihtiyacının yaklaşık 120,8 milyon ton olduğunu bildirmiştir. Buna karşılık, 13,1 milyon hektarlık çayır-mera alanından elde edilen yaklaşık 10,5 milyon ton kaba yem ile 2,3 milyon hektarlık yem bitkileri ekim alanından sağlanan yaklaşık 67,2 milyon ton üretim birlikte değerlendirildiğinde toplam kaba yem üretimi 77,7 milyon ton düzeyinde kalmaktadır. Dolayısıyla Türkiye'de yıllık 43 milyon tonun üzerinde kaba yem açığı bulunmaktadır (Dönmez, 2024). Benzer Görselde Özkan ve ark. (2025), kaliteli kaba yem açığını 17,34 milyon ton olarak hesaplamış ve mevcut üretimin hayvan varlığının gereksinimini karşılamada yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca Akıncı ve Kaya (2025), hayvancılık işletmelerinde toplam üretim maliyetlerinin yaklaşık %70'ini yem giderlerinin oluşturduğunu bildirerek kaliteli kaba yem üretiminin ekonomik açıdan taşıdığı stratejik önemi vurgulamıştır.

Mevcut veriler birlikte değerlendirildiğinde, Türkiye'de kaliteli kaba yem üretiminin artmasına rağmen hayvancılık sektörünün gereksinimini tam olarak karşılayamadığı açıkça görülmektedir(Ayyıldız & Çiçek, 2023). Bu nedenle mevcut üretimin korunması ve en verimli Görselde değerlendirilmesi, yeni üretim alanları oluşturmak kadar önemli hale gelmiştir. Ancak yem bitkilerinde üretim süreci boyunca elde edilen verim ve kalite, özellikle hasat ve

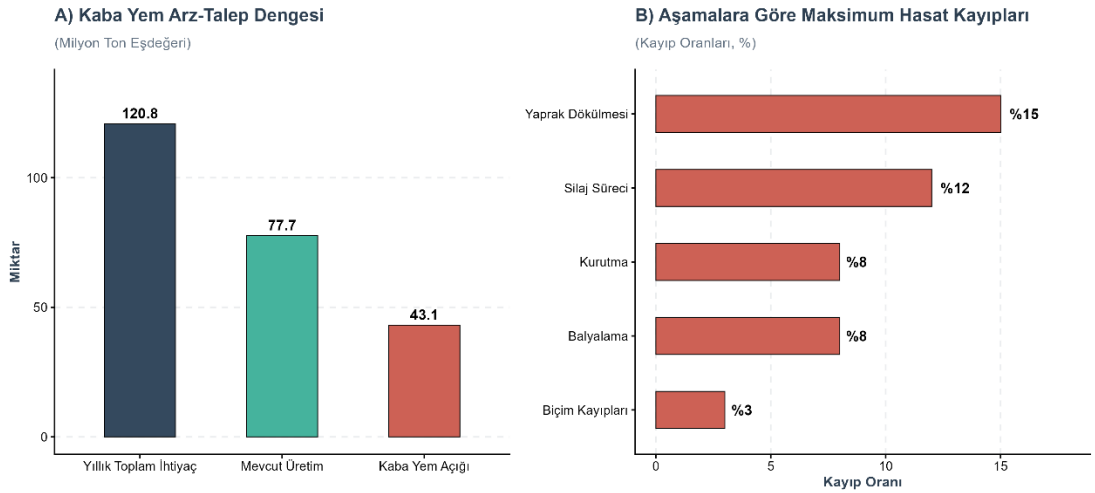
ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

hasat sonrası aşamalarda meydana gelen kayıplar nedeniyle önemli ölçüde azalabilmektedir(GÜLÜMSER et al., 2019). Üstelik bu kayıplar yalnızca ürün miktarında azalmaya neden olmamakta; ham protein, sindirilebilirlik ve enerji değeri gibi kalite özelliklerini de olumsuz etkileyerek hayvansal üretimde ekonomik kayıpları daha da artırmaktadır(AÇIKGÖZ & Demirel, 2021). Dolayısıyla, kaliteli kaba yem açığının bulunduğu ve yem maliyetlerinin işletme giderleri içerisindeki payının oldukça yüksek olduğu Türkiye koşullarında, hasat kayıplarının azaltılması ilave üretim alanına ihtiyaç duymadan kaliteli kaba yem arzını artırabilecek en etkili ve sürdürülebilir stratejilerden biri olarak değerlendirilmektedir(Leon-Tinoco et al., 2025). Bu nedenle yem bitkilerinde hasat sürecinde meydana gelen kayıpların nedenlerinin ortaya konulması, kayıp düzeylerinin belirlenmesi ve bunların azaltılmasına yönelik uygulamaların geliştirilmesi, sürdürülebilir hayvancılık açısından büyük önem taşımaktadır.

3. YEM BİTKİLERİNDE HASAT KAYIPLARI: TANIMI, ÖNEMİ VE EKONOMİK BOYUTU

Hasat, yem bitkileri yetiştiriciliğinde üretim zincirinin son aşaması olmasına rağmen, verim ve kaliteyi belirleyen en kritik uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir. Hasat; bitkinin optimum olgunluk döneminde biçilmesi, kurutulması, namlu hâline getirilmesi, toplanması ve depolanmaya hazır hâle getirilmesini kapsayan bütünleşik bir süreçtir. Bu süreç boyunca gerçekleştirilen her uygulama, elde edilen ürünün miktarı kadar besleme değerini de doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla yetiştirme sezonu boyunca gübreleme, sulama, yabancı ot kontrolü ve diğer kültürel işlemlerle sağlanan yüksek verim potansiyeli, uygun olmayan hasat uygulamaları nedeniyle önemli ölçüde kaybedilebilmektedir (Koçak, 2023; Rotz, 1995) Yem bitkilerinde hasadın temel amacı yalnızca en yüksek biyokütle verimini elde etmek değil, aynı zamanda bitkinin besleme değerini mümkün olan en üst düzeyde koruyarak kaliteli kaba yem üretmektir. Hasat zamanındaki birkaç günlük gecikme veya erken biçim uygulaması bile ham protein oranı, sindirilebilir kuru madde, metabolik enerji ve lif bileşenlerinde önemli değişikliklere neden olabilmektedir. Özellikle baklagil yem bitkilerinde protein bakımından zengin yaprakların dökülmesi, yem kalitesinde ciddi azalmaya yol açarken, buğdaygil yem bitkilerinde geciken hasat lignifikasyonu artırarak sindirilebilirliği düşürmektedir. Bu nedenle hasat zamanı ve hasat yönetimi, kaliteli kaba yem üretiminin en önemli belirleyicileri arasında yer almaktadır (Koçak, 2023). Hasat sürecinde meydana gelen kayıplar yalnızca biçim işlemiyle sınırlı olmayıp biçme, kurutma, namlu oluşturma, tırmıklama, balyalama, yükleme, taşıma ve depolama gibi tüm aşamalarda ortaya çıkabilmektedir. Bu süreçlerde oluşan kayıplar; kuru madde kaybı, yaprak dökülmesi, mekanik kırılmalar, solunum ve yağış kaynaklı kayıplar ile besin maddesi kayıpları şeklinde gerçekleşmektedir. Özellikle yaprak oranı yüksek olan baklagil yem bitkilerinde mekanik etkiler nedeniyle meydana gelen yaprak kayıpları, toplam kuru madde kaybından daha büyük bir kalite kaybına neden olabilmektedir. Rotz (1995), yem bitkilerinde hasat zincirinin her aşaması için geliştirilen kayıp modellerinde, hasat işlemlerinin ürün miktarı kadar besin maddesi kompozisyonunu da değiştirdiğini ortaya koymuştur.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



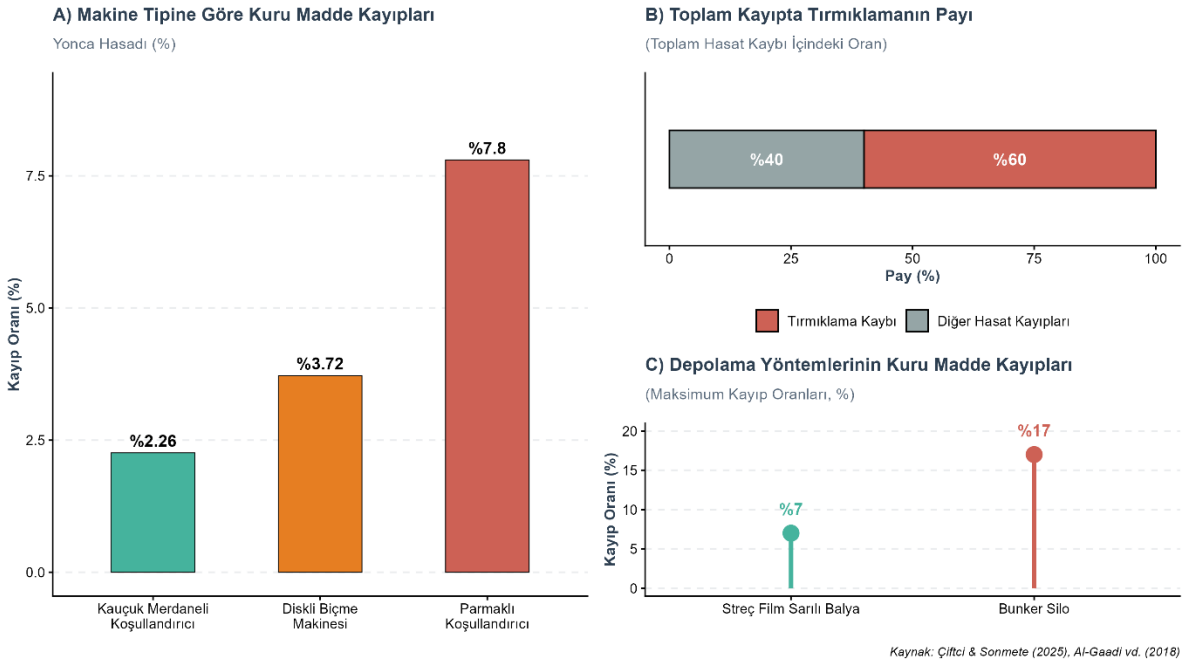
Görsel 3. Kaba Yem İhtiyacı ve Hasat Süreci Kayıp Analizi

Hasat kayıplarının ekonomik etkileri ise yalnızca kaybedilen ürün miktarı ile sınırlı değildir. Üretim sezonu boyunca tohum, gübre, sulama, enerji, yakıt, işçilik ve mekanizasyon için yapılan yatırımların önemli bir bölümü, uygun olmayan hasat uygulamaları nedeniyle geri kazanılamamaktadır. Ayrıca hasat sırasında kaybedilen kaliteli kaba yem, işletmelerin daha fazla kesif yem kullanmasına veya dışarıdan yem temin etmesine neden olarak üretim maliyetlerini artırmaktadır. Türkiye'de hayvancılık işletmelerinde yem giderlerinin toplam üretim maliyetlerinin yaklaşık %70'ini oluşturduğu dikkate alındığında (Akıncı & Kaya, 2025), hasat kayıplarının azaltılması yalnızca teknik bir uygulama değil, aynı zamanda işletme kârlılığı ve sürdürülebilir hayvancılık açısından stratejik bir gereklilik hâline gelmektedir. Benzer Görselde son yıllarda yapılan değerlendirmelerde, kaliteli kaba yem açığının bulunduğu ülkelerde mevcut üretimin korunmasının yeni üretim alanları oluşturmaktan daha ekonomik ve sürdürülebilir bir yaklaşım olduğu vurgulanmaktadır (Koçak, 2023; Subhashree et al., 2023) Araştırmalar, uygun olmayan hasat yönetiminin yem bitkilerinde önemli düzeylerde kuru madde kayıplarına neden olabileceğini göstermektedir. Özellikle yonca gibi yaprak oranı yüksek türlerde biçim, tırmıklama ve balyalama işlemlerinin birlikte değerlendirildiği çalışmalarda toplam kuru madde kayıplarının %20–30 düzeylerine ulaşabildiği, bazı olumsuz çevre ve işletme koşullarında ise bu oranın daha da artabildiği bildirilmektedir. Kayıpların en büyük kısmının ise yaprak dökülmeleri ve tırmıklama işlemi sırasında meydana geldiği belirtilmektedir (Al-Gaadi, 2018; Rotz, 1995) Türkiye gibi kaliteli kaba yem açığının devam ettiği ülkelerde, hasat sırasında meydana gelen her birim kuru madde ve besin maddesi kaybı yalnızca işletme ölçeğinde değil, ulusal hayvancılık açısından da önemli ekonomik sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle hasat kayıplarının azaltılması; yeni üretim alanı açılmasına, daha fazla su ve gübre kullanımına ya da ilave üretim maliyetlerine ihtiyaç duyulmaksızın kaliteli kaba yem arzının artırılmasını sağlayan en etkili uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu hedefe ulaşılabilmesi ise büyük ölçüde uygun hasat zamanı ile birlikte kullanılan mekanizasyon sistemlerinin doğru seçilmesine ve etkin kullanılmasına bağlıdır. Günümüzde yem bitkileri hasadında kullanılan modern ekipmanlar, hasat süresini kısaltmanın yanı sıra ürün kayıplarını en aza indirerek hem verimin hem de yem kalitesinin korunmasında belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle yem bitkileri hasadında kullanılan makine ve ekipmanların çalışma prensipleri ile ürün üzerindeki etkilerinin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

4. YEM BİTKİLERİ HASADINDA KULLANILAN MAKİNELER

Yem bitkilerinde hasat işlemi, yalnızca bitkinin biçilmesinden ibaret olmayıp biçme, koşullandırma, soldurma, tırmıklama, namlu oluşturma, balyalama veya silajlık ürünlerde parçalama ve taşıma gibi birbirini tamamlayan çok sayıda mekanik uygulamayı kapsamaktadır. Hasat zincirinde kullanılan her makine, ürünün kuru madde miktarı, besin madde içeriği, hijyenik kalitesi ve depolama başarısı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle kullanılan makinenin tipi kadar uygun makine seçimi, doğru ayarlanması ve optimum çalışma koşullarında kullanılması da hasat kayıplarının azaltılmasında belirleyici rol oynamaktadır (Kondratuk et al., 2024; Rotz, 1995) Son yıllarda yem bitkileri üretiminde mekanizasyon düzeyinin artması, hasat işlemlerinin daha kısa sürede tamamlanmasına ve iş gücü gereksiniminin önemli ölçüde azalmasına katkı sağlamıştır. Özellikle geniş ölçekli işletmelerde yüksek kapasiteli biçme makineleri, modern koşullandırıcı sistemler, gelişmiş tırmıklar ve yüksek yoğunluklu balya makinelerinin kullanımı sayesinde hem iş başarısı yükselmekte hem de ürünün yağış, solunum ve mekanik etkilerden kaynaklanan kayıpları azaltılabilmektedir. Bununla birlikte, uygun olmayan makine seçimi, yanlış makine ayarları, yüksek çalışma hızları veya bitkinin fizyolojik özelliklerine uygun olmayan ekipman kullanımı, özellikle yaprak oranı yüksek baklagil yem bitkilerinde önemli düzeyde kuru madde ve besin maddesi kayıplarına neden olabilmektedir (Greenlees et al., 2000; Shinners et al., 1991; Tokarchuk et al., 2025)Günümüzde yem bitkileri hasadında kullanılan makineler, çalışma prensiplerine göre farklı gruplara ayrılmaktadır. Bunlar arasında parmaklı biçme makineleri, tamburlu ve diskli biçme makineleri, koşullandırıcılı biçme sistemleri, tırmıklar, ot çevirme makineleri, balya makineleri, silaj biçme makineleri ve kendiyürür hasat makineleri en yaygın kullanılan mekanizasyon ekipmanlarını oluşturmaktadır. Her makine grubu farklı çalışma prensibine sahip olmakla birlikte, hasat başarısı ve ürün kayıpları üzerindeki etkileri de birbirinden farklıdır. Bu nedenle uygun ekipman seçimi, yalnızca iş kapasitesi açısından değil, aynı zamanda kaliteli kaba yem üretiminin sürdürülebilirliği bakımından da büyük önem taşımaktadır (Koçak, 2023; Kondratuk et al., 2024)



Görsel 4. Mekanizasyon ve Depolama Süreçlerinde Kayıp Analizleri

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

4.1 PARMAKLI BİÇME MAKİNELERİ

Parmaklı biçme makineleri, yem bitkileri mekanizasyonunda kullanılan en eski biçme sistemlerinden biri olup, ileri-geri hareket eden üçgen kesitli bıçaklar ile bu bıçakları destekleyen sabit parmaklardan oluşan bir kesme mekanizmasına sahiptir. Kesme işlemi, hareketli bıçakların sabit parmaklar üzerinde makaslama etkisi oluşturmasıyla gerçekleşmektedir. Basit yapıları, düşük ilk yatırım maliyetleri ve bakım kolaylığı nedeniyle uzun yıllar boyunca özellikle küçük aile işletmelerinde yaygın olarak kullanılmıştır(Çelik, 2006). Parmaklı biçme makineleri, düşük çalışma hızlarında düzgün kesim sağlayabilmelerine rağmen, yüksek yoğunluklu veya yatmış bitki örtüsünde tıkanma eğilimlerinin fazla olması nedeniyle günümüzde büyük ölçüde döner sistemli biçme makinelerinin gerisinde kalmıştır. Özellikle yonca ve fiğ gibi sık gelişen yem bitkilerinde kesme veriminin azalması ve iş kapasitesinin düşük olması, bu makinelerin kullanım alanını önemli ölçüde sınırlandırmıştır. Hasat kayıpları açısından değerlendirildiğinde parmaklı biçme makinelerinin en önemli avantajı, düşük çevresel hız nedeniyle yaprak dökülmesine neden olan mekanik darbelerin sınırlı olmasıdır. Buna karşın düşük ilerleme hızı ve sık tıkanma nedeniyle hasat süresinin uzaması, özellikle yağış riski bulunan bölgelerde soldurma sürecini geciktirebilmekte ve dolaylı olarak kuru madde kayıplarını artırabilmektedir. Modern döner biçme makinelerinin iş başarısı parmaklı biçme makinelerine göre daha yüksektir ve daha kısa hasat süresi sayesinde ürünün tarlada kalış süresi azalmaktadır. Bununla birlikte, küçük ölçekli işletmelerde, eğimli arazilerde ve düşük yoğunluklu yem bitkisi üretim alanlarında parmaklı biçme makineleri ekonomik bir seçenek olmaya devam etmektedir.

4.2. TAMBURLU BİÇME MAKİNELERİ

Tamburlu biçme makineleri, yem bitkileri hasadında en yaygın kullanılan döner kesme sistemlerinden biri olup, dikey eksen etrafında dönen iki veya daha fazla tambur üzerine bağlanmış serbest hareketli bıçaklar yardımıyla kesim yapmaktadır. Kesme işlemi sırasında tamburların oluşturduğu merkezkaç kuvveti sayesinde bıçaklar çalışma konumuna gelmekte ve yüksek çevresel hız ile bitki saplarını kesmektedir. Aynı zamanda tamburların oluşturduğu hava akımı kesilen bitkinin makine üzerinden düzenli Görselde taşınmasını sağlayarak homojen bir namlu oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Yüksek kesme kapasitesi, düşük titreşim düzeyi ve yatmış bitkilerde gösterdiği başarılı performans nedeniyle tamburlu biçme makineleri özellikle yonca, fiğ ve doğal çayırların hasadında yaygın olarak tercih edilmektedir (Celik et al., 2024; Wu et al., 2023) Parmaklı biçme makineleriyle karşılaştırıldığında tamburlu biçme makineleri daha yüksek ilerleme hızlarında çalışabilmekte, tıkanma riski daha düşük olmakta ve daha düzgün anız yüksekliği sağlamaktadır. Bununla birlikte yüksek devir sayısına bağlı olarak bıçakların oluşturduğu mekanik etki özellikle baklagil yem bitkilerinde yaprak dökülmesini artırabilmektedir. Bu nedenle tambur devri, bıçak keskinliği ve ilerleme hızının bitki türüne uygun olarak ayarlanması hasat kayıplarının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır (Wu ve ark., 2023) Eskişehir koşullarında yürütülen karşılaştırmalı bir araştırmada, tamburlu biçme makinesi ile koşullandırıcılı diskli biçme makinesi karşılaştırılmış ve tamburlu sistemin daha yüksek enerji tüketmesine karşın düzgün biçim kalitesi sağladığı belirlenmiştir. Buna karşılık koşullandırıcılı diskli sistemlerin yaklaşık %17 daha düşük enerji tükettiği, ürünün daha hızlı kurumasını sağladığı ve yağış riskinin bulunduğu koşullarda kalite kayıplarını önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir (Tuğrul & Bozbay, 2023). Son yıllarda tamburlu biçme makineleri üzerinde gerçekleştirilen mühendislik çalışmaları, makine performansının yalnızca bıçak yapısına değil, tambur geometrisine, hava akımı karakteristiklerine ve titreşim davranışına da bağlı olduğunu göstermektedir. Wu ve ark. (2023), çift tamburlu biçme makinelerinde bıçak geometrisi ve disk devrinin optimize edilmesiyle kesme performansının arttığını, ürün kırılmalarının ve düzensiz beslemenin

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

azaltılabildiğini bildirmiştir. Benzer Görselde Celik ve ark. (2024), sonlu elemanlar analizleri ile geliştirilen yeni nesil tamburlu biçme makinelerinde yapısal dayanımın artırılması sayesinde yüksek çalışma hızlarında daha kararlı bir hasat performansı elde edildiğini ortaya koymuştur.

4.3. DİSKLİ BİÇME MAKİNELERİ

Diskli biçme makineleri, günümüzde yem bitkileri hasadında en yaygın kullanılan modern biçme sistemlerinden biridir. Bu makinelerde kesme işlemi, yatay eksende yüksek hızla dönen diskler üzerine monte edilmiş serbest hareketli bıçaklar tarafından gerçekleştirilmektedir. Her bir disk bağımsız olarak döndüğünden, yoğun ve yatmış bitki örtüsünde dahi düzgün bir kesim sağlanabilmekte, yüksek ilerleme hızlarında çalışılabilmekte ve geniş iş genişliklerine ulaşılabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle özellikle büyük ölçekli işletmelerde ve profesyonel yem üretim sistemlerinde diskli biçme makineleri standart ekipman hâline gelmiştir (Kondratuk et al., 2024). Diskli biçme makinelerinin en önemli avantajlarından biri, kısa sürede geniş alanların hasat edilmesini sağlayarak ürünün tarlada kalma süresini azaltmasıdır. Hasat süresinin kısalması özellikle yağış riski bulunan bölgelerde solunum ve hava koşullarına bağlı kuru madde kayıplarını azaltmaktadır. Bununla birlikte disklerin yüksek çevresel hızla çalışması, özellikle baklagil yem bitkilerinde mekanik darbenin artmasına bağlı olarak yaprak dökülmelerini artırabilmektedir. Bu nedenle disk devri, ilerleme hızı ve biçme yüksekliği gibi çalışma parametrelerinin ürün özelliklerine göre optimize edilmesi önerilmektedir (Wu ve ark., 2023; Kondratuk et al., 2024). Türkiye'de yürütülen güncel bir çalışmada, yonca hasadında üç farklı sistem (diskli biçme makinesi, kauçuk merdaneli koşullandırıcılı diskli biçme makinesi ve parmaklı koşullandırıcılı diskli biçme makinesi) karşılaştırılmıştır. Araştırma sonunda kauçuk merdaneli koşullandırıcılı sistemde toplam kuru madde kaybının %2,26 ile en düşük düzeyde gerçekleştiği, yalnızca diskli biçme makinesinde bu değerin %3,72, parmaklı koşullandırıcılı sistemde ise %7,80'e ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca kauçuk merdaneli sistemde ham protein oranı ve nispi yem değerinin daha yüksek düzeyde korunduğu bildirilmiştir (Çiftci & Sonmete, 2025). Erzurum koşullarında gerçekleştirilen önceki araştırmalarda da diskli biçme-ezme makinelerinin yoncanın tarlada kuruma süresini %11,8–32,3 oranında kısalttığı ve bu sayede özellikle yağış nedeniyle oluşabilecek kalite kayıplarını azalttığı gösterilmiştir (GÜNER, 1999). Günümüzde ise ISOBUS tabanlı elektronik kontrol sistemleri, otomatik kesme yüksekliği ayarı ve yük algılama sistemleri sayesinde diskli biçme makinelerinde hem yakıt tüketiminin hem de hasat kayıplarının azaltılmasına yönelik önemli teknolojik gelişmeler yaşanmaktadır (Celik ve ark., 2024).

4.4. KOŞULLANDIRICILI BİÇME MAKİNELERİ

Koşullandırıcılı biçme makineleri (mower-conditioners), biçme ve koşullandırma işlemlerini tek geçişte gerçekleştiren modern hasat ekipmanlarıdır. Bu makinelerde amaç, kesilen bitkinin özellikle gövde dokusunda bulunan mumsu epidermis tabakasını kırarak veya ezerek su kaybını hızlandırmak ve böylece tarlada soldurma süresini önemli ölçüde azaltmaktır. Daha kısa soldurma süresi, yağış, solunum ve mikrobiyal faaliyetlerden kaynaklanan kuru madde kayıplarını azaltırken, hasat zincirinin daha kısa sürede tamamlanmasına da olanak sağlamaktadır (Derrick, 2023). Koşullandırıcı sistemler temel olarak kauçuk merdaneli (roller conditioner), çelik merdaneli ve parmaklı/çırpıcılı (impeller veya flail conditioner) olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Kauçuk merdaneli sistemler özellikle yonca, korunga ve fiğ gibi baklagil yem bitkilerinde sapları ezerek yaprak bütünlüğünü büyük ölçüde korurken, çırpıcılı sistemler daha çok buğdaygil yem bitkilerinde kullanılmaktadır. Baklagillerde yaprakların ham protein bakımından oldukça zengin olması nedeniyle koşullandırıcı tipinin doğru seçilmesi, hasat kayıplarının azaltılmasında belirleyici rol oynamaktadır (Derrick, 2023). Koşullandırıcıların yem kalitesi üzerine etkisi uzun yıllardır araştırılmaktadır. Shinners ve ark.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

(1991), farklı merdane tiplerini karşılaştırdıkları çalışmada yaprak kayıplarının %5,2–5,9 arasında değiştiğini ve en düşük kaybın birbirine geçen kauçuk merdanelerde meydana geldiğini bildirmiştir. Benzer Görselde Borreani ve ark. (1999), yoncada çelik merdaneli koşullandırıcılarda yaprak kaybının %3,6–10,2 arasında değiştiğini, kayıp miktarının ise büyük ölçüde bitkinin olgunluk dönemi ve makine ayarlarına bağlı olduğunu belirtmiştir. Greenlees ve ark. (2000) ise yüksek hızlı rotorlu koşullandırıcılarda yaprak kaybının %7,3 düzeyine ulaştığını ve agresif çalışan impeller sistemlerinin kauçuk merdaneli sistemlere göre daha fazla yaprak dökülmesine neden olduğunu ortaya koymuştur. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, koşullandırıcılı biçme makinelerinin yalnızca kuruma süresini değil, aynı zamanda yem kalitesini de önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Hendry (2023), farklı marka ve tipte merdaneli koşullandırıcıları karşılaştırdığı araştırmada uygun merdane tasarımının soldurma süresini belirgin Görselde kısaltırken yaprak kayıplarını artırmadığını bildirmiştir. Özellikle geniş namlu oluşturan sistemlerde kuruma hızının arttığı ve balyalama için gerekli nem düzeyine daha kısa sürede ulaşıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte koşullandırıcıların her koşulda avantaj sağlamadığı da bilinmektedir. Özellikle ince saplı yem bitkilerinde veya sıcak ve kuru iklim koşullarında aşırı agresif koşullandırma, gereksiz mekanik etki oluşturarak yaprak kırılmalarını artırabilmektedir. Bu nedenle bitki türü, gelişme dönemi ve çevre koşullarına uygun koşullandırıcı tipinin seçilmesi önerilmektedir.

4.5. TIRMIKLAR

Tırmıklama, biçilen yem bitkilerinin balyalama veya silaj hasadı öncesinde uygun genişlik ve yoğunlukta namlular hâline getirilmesini sağlayan temel hasat işlemlerinden biridir. Ancak hasat zincirinde en fazla yaprak kaybının meydana geldiği işlemlerden biri de tırmıklamadır. Özellikle baklagil yem bitkilerinde yaprakların gövdeye göre çok daha hızlı kuruması nedeniyle, yanlış zamanda yapılan tırmıklama işlemleri önemli miktarda kuru madde ve ham protein kaybına neden olabilmektedir (Al-Gaadi, 2018). Günümüzde yem bitkileri hasadında parmak tekerlekli (wheel rake), döner (rotary rake) ve paralel çubuklu (parallel-bar rake) olmak üzere üç temel tırmık sistemi kullanılmaktadır. Parmak tekerlekli tırmıklar yüksek iş kapasitesine sahip olmalarına rağmen ürünü doğrudan temas ederek hareket ettirdiklerinden özellikle kuru yoncada yaprak dökülmesini artırabilmektedir. Buna karşılık döner tırmıklar daha kontrollü ürün hareketi sağladıkları için kalite kayıplarını azaltmakta, ancak yatırım maliyetleri daha yüksek olmaktadır. Al-Gaadi ve ark. (2018), yonca üretiminde hasat zincirinin farklı aşamalarını değerlendirdikleri araştırmada toplam kuru madde kaybının %17,35 olduğunu, bunun yaklaşık %59,66'sının yalnızca tırmıklama aşamasında meydana geldiğini bildirmiştir. Araştırıcılar, tırmıklama sırasında yaklaşık 985 kg ha^{-1} kuru madde kaybı oluştuğunu ve bunun hasat zincirindeki en kritik aşamalardan biri olduğunu vurgulamıştır. Son yıllarda geliştirilen belt merger (bantlı namlu oluşturucu) sistemleri ise ürünü yerden kaldırarak taşıdığı için toprağın yeme karışmasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca bu sistemler mekanik darbeyi düşürdüğünden özellikle yonca gibi hassas yem bitkilerinde yaprak kayıplarını azaltmakta ve kül içeriğinin düşmesine katkı sağlamaktadır (Field Crop News, 2025).

4.6. OT ÇEVİRME MAKİNELERİ (TEDDER)

Ot çevirme makineleri (tedder), biçim sonrasında yem bitkisinin namlusunu dağıtarak veya gevşeterek hava ile temas yüzeyini artıran ve soldurma sürecini hızlandıran mekanizasyon ekipmanlarıdır. Temel amacı, bitki bünyesindeki suyun kısa sürede uzaklaştırılmasını sağlayarak solunum faaliyetleri, mikrobiyal gelişme ve beklenmeyen yağışlardan kaynaklanan kuru madde ve besin maddesi kayıplarını en aza indirmektir. Özellikle yonca gibi yüksek kaliteli baklagil yem bitkilerinde uygun zamanda gerçekleştirilen tedder uygulamaları, kuruma

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

süresini önemli ölçüde kısaltarak hasat zincirinin daha güvenli yönetilmesine katkı sağlamaktadır (Ayala et al., 2024; Li et al., 2024) Son yıllarda geliştirilen çok rotorlu tedderler, otomatik eğim dengeleme sistemleri, hidrolik zemin takip mekanizmaları ve düşük temas açılı parmak tasarımları sayesinde ürünün toprağa sürtünmesini azaltmakta ve daha homojen bir soldurma sağlamaktadır. Bu teknolojiler özellikle yüksek verimli yonca üretim sistemlerinde hem yakıt tüketimini azaltmakta hem de ürünün daha kısa sürede hedef kuru madde oranına ulaşmasını sağlamaktadır (Li ve ark., 2024). Bununla birlikte tedder kullanımının en önemli dezavantajı, özellikle baklagil yem bitkilerinde meydana gelen mekanik yaprak dökülmeleridir. Yapraklar gövdeye göre çok daha hızlı kuruduğundan, ürün neminin düşük olduğu dönemlerde gerçekleştirilen çevirme işlemleri yaprak kırılmalarını artırmakta, bunun sonucunda ham protein, sindirilebilir kuru madde ve nispi yem değeri (RFV) önemli ölçüde azalmaktadır. Zamudio-Ayala ve ark. (2024), kuru madde oranı %70'in üzerine çıktıktan sonra yapılan tedder uygulamalarında tarla kayıplarının %10'a kadar ulaşabildiğini, buna karşılık ürün nemi %60'ın altında değilken gerçekleştirilen erken dönem uygulamalarda bu kayıpların %3'ün altında kaldığını bildirmiştir. Aynı derlemede, baklagillerin buğdaygil yem bitkilerine göre yaprak dökülmesine çok daha hassas olduğu vurgulanmıştır (Zamudio-Ayala ve ark., 2024). Hartfiel ve Digman tarafından yürütülen saha çalışmalarının değerlendirildiği güncel derlemede, rotorlu tedder kullanılan yonca parsellerinde ilk 24 saat sonunda kuru madde oranının tedder uygulanmayan parsellere göre belirgin Görselde daha yüksek olduğu, buna bağlı olarak balyalama süresinin erkene çekilebildiği bildirilmiştir. Araştırmacılar, özellikle yağış riski bulunan bölgelerde tedder kullanımının kalite kayıplarını azaltan en önemli uygulamalardan biri olduğunu ifade etmektedir (Zamudio-Ayala ve ark., 2024). Öte yandan tedder uygulamasının zamanlaması, makine tipinden daha önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir. Bitki henüz yüksek nem içerirken yapılan tek geçişli uygulamalar hem kuruma süresini hızlandırmakta hem de mekanik kayıpları sınırlamaktadır. Buna karşılık aynı ürün üzerinde birden fazla tedder geçişi uygulanması, özellikle yonca ve üçgül gibi yaprak oranı yüksek türlerde yaprak dökülmesini artırarak yem kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Zamudio-Ayala ve ark., 2024; Ridla ve ark., 2024).

4.7. BALYA MAKİNELERİ

Balya makineleri, kurutularak uygun nem düzeyine ulaştırılan yem bitkilerinin belirli bir yoğunlukta sıkıştırılarak depolanmasını, taşınmasını ve pazarlanmasını sağlayan hasat mekanizasyonunun son aşamalarından biridir. Günümüzde küçük kare balya, büyük kare balya ve yuvarlak balya makineleri yaygın olarak kullanılmakta olup, işletme büyüklüğü, hasat kapasitesi, depolama şekli ve yemin kullanım amacına göre farklı sistemler tercih edilmektedir. Son yıllarda geliştirilen değişken hazneli balya makineleri, otomatik yoğunluk kontrol sistemleri, nem sensörleri, yük hücreleri (load-cell), ISOBUS tabanlı elektronik kontrol üniteleri ve balya sarma (baler-wrapper) teknolojileri sayesinde hem iş başarısı hem de yem kalitesi önemli ölçüde artırılmıştır (A., 2023; Zawada et al., 2023) Balya yoğunluğu, balya kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Düşük yoğunluklu balyalarda hava boşluklarının fazla olması, depolama sırasında oksidasyonu ve mikrobiyal aktiviteyi artırarak kuru madde kayıplarını hızlandırmaktadır. Buna karşılık yüksek yoğunluklu balyalar daha az oksijen içermesi nedeniyle kaliteyi daha iyi korumakta, taşıma ve depolama maliyetlerini de azaltmaktadır. Güncel balya makinelerinde kullanılan elektronik yoğunluk kontrol sistemleri, ürün nemine göre sıkıştırma basıncını otomatik olarak ayarlayarak daha homojen balyalar elde edilmesini sağlamaktadır (Zawada ve ark., 2023). Son yıllarda özellikle balya-sarma (baler-wrapper) kombinasyonlarının kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Bu sistemlerde balya oluşturulduktan hemen sonra streç film ile sarılmakta ve ürün kısa sürede anaerobik ortama alınmaktadır. Böylece özellikle yüksek nemli otlarda fermantasyon daha kontrollü

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

gerçekleşmekte, depolama süresince kuru madde ve besin maddesi kayıpları önemli ölçüde azaltılmaktadır. Sensör destekli yeni nesil sistemlerde balya ağırlığı, nem oranı, film gerilimi ve sarım kat sayısı gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte, böylece operatör kaynaklı hatalar da azaltılmaktadır (Zawada ve ark., 2023). Balya tipi de hasat kayıpları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Büyük kare balyalar yüksek yoğunlukları sayesinde taşıma kapasitesini artırırken, aynı miktardaki ürün için daha az depolama alanı gerektirmektedir. Buna karşılık yuvarlak balyalar daha düşük yatırım maliyeti ve yüksek iş kapasitesi nedeniyle özellikle orta ölçekli işletmelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak açık alanda depolanan yuvarlak balyalarda dış yüzeyin yağış ve güneş ışınlarına maruz kalması nedeniyle kalite kayıpları daha yüksek olabilmektedir. Bu nedenle günümüzde balyaların streç film ile sarılması veya kapalı alanlarda muhafaza edilmesi önerilmektedir (Randby & Bakken, 2021). Toplam kuru madde kaybının bunker silolarda %17'ye kadar çıkabildiği, uygun Görselde sarılmış yuvarlak balyalarda ise yaklaşık %7 düzeyinde kaldığı bildirilmiştir. Modern balya makinelerinde geliştirilen otomatik nem sensörleri, GPS destekli verim haritalama sistemleri ve elektronik balya kayıt sistemleri sayesinde her balyanın ağırlığı, nem içeriği, yoğunluğu ve üretildiği konum kayıt altına alınabilmektedir. Bu teknolojiler yalnızca hasat yönetimini kolaylaştırmamakta, aynı zamanda farklı tarlalardan elde edilen yemlerin kalite sınıflandırmasına da olanak sağlamaktadır. Akıllı tarım uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte balya makineleri artık yalnızca mekanik bir ekipman olmaktan çıkmış, veri toplayan ve karar destek sistemi olarak çalışan dijital tarım araçları hâline gelmiştir (A., 2023; Zawada et al., 2023)

4.8. SİLAJ BİÇME MAKİNELERİ

Silaj biçme makineleri (forage harvester), yem bitkilerini tek geçişte biçen, kıyan, gerektiğinde dane kırma işlemini gerçekleştiren ve doğrudan taşıma aracına yükleyen yüksek kapasiteli hasat makineleridir. Günümüzde özellikle silajlık mısır, sorgum, yonca, İtalyan çimi ve diğer yüksek verimli yem bitkilerinin hasadında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hasat sırasında elde edilen parçacık uzunluğu, kesme yüksekliği, dane kırma başarısı ve ürün akışının sürekliliği yalnızca makinenin performansını değil, aynı zamanda silajın fermantasyon kalitesini, yem tüketimini ve hayvan performansını da doğrudan etkilemektedir (Abilzhanuly et al., 2024; Krzyżaniak et al., 2023) Son yıllarda geliştirilen kendiyürür silaj biçme makinelerinde otomatik yük kontrol sistemleri, GPS destekli dümenleme, ürün akış sensörleri, otomatik kesme boyu ayarlama (Theoretical Length of Cut-TLOC), gerçek zamanlı nem sensörleri ve dane kırıcı ayar sistemleri kullanılmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde ürün akışı daha dengeli hale gelmekte, makine tıkanmaları azalmakta ve hem yakıt tüketimi hem de hasat kayıpları düşmektedir. Özellikle operatör destek sistemlerinin kullanıldığı modern makinelerde çalışma verimliliğinin ve makine kapasitesinin önemli ölçüde arttığı bildirilmektedir (Krzyżaniak ve ark., 2023). Silaj kalitesini belirleyen en önemli teknik parametrelerden biri parçacık uzunluğudur. Parçacıkların gereğinden uzun olması siloda yeterli sıkışmayı engellerken, aşırı kısa kıyım ise etkin lif miktarını azaltarak geviş getiren hayvanlarda rumen fonksiyonlarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle modern silaj makinelerinde kesme boyu ürünün türüne, kuru madde oranına ve kullanım amacına göre otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Ayrıca dane kırıcı (kernel processor) sistemleri sayesinde özellikle silajlık mısırda dane parçalanma oranı artırılarak nişasta sindirilebilirliği önemli ölçüde yükseltilmektedir (Abilzhanuly ve ark., 2024). Kesme yüksekliği de hasat kayıplarını etkileyen önemli bir parametredir. Düşük kesme yüksekliği teorik olarak verimi artırmasına rağmen toprağın ve kül içeriğinin silaja karışma riskini yükseltmektedir. Buna karşılık daha yüksek kesme yüksekliği ile yapılan hasatta alt boğumlardaki düşük kaliteli ve yüksek lignin içeren bitki kısımları tarlada bırakılmakta, böylece hasat edilen materyalin enerji yoğunluğu ve sindirilebilirliği artmaktadır. Ancak kesme yüksekliği arttıkça birim alandan elde edilen toplam yaş ot veriminde belirli düzeyde azalma

meydana gelmektedir. Bu nedenle optimum kesme yüksekliği; verim, kalite ve hasat kayıpları birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir (Abilzhanuly ve ark., 2024). Krzyżaniak ve ark. (2023), Claas Jaguar 870, Claas Jaguar 950 ve Krone Big X 650 kendiyürür silaj makinelerini karşılaştırdıkları araştırmada, en yüksek efektif kapasitenin 141,3 Mg saat^{-1} ile Claas Jaguar 950 modelinde elde edildiğini bildirmiştir. Aynı makine, ton yaş ürün başına 0,51 kg yakıt tüketimi ile en düşük özgül yakıt tüketimine sahip olmuş, operatör destek sistemlerinin hasat kapasitesi ve ürün akış sürekliliğini artırdığı belirlenmiştir. Araştırmada organizasyon kaynaklı beklemelerin azaltılmasıyla toplam hasat verimliliğinin daha da yükseltilebileceği vurgulanmıştır (Krzyżaniak ve ark., 2023). Abilzhanuly ve ark. (2024) tarafından geliştirilen yeni nesil silaj biçme makinesinde ise biçme, yönlendirme, kıyma ve taşıma üniteleri matematiksel modelleme ile optimize edilmiş; uygun besleme düzeni ve bıçak geometrisinin enerji tüketimini düşürürken ürün akışını iyileştirdiği gösterilmiştir. Araştırmacılar, doğru besleme açısı ve optimize edilmiş kıyıcı tambur tasarımının yalnızca makine performansını artırmadığını, aynı zamanda hasat sırasında meydana gelen ürün kayıplarını da azalttığını bildirmiştir (Abilzhanuly ve ark., 2024). Silaj hasadında son yıllarda dikkat çeken bir diğer gelişme ise yapay zekâ destekli otomatik kontrol sistemleridir. Kamera tabanlı ürün algılama sistemleri, sensör destekli yük yönetimi ve otomatik boşaltma mekanizmaları sayesinde makine ile taşıma aracı arasındaki koordinasyon artırılmakta, ürün dökülmeleri ve zaman kayıpları azaltılmaktadır. Özellikle otomatik boşaltma kolu kontrol sistemlerinin taşıma araçlarının daha homojen doldurulmasını sağlayarak hasat etkinliğini artırdığı bildirilmektedir (Li ve ark., 2024).

5. HASAT SÜRECİNDE OLUŞAN KAYIPLAR

Yem bitkilerinde hasat kayıpları, biçim ile başlayan ve soldurma, tırmıklama, balyalama veya silaj yapımı ile taşıma ve depolama süreçlerine kadar devam eden çok aşamalı bir süreçtir. Bu kayıplar yalnızca kuru madde miktarında azalmaya neden olmakla kalmayıp; yaprak dökülmesi, besin maddelerinin uzaklaşması ve mikrobiyal bozulmalar nedeniyle ham protein, sindirilebilirlik ve nispi yem değeri (RFV) gibi kalite özelliklerini de olumsuz etkilemektedir. Araştırmalar, toplam hasat kayıplarının tek bir işlemden değil, hasat zinciri boyunca meydana gelen küçük kayıpların birikiminden oluştuğunu göstermektedir. Bu nedenle her hasat aşamasının doğru zamanda ve uygun makine ayarlarıyla gerçekleştirilmesi, kaliteli kaba yem üretiminin temel unsurlarından biridir (Ayala et al., 2024; Rotz & Abrams, 1988)

Görsel 5. Yem Bitkilerinde Hasat Aşamaları ve Kritik Kalite Riskleri

5.1. BİÇİM KAYIPLARI

Biçim aşaması, hasat zincirindeki ilk işlem olmasına rağmen sonraki süreçlerde oluşacak kayıpların önemli ölçüde belirleyicisidir. Bu aşamada meydana gelen kayıplar çoğunlukla uygun olmayan biçme yüksekliği, aşınmış veya körelmiş bıçaklar, yüksek ilerleme hızı, hatalı

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

makine ayarları ve ürünün gelişme döneminden kaynaklanmaktadır. Uygun koşullarda gerçekleştirilen hasatta doğrudan biçim kayıpları genellikle %1–3 arasında değişirken, yanlış makine ayarları ve olumsuz arazi koşullarında bu oran %5'in üzerine çıkabilmektedir (Krzyżaniak ve ark., 2023; Zamudio-Ayala ve ark., 2024). Özellikle yonca gibi baklagil yem bitkilerinde biçme yüksekliği hem hasat edilen verimi hem de bitkinin yeniden sürgün oluşturma kapasitesini etkilemektedir. Çok düşük biçimler büyüme noktalarına zarar verebilirken, yüksek biçimler ise önemli miktarda biyokütlenin tarlada kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca körelmiş bıçaklar bitkiyi düzgün kesmek yerine ezerek kopardığından yaprak dökülmesini artırmakta ve kalite kayıplarını hızlandırmaktadır. Bu nedenle uygun kesme yüksekliği, keskin bıçak kullanımı ve doğru makine ayarları, biçim kaynaklı kayıpların azaltılmasında temel uygulamalar arasında yer almaktadır (Ayala et al., 2024; Li et al., 2024)

5.2. YAPRAK DÖKÜLMESİ

Yaprak dökülmesi, özellikle yonca, üçgül ve fiğ gibi baklagil yem bitkilerinde hasat sırasında meydana gelen en önemli kalite kaybı kaynaklarından biridir. Yapraklar, bitkinin ham protein, sindirilebilir karbonhidratlar, vitaminler ve mineral maddeler bakımından en zengin kısmını oluşturduğundan, meydana gelen kayıplar yalnızca kuru madde miktarını değil, yemin besleme değerini de önemli ölçüde azaltmaktadır. Yaprak dökülmesi en fazla soldurma, çevirme, tırmıklama ve balyalama aşamalarında görülmekte olup; ürün nemi azaldıkça mekanik kırılganlık arttığından kayıplar da yükselmektedir (Zamudio-Ayala ve ark., 2024). Güncel araştırmalar, uygun hasat koşullarında yaprak kayıplarının çoğunlukla %5–15 arasında değiştiğini, ancak aşırı kurumuş ürünlerde ve uygun olmayan makine ayarlarında %30'un üzerine çıkabildiğini bildirmektedir. Özellikle yoncada yaprakların toplam ham proteinin yaklaşık üçte ikisini içermesi nedeniyle küçük miktardaki yaprak kayıpları bile yem kalitesinde önemli düşüşlere neden olmaktadır (Ayala et al., 2024; Çiftci & Sonmete, 2025) Al-Gaadi ve ark. (2018) ise yonca hasadında toplam kuru madde kaybının %30,93'e ulaştığını ve bunun yaklaşık %60'ının tırmıklama aşamasında meydana geldiğini bildirmiştir.

5.3. KURUTMA (SOLDURMA) KAYIPLARI

Biçimden sonra başlayan soldurma sürecinde bitki canlılığını bir süre daha sürdürdüğünden solunum faaliyetleri devam etmekte ve bitki bünyesindeki çözünebilir karbonhidratlar tüketilmektedir. Kuruma süresinin uzaması, yağışa maruz kalma ve yüksek çevre nemi gibi koşullar hem kuru madde kayıplarını hem de besin maddesi kayıplarını artırmaktadır. Güncel çalışmalar, uygun hava koşullarında soldurma kaynaklı kuru madde kayıplarının genellikle %3–8 arasında gerçekleştiğini, yağışlı ve uzun süreli kurutmalarda ise bu oranın %15–20 düzeyine ulaşabildiğini göstermektedir (Ayala et al., 2024; Ridla et al., 2024) Koşullandırıcı biçme makineleri ve uygun zamanda yapılan tek geçişli ot çevirme uygulamaları, kuruma süresini kısaltarak solunum kaynaklı kayıpları azaltmaktadır. Buna karşın ürünün gereğinden fazla kurutulması sonraki işlemlerde yaprak dökülmesini artırdığı için soldurma süresi dikkatle yönetilmelidir (Li ve ark., 2024; Zamudio-Ayala ve ark., 2024).

5.4. ÇEVİRME VE TIRMIKLAMA KAYIPLARI

Çevirme ve tırmıklama işlemleri, yem bitkisinin daha hızlı ve homojen kurumasını sağlamak amacıyla uygulanmasına rağmen, aynı zamanda mekanik kayıpların en yoğun görüldüğü hasat aşamalarından biridir. Özellikle yaprak oranı yüksek baklagil yem bitkilerinde düşük ürün neminde gerçekleştirilen işlemler, yaprak kırılmasını ve dökülmesini önemli ölçüde artırmaktadır (Zamudio-Ayala ve ark., 2024). Al-Gaadi ve ark. (2018), yonca hasadında toplam kuru madde kayıplarının yaklaşık %60'ının tırmıklama sırasında meydana geldiğini ve bu aşamanın hasat zincirindeki en kritik kayıp noktası olduğunu bildirmiştir. Tokarchuk ve ark.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

(2025) ise gereksiz tekrarlanan çevirme işlemlerinin kuru madde kayıplarını artırdığını, buna karşılık uygun nemde gerçekleştirilen tek geçişli uygulamaların hem karoten kayıplarını azalttığını hem de yem kalitesinin korunmasına katkı sağladığını göstermiştir. Bu nedenle çevirme ve tırmıklama işlemlerinin ürün nemi, hava koşulları ve makine ayarları dikkate alınarak planlanması önerilmektedir.

5.5. BALYALAMA KAYIPLARI

Balyalama, hasat zincirinin son mekanik aşamalarından biri olup, özellikle kuru ot üretiminde meydana gelen mekanik kayıpların önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu aşamada oluşan kayıplar çoğunlukla yaprak dökülmesi, kırılma (shattering), ürünün balya odasına beslenmesi sırasında meydana gelen dökülmeler ve uygun olmayan balya yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Kayıp düzeyi; ürün nemi, balya tipi, makine ayarları ve operatör uygulamalarına bağlı olarak değişmekte, özellikle baklagil yem bitkilerinde yaprak kırılganlığının artmasıyla birlikte kayıplar önemli ölçüde yükselmektedir (Zamudio-Ayala ve ark., 2024). Genel olarak balyalama sırasında meydana gelen doğrudan kuru madde kayıpları %2–8 arasında değişmekte, aşırı kurumuş ürünlerde ve uygun olmayan makine ayarlarında ise %10'un üzerine çıkabilmektedir (Zawada ve ark., 2023). Koegel ve ark. (1985), farklı balya makinelerinde toplam mekanik kayıpların %6,1–27,1 arasında değiştiğini bildirirken, Anderson ve ark. (1981) yuvarlak balya makinelerinde ürünün namlu yapısına bağlı olarak kayıpların %5–14 arasında değişebildiğini göstermiştir. Günümüzde geliştirilen otomatik yoğunluk kontrolü, nem sensörleri ve balya-sarma sistemleri sayesinde bu kayıplar önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Zawada ve ark., 2023). Balyalama sonrasında depolama koşulları da toplam kayıp üzerinde belirleyici olmaktadır. Özellikle açık alanda depolanan balyalarda yağış, güneş ışığı ve mikrobiyal faaliyetler nedeniyle kuru madde ve besin maddesi kayıpları artarken, streç film ile sarılan veya kapalı depolarda muhafaza edilen balyalarda kalite kaybı önemli ölçüde azalmaktadır (Randby & Bakken, 2021).

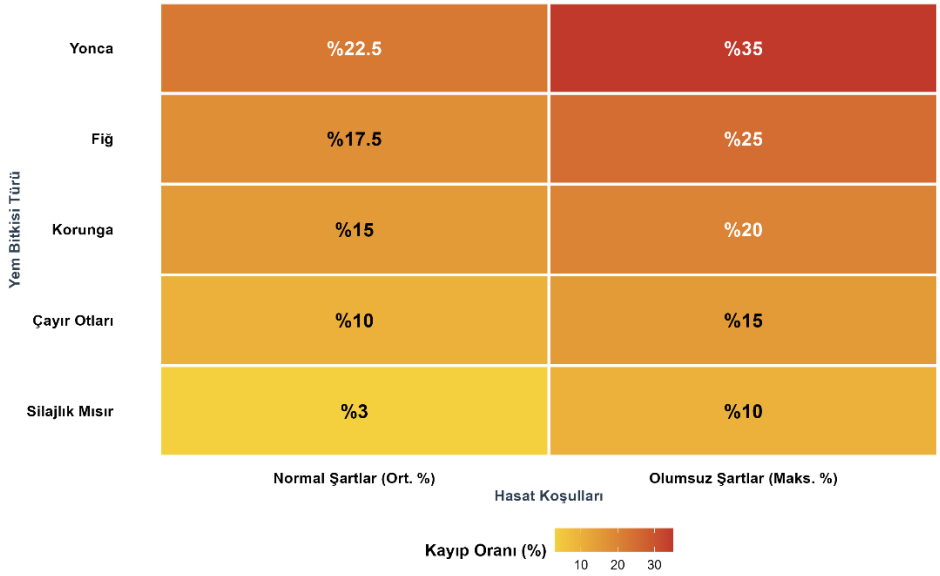
5.6. SİLAJ HASADI KAYIPLARI

Silaj üretiminde meydana gelen kayıplar; biçim sırasında oluşan tarla kayıpları, taşıma sürecindeki dökülmeler, silo doldurma ve sıkıştırma sırasında meydana gelen kayıplar ile fermantasyon ve depolama dönemindeki biyolojik kayıplardan oluşmaktadır. Bu nedenle silaj hasadında yalnızca hasat makinesinin performansı değil, tüm hasat ve depolama zincirinin etkinliği silaj kalitesini belirlemektedir (Köhler et al., 2019). Güncel araştırmalar, uygun Görselde yönetilen silaj sistemlerinde toplam kuru madde kayıplarının genellikle %6–12 arasında gerçekleştiğini, yetersiz sıkıştırma, geciken örtme işlemi ve hava girişinin bulunduğu koşullarda ise bu oranın %15'in üzerine çıkabildiğini göstermektedir (Köhler et al., 2019; Randby & Bakken, 2021) Köhler ve ark. (2019), bunker silolarda ortalama kuru madde kayıplarını çim silajında %9, mısır silajında ise %7 olarak belirlemiş; ayrıca lif fraksiyonlarında meydana gelen değişimlerin yemin besleme değerini etkilediğini bildirmiştir. Silaj kalitesinin korunmasında yeterli sıkıştırma yoğunluğu, hızlı silo doldurma, etkin örtme uygulamaları ve uygun yem çıkarma hızı büyük önem taşımaktadır. Wilkinson (2015), silo yoğunluğunun en az 700 kg m^{-3} düzeyine ulaşmasının hava boşluklarını azaltarak fermantasyon kalitesini iyileştirdiğini ve depolama kayıplarını önemli ölçüde düşürdüğünü belirtmiştir. Ayrıca modern kendiyürür silaj makinelerinde kullanılan otomatik kesme boyu ayarı, dane kırıcı sistemler ve sensör destekli ürün akış kontrolü sayesinde hasat sırasında meydana gelen mekanik kayıplar da önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Krzyżaniak ve ark., 2023).

6. YEM BİTKİLERİNE GÖRE HASAT KAYIPLARI

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Hasat sırasında meydana gelen kuru madde ve kalite kayıpları, yem bitkisinin morfolojik yapısı, yaprak/sap oranı, gövde kalınlığı, olgunluk dönemi ve kullanım amacına bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle baklagil yem bitkilerinde yaprakların kırılgan yapısı nedeniyle mekanik kayıplar daha yüksek olurken, buğdaygil yem bitkileri ve silajlık türlerde kayıplar çoğunlukla biçim, taşıma ve depolama süreçlerinde yoğunlaşmaktadır (Zamudio-Ayala ve ark., 2024).



Görsel 6. Yem Bitkisi Türlerine Göre Kuru Madde Kaybı Risk Haritası

6.1 YONCA (Medicago sativa L.)

Yonca, yüksek yaprak oranı ve üstün yem kalitesi nedeniyle en değerli yem bitkilerinden biri olmakla birlikte, hasat kayıplarına en duyarlı türlerden biridir. Yapraklarda ham proteinin büyük bölümü bulunduğundan, soldurma, tırmıklama ve balyalama sırasında meydana gelen yaprak dökülmeleri hem kuru madde hem de yem kalitesinde önemli kayıplara neden olmaktadır. Güncel çalışmalar, uygun hasat koşullarında toplam hasat kayıplarının genellikle %15–30, olumsuz koşullarda ise %35'in üzerine çıkabildiğini bildirmektedir (Zamudio-Ayala ve ark., 2024; Çiftci & Sonmete, 2025).

6.2 KORUNGA (Onobrychis sativa)

Korunga, yapraklarını yoncaya göre daha iyi muhafaza etmesi nedeniyle kuru ot üretiminde mekanik kayıplara karşı daha dayanıklı bir türdür. Ayrıca kondense tanen içeriği sayesinde şişkinlik (bloat) riskini azaltması ve protein kullanım etkinliğini artırması önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte geç hasat edilen korungada yaprak kayıpları artmakta ve yem kalitesi düşmektedir. Toplam hasat kayıpları çoğunlukla %10–20 arasında bildirilmektedir (Sheppard et al., 2019).

6.3 FİĞ (Vicia spp.)

Fiğ türlerinde hasat kayıpları; yaprak dökülmesine ek olarak baklaların çatlaması ve tohum dökülmesi nedeniyle diğer baklagillere göre daha karmaşık bir yapı göstermektedir. Özellikle tohum üretiminde hasat zamanındaki gecikmeler ekonomik kayıpları önemli ölçüde artırmaktadır. Yem amacıyla yapılan hasatta ise toplam kuru madde kayıpları çoğunlukla %10–

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

25 arasında değişmekte olup, uygun biçim zamanı ve hızlı soldurma uygulamaları bu kayıpların azaltılmasında etkili olmaktadır (Abd, 2025; Kebede, 2018)

6.4 ÜÇGÜL VE DİĞER BAKLAGİL YEM BİTKİLERİ

Üçgül ve diğer çok yıllık baklagil yem bitkilerinde hasat kayıpları büyük ölçüde yaprak dökülmesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle ürün neminin düşük olduğu dönemlerde gerçekleştirilen çevirme ve tırmıklama işlemleri mekanik kayıpları artırmaktadır. Genel olarak toplam hasat kayıpları %10–25 arasında değişmekte olup, kayıpların büyük kısmı hasat zincirinin mekanik işlemleri sırasında meydana gelmektedir (Zamudio-Ayala ve ark., 2024).

6.5 SİLAJLIK MISIR (Zea mays L.)

Silajlık mısırda yaprak dökülmesi önemli bir sorun oluşturmazken, hasat kayıpları daha çok kesme yüksekliği, parçacık uzunluğu, dane kırma başarısı ve silo yönetimine bağlıdır. Tarla kayıpları genellikle %1–5 arasında gerçekleşirken, yetersiz sıkıştırma ve uygun olmayan depolama koşullarında toplam kuru madde kayıpları %10'un üzerine çıkabilmektedir (Köhler ve ark., 2019; Krzyżaniak ve ark., 2023). Dane kırıcı sistemlerin kullanılması nişasta sindirilebilirliğini artırarak yem kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Johnson et al., 2002).

6.6 SORGUM (Sorghum bicolor L.)

Sorgum, kurak ve sıcak iklim koşullarına yüksek adaptasyonu nedeniyle son yıllarda silaj üretiminde mısıra önemli bir alternatif hâline gelmiştir. Hasat kayıpları genel olarak silajlık mısıra benzer düzeyde olup, optimum olgunluk döneminde yapılan hasat hem kuru madde verimini hem de sindirilebilirliği artırmaktadır. Özellikle doğru kesme yüksekliği ve uygun parçacık uzunluğu, yem kalitesinin korunmasında önemli rol oynamaktadır (Duhatschek et al., 2025; Lyons et al., 2019)

6.7 ÇAYIR OTLARI

Çayır otlarında yaprak/sap oranının daha düşük ve yaprakların mekanik dayanıklılığının daha yüksek olması nedeniyle hasat kayıpları baklagil yem bitkilerine göre daha düşüktür. Uygun hasat ve kurutma koşullarında toplam kuru madde kayıpları çoğunlukla %5–15 arasında gerçekleşmektedir. Özellikle İtalyan çiminde koşullandırıcı kullanımına rağmen kuru madde kayıplarının düşük seviyelerde kaldığı bildirilmektedir (Ayala et al., 2024; Borreani et al., 1999)

7. HASAT KAYIPLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Yem bitkilerinde hasat sırasında meydana gelen kuru madde ve kalite kayıpları tek bir nedene bağlı olmayıp; bitkinin biyolojik özellikleri, çevre koşulları, kullanılan hasat makinesi ve operatör uygulamalarının birlikte etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Aynı hasat sistemi farklı bitki türlerinde veya farklı çevre koşullarında farklı düzeylerde kayıplara neden olabilmektedir. Bu nedenle hasat kayıplarının azaltılabilmesi için tüm faktörlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Zamudio-Ayala ve ark., 2024).

7.1. BİTKİYE BAĞLI FAKTÖRLER

Bitki türü, yaprak/sap oranı, gövde yapısı, nem içeriği ve hasat olgunluğu, hasat kayıplarını belirleyen en önemli faktörlerdir. Özellikle yonca, üçgül ve fiğ gibi baklagil yem bitkileri, yüksek yaprak oranı ve kırılgan yapıları nedeniyle buğdaygil yem bitkilerine göre daha fazla mekanik kayba uğramaktadır. Ayrıca ürün neminin çok düşük olduğu dönemlerde gerçekleştirilen tırmıklama ve balyalama işlemleri yaprak dökülmesini önemli ölçüde

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

artırmaktadır. Bunun yanında hasadın geciktirilmesiyle birlikte lignifikasyon artmakta, yaprak kayıpları yükselmekte ve yem kalitesi düşmektedir (Ayala et al., 2024; Çiftci & Sonmete, 2025)

7.2. ÇEVRESEL FAKTÖRLER

Hasat dönemindeki sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve yağış durumu, kuruma süresi ile birlikte hasat kayıplarını doğrudan etkilemektedir. Uygun hava koşullarında soldurma süresi kısalırken, yağış ve yüksek nem koşullarında solunum kayıpları, besin maddesi yıkanması ve mikrobiyal bozulmalar artmaktadır. Son yıllarda iklim değişikliğine bağlı olarak artan ani yağışlar ve yüksek sıcaklık dalgaları, özellikle kuru ot üretiminde hasat zamanlamasını zorlaştırmakta ve kalite kayıplarını artırmaktadır. Bu nedenle meteorolojik tahminlerin hasat planlamasında etkin Görselde kullanılması önerilmektedir(Ayala et al., 2024; Li et al., 2024)

7.3. MAKİNEYE BAĞLI FAKTÖRLER

Hasat makinelerinin tipi, çalışma hızı, bıçak keskinliği, biçme yüksekliği, PTO devri ve koşullandırıcı ayarları, mekanik kayıpların temel belirleyicileri arasında yer almaktadır. Özellikle yüksek ilerleme hızlarında ürünün düzensiz kesilmesi ve mekanik darbelerin artması nedeniyle yaprak dökülmesi ile kuru madde kayıpları yükselmektedir. Benzer Görselde, uygun olmayan kesme yüksekliği hem tarlada ürün kaybına hem de sonraki biçimlerde yeniden gelişmenin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Modern biçme ve silaj makinelerinde kullanılan otomatik yük kontrolü, sensör destekli ayar sistemleri ve değişken çalışma hızları sayesinde hasat kayıpları önemli ölçüde azaltılabilmektedir(Bietresato et al., 2013; Gana et al., 2023)

7.4. OPERATÖRE BAĞLI FAKTÖRLER

Operatör deneyimi ve makinenin doğru kullanımı, hasat başarısını doğrudan etkileyen insan faktörüdür. Uygun olmayan çalışma hızı, yanlış PTO devri, hatalı koşullandırıcı basıncı, gereksiz tırmıklama işlemleri ve uygun olmayan ürün neminde yapılan balyalama, hasat kayıplarını önemli ölçüde artırmaktadır. Buna karşılık hasat öncesinde makine ayarlarının ürün özelliklerine göre yapılması, ekipman bakımının düzenli gerçekleştirilmesi ve operatör eğitimlerinin artırılması hem verim hem de yem kalitesinin korunmasına önemli katkılar sağlamaktadır(Alcântara, 2021; Shinners et al., 2012)

8. HASAT KAYIPLARININ EKONOMİK BOYUTU

Yem bitkilerinde hasat sırasında meydana gelen kuru madde ve kalite kayıpları, yalnızca üretim miktarını azaltmakla kalmayıp işletmelerin yem maliyetlerini artırarak hayvancılık işletmelerinin ekonomik sürdürülebilirliğini de doğrudan etkilemektedir. Özellikle kaba yem açığının bulunduğu ülkelerde hasat sırasında kaybedilen her kilogram yem, ilave üretim maliyetleri veya dışarıdan yem temini gerektirdiğinden ekonomik kaybın etkisi katlanarak artmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, hasat kayıplarının azaltılmasının yeni üretim alanları oluşturmaktan çok daha düşük maliyetle gerçekleştirilebilen ve kaynak kullanım etkinliğini artıran uygulamalardan biri olduğunu ortaya koymaktadır (Köhler ve ark., 2019; Zamudio-Ayala ve ark., 2024). Türkiye'de kaliteli kaba yem açığının yaklaşık 17 milyon ton düzeyinde olduğu dikkate alındığında, hasat zincirinde meydana gelen küçük oranlı kayıpların dahi ulusal ölçekte önemli ekonomik sonuçlar doğurduğu görülmektedir. Örneğin yıllık 1.000 ton kuru ot üreten bir işletmede meydana gelen %20'lik toplam hasat kaybı yaklaşık 200 ton kuru madde kaybına karşılık gelmektedir. Bu miktar ortalama 35–40 baş süt sığırının bir yıllık kaba yem ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir. Dolayısıyla hasat kayıplarının azaltılması, ilave ekim alanına ihtiyaç duyulmaksızın işletmelerin yem maliyetlerini düşürme ve hayvansal

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

üretim verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Hasat zincirinin ekonomik analizi incelendiğinde, özellikle tırmıklama, balyalama, taşıma ve depolama aşamalarında meydana gelen kayıpların toplam maliyet içerisindeki payının oldukça yüksek olduğu bildirilmektedir. Yağış nedeniyle uzayan kuruma süresi, hasadın gecikmesi ve uygun olmayan depolama koşulları yem kalitesini düşürmekte; bunun sonucunda süt verimi, canlı ağırlık artışı ve yemden yararlanma düzeyi olumsuz etkilenmektedir (Randby & Bakken, 2021; Zamudio-Ayala ve ark., 2024). Son yıllarda geliştirilen hassas tarım uygulamaları, otomatik nem sensörleri, GPS destekli hasat yönetimi, balya yoğunluğu kontrol sistemleri ve karar destek yazılımları sayesinde hasat organizasyonu daha etkin yürütülebilmekte ve gereksiz iş gücü ile yakıt tüketimi azaltılabilmektedir. Özellikle geliştirilen dijital Forage Economics Calculator gibi karar destek sistemleri, üreticilerin hasat yöntemi, ekipman yatırımı ve yem maliyetlerini ekonomik açıdan karşılaştırmasına olanak sağlayarak hasat yönetiminde önemli avantajlar sunmaktadır (Subhashree et al., 2023). Bunun yanında hasat organizasyonundaki verimsizlikler de önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Hasat makinesi ile taşıma araçları arasındaki koordinasyonun yetersiz olması, biçerdöver veya silaj makinelerinin çalışma süresinin önemli bir bölümünü bekleme durumunda geçirmesine yol açmaktadır. Modern GPS tabanlı filo yönetim sistemleri ve lojistik planlamaları sayesinde bu bekleme süreleri azaltılarak hem yakıt tüketimi hem de toplam hasat maliyetleri düşürülebilmektedir (Tokarchuk et al., 2025).

9. HASAT KAYIPLARINI AZALTMA STRATEJİLERİ

Hasat kayıplarının azaltılmasında uygulanacak stratejiler: uygun hasat zamanının belirlenmesi, doğru makine seçimi, optimum makine ayarlarının yapılması ve modern hassas tarım teknolojilerinin kullanılması olmak üzere birbirini tamamlayan uygulamalardan oluşmaktadır(Ayala et al., 2024). Araştırmalar, doğru planlanan bir hasat organizasyonu ile kuru madde ve besin maddesi kayıplarının önemli ölçüde azaltılabileceğini, bunun da hem yem kalitesini hem de işletme kârlılığını artırdığını göstermektedir (Köhler ve ark., 2019; Zamudio-Ayala ve ark., 2024).

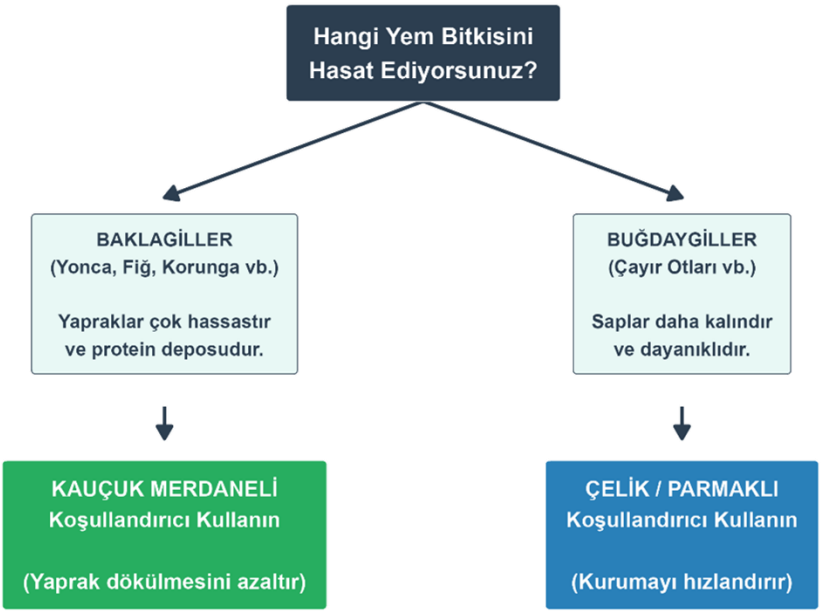
9.1. UYGUN HASAT ZAMANININ BELİRLENMESİ

Hasat zamanının doğru belirlenmesi, verim ve yem kalitesi arasındaki dengenin korunmasında en önemli faktörlerden biridir. Erken hasat edilen bitkiler daha yüksek ham protein ve sindirilebilirliğe sahip olurken, geciken hasatlarda lignifikasyonun artmasıyla birlikte yaprak kayıpları ve kalite kayıpları da yükselmektedir. Özellikle yoncada tomurcuklanma ile erken çiçeklenme dönemi, silajlık mısırda ise süt olum–hamur olum dönemi optimum hasat zamanı olarak kabul edilmektedir(Gámez et al., 2023). Günümüzde meteorolojik tahmin sistemleri ile entegre edilen hasat planlama modelleri sayesinde yağış riski dikkate alınarak en uygun hasat zamanı belirlenebilmekte ve tarla kayıpları azaltılabilmektedir (Lyons ve ark., 2019; Li ve ark., 2024).

9.2. DOĞRU MAKİNE SEÇİMİ VE MAKİNE AYARLARI

Bitki türüne uygun hasat makinesinin seçilmesi ve makine ayarlarının ürün özelliklerine göre yapılması mekanik kayıpların azaltılmasında temel uygulamalardır. Baklagil yem bitkilerinde kauçuk merdaneli koşullandırıcılar yaprak dökülmesini azaltırken, buğdaygil yem bitkilerinde çelik veya parmaklı koşullandırıcılar daha hızlı kuruma sağlayabilmektedir. Ayrıca biçme yüksekliği, PTO devri, bıçak keskinliği ve ilerleme hızının uygun Görselde ayarlanması hem kuru madde kayıplarını azaltmakta hem de bitkinin yeniden gelişmesini olumlu yönde etkilemektedir (Krzyżaniak ve ark., 2023; Çiftci ve Sonmete, 2025).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 7. Yem Bitkisi Türüne Göre Koşullandırıcı Seçimi Karar Ağacı

9.3. HASSAS TARIM TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI

Son yıllarda hassas tarım teknolojilerindeki gelişmeler, yem bitkileri hasadında kayıpların azaltılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Kendiyürür silaj makinelerinde kullanılan kütle akış sensörleri, nem sensörleri, GPS tabanlı yönlendirme sistemleri ve gerçek zamanlı verim haritalama teknolojileri sayesinde hasat performansı anlık olarak izlenebilmekte ve makine ayarları çalışma sırasında optimize edilebilmektedir. Bunun yanında yakın kızılötesi (NIR) sensörleri ile hasat sırasında kuru madde, ham protein ve lif içerikleri gerçek zamanlı olarak belirlenebilmekte, böylece ürünün optimum hasat zamanında toplanması mümkün olmaktadır (Ali & Kaul, 2025; Martelli et al., 2025)

9.4. UZAKTAN ALGILAMA VE DİJİTAL KARAR DESTEK SİSTEMLERİ

İnsansız hava araçları (İHA/drone), uydu görüntüleri ve hiperspektral kameralar kullanılarak yem bitkilerinin biyokütlesi, bitki sağlığı ve olgunluk düzeyi hasat öncesinde yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Böylece farklı gelişme gösteren alanlarda değişken zamanlı hasat planlaması yapılabilmekte ve gereksiz makine geçişleri azaltılmaktadır. Ayrıca yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı karar destek sistemleri, meteorolojik veriler ile bitki gelişimini birlikte değerlendirerek üreticilere optimum hasat zamanı konusunda öneriler sunmaktadır (Ali & Kaul, 2025; Geipel et al., 2021; Oliveira et al., 2020)

9.5. OPERATÖR EĞİTİMİ VE HASAT ORGANİZASYONU

Hasat kayıplarının azaltılmasında teknolojik ekipman kadar operatör bilgi ve deneyimi de büyük önem taşımaktadır. Makine ayarlarının ürün nemine göre yapılması, gereksiz tırmıklama işlemlerinden kaçınılması, biçme ile balyalama veya silolama arasındaki sürenin kısaltılması ve ekipmanların düzenli bakımının yapılması kayıpların azaltılmasını sağlamaktadır. Özellikle büyük işletmelerde GPS destekli makine yönetimi ve dijital filo planlaması sayesinde hasat kapasitesi artırılmakta, bekleme süreleri azaltılmakta ve yakıt tüketimi düşürülmektedir (Tokarchuk et al., 2025).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

10. YENİ NESİL HASAT TEKNOLOJİLERİ

Dijital tarım teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, yem bitkileri hasadında verimliliğin artırılması ve hasat kayıplarının azaltılması açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Geleneksel mekanizasyon sistemlerinin yerini giderek daha fazla sensör destekli, veri odaklı ve otonom teknolojiler almaktadır. GPS tabanlı yönlendirme sistemleri, uzaktan algılama teknikleri, yapay zekâ algoritmaları, gerçek zamanlı sensörler ve robotik hasat sistemleri sayesinde hasat süreci anlık olarak izlenebilmekte, makine ayarları otomatik optimize edilmekte ve hem ürün kayıpları hem de işletme maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Ali & Kaul, 2025; Karunathilake et al., 2023)

10.1. GPS DESTEKLİ AKILLI HASAT SİSTEMLERİ

GPS ve GNSS tabanlı otomatik dümenleme sistemleri, hasat makinelerinin aynı alan üzerinde gereksiz geçişlerini önleyerek yakıt tüketimini azaltmakta, biçme genişliğinin daha etkin kullanılmasını sağlamakta ve üst üste biçimden kaynaklanan ürün kayıplarını en aza indirmektedir. Ayrıca gerçek zamanlı konum verileri sayesinde hasat performansı kayıt altına alınabilmekte ve değişken verim gösteren alanlar için bölgesel hasat planlaması yapılabilmektedir (Karunathilake et al., 2023).

10.2. YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ UYGULAMALARI

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknikleri, yem bitkilerinde hasat zamanının belirlenmesi, verim tahmini ve kalite analizlerinde giderek daha yaygın kullanılmaktadır. Sentinel-2 uydu görüntüleri, meteorolojik veriler ve bitki gelişim parametreleri kullanılarak geliştirilen makine öğrenmesi modelleri sayesinde biyokütle verimi yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Özellikle CatBoost, Random Forest ve XGBoost algoritmalarının yem bitkilerinde geleneksel regresyon modellerine göre daha başarılı sonuçlar verdiği bildirilmektedir (Ali & Kaul, 2025). Benzer Görselde, Tedesco ve ark. (2022), çok bantlı spektral veriler kullanılarak yoncada biyokütle, ham protein ve kalite parametrelerinin yüksek doğrulukla tahmin edilebildiğini ortaya koymuştur.

10.3. DRONE VE UZAKTAN ALGILAMA TEKNOLOJİLERİ

İnsansız hava araçları (İHA) ve hiperspektral görüntüleme sistemleri, hasat öncesinde bitki gelişimi, biyokütle miktarı ve yem kalitesinin hızlı Görselde belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu sistemler sayesinde tarladaki mekânsal farklılıklar belirlenebilmekte ve yalnızca optimum olgunluğa ulaşan alanların hasat edilmesi mümkün olmaktadır. Oliveira ve ark. (2020), drone tabanlı çok bantlı görüntüler kullanarak silajlık yem bitkilerinde kuru madde, ham protein, NDF ve sindirilebilirlik değerlerini %20'nin altında hata oranıyla tahmin etmişlerdir. Geipel ve ark. (2021) ise UAV destekli hiperspektral görüntüleme ile yem bitkilerinde biyokütle tahmininin yüksek doğrulukla gerçekleştirilebildiğini bildirmiştir.

10.4. SENSÖR DESTEKLİ HASAT TEKNOLOJİLERİ

Yeni nesil silaj ve yem hasat makinelerinde kullanılan yakın kızılötesi (NIR) sensörleri, nem sensörleri ve kütle akış sensörleri sayesinde ürünün kuru madde içeriği, ham protein düzeyi ve lif oranı hasat sırasında gerçek zamanlı olarak belirlenebilmektedir. Böylece operatör, çalışma hızını ve makine ayarlarını ürün özelliklerine göre anında değiştirebilmekte, kalite kayıpları önemli ölçüde azaltılmaktadır. Martelli ve ark. (2025), NIR sensörlerinin yalnızca nem tayini değil aynı zamanda yem kalite parametrelerinin çevrim içi analizinde de yüksek doğruluk sağladığını bildirmiştir.

10.5. AKILLI BALYALAMA SİSTEMLERİ

Modern balya makinelerinde kullanılan elektronik yük hücreleri, dinamik ağırlık sensörleri ve otomatik sıkıştırma sistemleri, her balyanın hedef yoğunlukta oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu teknolojiler balya yoğunluğundaki değişkenliği azaltarak depolama kayıplarını ve taşıma maliyetlerini düşürmektedir. Ayrıca gerçek zamanlı balya ağırlığı ve nem ölçümleri sayesinde depolama sırasında oluşabilecek küflenme ve fermantasyon riskleri de azaltılmaktadır. Büyük kare balya makinelerinde geliştirilen dinamik ölçüm sistemlerinin kütle akışını %95'in üzerinde doğrulukla tahmin edebildiği bildirilmektedir (Shinners ve ark., 2013).

10.6. ROBOTİK VE OTONOM HASAT SİSTEMLERİ

Son yıllarda geliştirilen otonom hasat makineleri ve robotik platformlar, yem bitkileri hasadında insan müdahalesini azaltarak iş gücü verimliliğini artırmaktadır. GPS, LiDAR, görüntü işleme ve yapay zekâ destekli kontrol sistemleri sayesinde bu makineler hasat rotasını otomatik oluşturabilmekte, engelleri algılayabilmekte ve optimum çalışma hızını kendi kendine ayarlayabilmektedir. Tian ve ark. (2021) tarafından geliştirilen çok fonksiyonlu kendiyürür yem hasat makinesi; biçme, ezme, parçalama ve yükleme işlemlerini tek makinede gerçekleştirerek hem iş gücü ihtiyacını hem de hasat süresini önemli ölçüde azaltmıştır.

10.7. GELECEĞE YÖNELİK YAKLAŞIMLAR

Yakın gelecekte dijital ikiz (Digital Twin), Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut tabanlı veri yönetimi ve gerçek zamanlı karar destek sistemlerinin yem bitkileri hasadında yaygınlaşması beklenmektedir. Bu teknolojiler sayesinde hava durumu, bitki gelişimi, makine performansı ve yem kalite verileri aynı platformda değerlendirilerek en uygun hasat zamanı ve makine ayarları otomatik olarak belirlenebilecektir. Böylece hem ürün kayıplarının hem de enerji tüketiminin azaltılması ve sürdürülebilir yem üretiminin desteklenmesi mümkün olacaktır (Ali & Kaul, 2025; Karunathilake et al., 2023)

11. GELECEK PERSPEKTİFLERİ VE ARAŞTIRMA İHTİYAÇLARI

Yem bitkilerinde hasat kayıpları, üretim zincirinin birçok aşamasında ortaya çıkmasına rağmen özellikle mekanizasyon, iklim ve yönetim faktörlerinin birlikte etkisi nedeniyle hâlen tam olarak kontrol altına alınamamıştır. Türkiye ve benzeri gelişmekte olan ülkelerde yem bitkileri üretimi ve hayvansal üretim arasındaki dengesizlik dikkate alındığında, hasat kayıplarının azaltılması yalnızca teknik bir konu değil, aynı zamanda stratejik bir gıda güvenliği meselesi olarak değerlendirilmektedir. Türkiye'de hasat kayıplarına yönelik çalışmalar incelendiğinde, araştırmaların çoğunlukla belirli makinelerin performans analizine odaklandığı, ancak kayıp oranlarının tüm hasat zinciri boyunca bütüncül olarak ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Ülger ve Bastaban (1982) tarafından yapılan çalışmalar yonca hasadında tırmıklama ve namlu oluşturma sistemlerinin mekanizasyon özelliklerini ortaya koyarken, Ülger (2010) Erzurum koşullarında kuruma ve balyalama nem düzeyleri üzerine önemli bulgular sunmuştur. Benzer Görselde Güngörmez ve ark. (2023), yonca hasat sistemlerinde enerji tüketimini değerlendirmiştir. Bununla birlikte, koşullandırıcı tipi, tırmık yapısı ve balya makinelerinin kayıp oranlarına etkisini aynı çalışma kapsamında ele alan kapsamlı saha araştırmalarının sayısı oldukça sınırlıdır. Bir diğer önemli araştırma ihtiyacı, hasat kayıplarının ölçümünde kullanılan yöntemlerin standardizasyonudur. Farklı çalışmalarda kullanılan yöntemler arasında önemli farklılıklar bulunmakta, bu durum sonuçların karşılaştırılabilirliğini azaltmaktadır. Bu bağlamda Borreani ve ark. (2018), silo kayıplarının belirlenmesinde "toplam giriş–toplam çıkış" yönteminin pratik ve güvenilir bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir. Ancak tarla düzeyindeki kayıplar için benzer standart protokollerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yerli tarım makinelerinin performansının uluslararası standartlarla

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

karşılaştırılması da önemli bir araştırma alanıdır. Türkiye'de geliştirilen biçme, koşullandırma, tırmık ve balya makinelerinin saha performansları ile yabancı muadilleri arasındaki farkların belirlenmesi, hem mühendislik geliştirmeleri hem de ihracat potansiyelinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle enerji verimliliği, iş kapasitesi ve kayıp oranları gibi göstergeler üzerinden yapılacak karşılaştırmalı çalışmaların artırılması gerekmektedir. Makine ayarlarının hasat kayıpları üzerindeki etkisi de hâlen detaylandırılması gereken bir diğer alandır. Biçme yüksekliği, merdane basıncı, PTO devri ve ilerleme hızı gibi parametrelerin optimizasyonu, yaprak ve kuru madde kayıplarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Literatürde bu tür parametrelerin doğru ayarlanmasıyla yaprak kayıplarının %1–5 oranında azaltılabileceği bildirilmektedir (Greenlees et al., 2000). Ancak bu ilişkilerin farklı bitki türleri ve iklim koşulları altında daha geniş veri setleriyle doğrulanması gerekmektedir. İklim değişikliğinin hasat süreçleri üzerindeki etkisi de giderek önem kazanan bir araştırma alanıdır. Artan sıcaklık, değişken yağış rejimleri ve kuraklık stresi, hem bitki gelişimini hem de hasat zamanlamasını doğrudan etkilemektedir. Sebastià ve ark. (2023), kurak koşullarda korunganın yoncaya göre daha stabil performans gösterebildiğini ortaya koyarak alternatif yem bitkilerinin önemini vurgulamıştır. Ancak iklim değişikliğinin hasat kayıplarına etkisi, özellikle zamanlama, kuruma hızı ve kalite kayıpları açısından daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duymaktadır. Son olarak, gelecekte yapay zekâ, uzaktan algılama ve sensör teknolojilerinin hasat karar destek sistemlerine entegrasyonu, kayıpların azaltılmasında belirleyici rol oynayacaktır. Drone görüntüleme, uydu verileri ve makine öğrenmesi algoritmaları sayesinde hasat zamanı, verim ve kalite tahminleri yüksek doğrulukla yapılabilmektedir. Oliveira ve ark. (2020) tarafından geliştirilen modellerde silaj bitkilerinde biyokütle ve kalite parametrelerinin %20'nin altında hata ile tahmin edilebilmesi, bu teknolojilerin potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda gelecekteki araştırmaların, çok kaynaklı veri entegrasyonu ve gerçek zamanlı karar sistemleri üzerine yoğunlaşması gerekmektedir.

12. SONUÇ

Yem bitkilerinde hasat kayıpları, üretim zincirinin tüm aşamalarını etkileyen ve hem verim hem de yem kalitesi üzerinde doğrudan belirleyici olan kritik bir sorundur. Özellikle yaprak/sap oranı yüksek baklagil yem bitkilerinde (yonca, korunga, fiğ) hasat sürecinde meydana gelen yaprak dökülmesi, tırmıklama ve balyalama kaynaklı kayıplar, toplam kuru madde ve besin elementi kayıplarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır(Al-Gaadi, 2018). Bu durum yalnızca yem miktarında azalmaya değil, aynı zamanda protein, enerji ve sindirilebilirlik gibi kalite parametrelerinde de belirgin düşüşlere yol açmaktadır. Hasat kayıplarının düzeyi, kullanılan makine tipi ve ayarları, biçme yüksekliği, ilerleme hızı, PTO devri, bitkinin gelişme dönemi ve çevresel koşullar gibi çok sayıda faktörün etkileşimi ile Görsellenmektedir. Bu nedenle hasat sürecinde yapılacak küçük optimizasyonlar dahi toplam kayıp oranlarında önemli iyileşmeler sağlayabilmektedir. Özellikle modern koşullandırıcı sistemlerin doğru kullanımı, uygun tırmıklama teknikleri ve balyalama yoğunluğunun optimize edilmesi, yaprak kaybı ve mekanik kayıpları önemli ölçüde azaltabilmektedir. Türkiye'de yem bitkileri üretimi, artan hayvan varlığına rağmen kaba yem ihtiyacını karşılamakta yetersiz kalmakta ve önemli bir açık ortaya çıkmaktadır(Özkan et al., 2025). Bu durum dikkate alındığında, mevcut üretim potansiyeline rağmen hasat zincirinde meydana gelen kayıpların azaltılması, ilave ekim alanı ihtiyacını azaltabilecek stratejik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda hasat kayıplarının azaltılması yalnızca teknik bir iyileştirme değil, aynı zamanda hayvancılık sektörünün sürdürülebilirliği açısından ekonomik bir zorunluluktur. Son yıllarda geliştirilen hassas tarım uygulamaları, sensör tabanlı sistemler, yapay zekâ destekli karar mekanizmaları ve otonom hasat teknolojileri, hasat süreçlerinin daha etkin yönetilmesine olanak sağlamaktadır(Ali & Kaul, 2025). Bu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte hem ürün kayıplarının azaltılması hem

de iş gücü ve enerji verimliliğinin artırılması mümkün hale gelmektedir. Gelecekte bu sistemlerin entegrasyonu ile yem bitkileri üretiminde daha sürdürülebilir, izlenebilir ve yüksek verimli bir hasat yönetimi yapısına geçiş beklenmektedir.

KAYNAKLAR

A., C. (2023). L'evoluzione delle imballatrici per foraggi = The evolution of forage balers. *Archivio Istituzionale della Ricerca (Universita Degli Studi Di Milano)*. https://hdl.handle.net/2434/965777

Abd, E. M., A. M. (2025). Breeding for Non-Shattering Forage Vetch, Vicia Sativa L. *UKnowledge (University of Kentucky)*. https://uknowledge.uky.edu/igc/1989/session3b/12

Abilzhanuly, T., Iskakov, R., Nurgozhayev, S., Abilzhanov, D., Seipataliyev, O., & Kosherbay, D. (2024). Mathematical Modeling of the Processes of Mowing, Oriented Feeding, and Chopping of Stalk Forage by a Forage Harvester. *AgriEngineering*, *6*(4), 4766–4785. https://doi.org/10.3390/agriengineering6040273

AÇIKGÖZ, E., & Demirel, M. (2021). Van İli İpekyolu İlçesinde Üretilen Yonca Kuru Otunun Hasattan Depolamaya Kadar Besin Madde Kompozisyon Düzeyindeki Değişimin İncelenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, *31*(1), 121–132. https://doi.org/10.29133/yyutbd.833824

Akıncı, İ. H., & Kaya, A. (2025). Farmers' views on forage crops and livestock activities; A case study of Mersin province. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, *30*(2), 431–440. https://doi.org/10.37908/mkutbd.1642764

Alcântara, A. S. [UNESP]. (2021). Operational performance in corn silage mechanized harvest: case study [LA Referencia]. In *LA Referencia (Red Federada de Repositorios Institucionales de Publicaciones Científicas)*. http://hdl.handle.net/11449/210983

Al-Gaadi, K. A. (2018). Impact of raking and baling patterns on alfalfa hay dry matter and quality losses. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *25*(6), 1040–1048. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.02.009

Ali, A., & Kaul, H. (2025). Monitoring Yield and Quality of Forages and Grassland in the View of Precision Agriculture Applications—A Review. *Remote Sensing*, *17*(2), 279–279. https://doi.org/10.3390/rs17020279

Ayala, D. Z., Killerby, M. A., Charley, R. C., Chevaux, E., Drouin, P., Schmidt, R. J., Bright, J., & Romero, J. J. (2024). Factors affecting nutrient losses in hay production. *Grass and Forage Science*, *79*(4), 499–515. https://doi.org/10.1111/gfs.12685

Ayyıldız, M., & Çiçek, A. (2023). Üreticilerin Yem Bitkileri Desteğine İlişkin Memnuniyet Düzeyini Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi: Tokat İli Merkez İlçe Örneği. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, *10*(1), 143–151. https://doi.org/10.30910/turkjans.1193620

Bietresato, M., Pavan, S., Cozzi, G., & Sartori, L. (2013). A Numerical Approach for Evaluating and Properly Setting Self-Propelled Forage Harvesters. *Transactions of the ASABE*, *56*(1), 5–14. https://doi.org/10.13031/2013.42580

Borreani, G., Tabacco, E., & Ciotti, A. (1999). Effects of Mechanical Conditioning on Wilting of Alfalfa and Italian Ryegrass for Ensiling. *Agronomy Journal*, *91*(3), 457–463. https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030016x

Çelik, A. (2006). *Design and operating characteristics of a push type cutter bar mower*.

Celik, K., Akıncı, İ., Çağlayan, N., & Rennie, A. (2024). Structural strength analysis of a rotary drum mower during harvesting. *Journal of Agricultural Engineering*. https://doi.org/10.4081/jae.2024.1557

Çiftci, Y., & Sonmete, M. H. (2025). Determination of The Effects of Different Applications on Some Forage Quality Characteristics in Alfalfa Harvesting with Disc Mowers. *Selcuk Journal of Agricultural and Food Sciences*. https://doi.org/10.15316/sjafs.2025.012

Derrick, H. (2023). Impact of Forage Conditioner Systems on the Harvesting of Alfalfa. *Digital Commons - USU (Utah State University)*. https://doi.org/10.26076/fbfd-ebff

Dönmez, H. B. (2024). Yağış koşullarında yem bezelyesi + arpa karışımının ot verimi ve kalitesi üzerine türlerin karışım oranları ve hasat aşamalarının etkisi. *DergiPark (Istanbul University)*. https://dergipark.org.tr/tr/pub/kuzfad/issue/89249/1567891

Duhatschek, D., Pilati, A., Luckasson, L., Goeser, J., Coons, E., Ferraretto, L. F., Bell, J. M., Smith, J. K., Paudyal, S., & Piñeiro, J. (2025). Effects of a novel onboard sorghum kernel processor and height of cut on berry processing score and ruminal in situ starch disappearance of forage sorghum ensiled for 0 and 90 days. *JDS Communications*, *6*(5), 644–648. https://doi.org/10.3168/jdsc.2025-0762

Fuglie, K. O., Peters, M., & Burkart, S. (2021). The Extent and Economic Significance of Cultivated Forage Crops in Developing Countries. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.712136

Gámez, A. L., Vatter, T., Santesteban, L. G., Araus, J. L., & Aranjuelo, Í. (2023). Onfield estimation of quality parameters in alfalfa through hyperspectral spectrometer data. *DIGITAL.CSIC (Spanish National Research Council (CSIC))*, *216*, 108463–108463. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108463

Gana, I. M., Gbabo, A., Hassan, A. M., & Yusuf, A. M. (2023). Effects of operating speed, cutter bar cutting speed and forage plant moisture content on performance of a forage harvester. *MOJ Food Processing & Technology*, *11*(1), 1–7. https://doi.org/10.15406/mojfpt.2023.11.00271

Geipel, J., Bakken, A. K., Jørgensen, M., & Korsæth, A. (2021). Forage yield and quality estimation by means of UAV and hyperspectral imaging. *Precision Agriculture*, *22*(5), 1437–1463. https://doi.org/10.1007/s11119-021-09790-2

Greenlees, W. J., Hanna, H. M., Shinners, K. J., Marley, S. J., & Bailey, T. B. (2000). A COMPARISON OF FOUR MOWER CONDITIONERS ON DRYING RATE AND LEAF LOSS IN ALFALFA AND GRASS. *Applied Engineering in Agriculture*, *16*(1). https://doi.org/10.13031/2013.4984

GÜLÜMSER, E., Mut, H., BAŞARAN, U., & DOĞRUSÖZ, M. Ç. (2019). Melas veya Arpa Kırması İlavesinin Börülce ve Soya Silajlarının Kalitesi Üzerine Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *6*, 161–167. https://doi.org/10.35193/bseufbd.589388

GÜNER, D. E. (1999). Biçme-Ezme Makinasının Yoncanın Tarlada Kuruma Hızına Etkisi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, *5*(2), 23–29. https://doi.org/10.1501/10.501/tarimbil_0000000019

Johnson, L., Harrison, J. H., Davidson, D., Robutti, J. L., Swift, M. L., Mahanna, W. C., & Shinners, K. J. (2002). Corn Silage Management I: Effects of Hybrid, Maturity, and Mechanical Processing on Chemical and Physical Characteristics. *Journal of Dairy Science*, *85*(4), 833–853. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(02)74143-x

Karunathilake, E. M. B. M., Le, A. T., Heo, S., Chung, Y. S., & Mansoor, S. (2023). The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture*, *13*(8), 1593–1593. https://doi.org/10.3390/agriculture13081593

Kebede, G. (2018). Morpho-agronomic performance of vetch species and their accessions grown under nitosol and vertisol conditions in the central highlands of Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, *7*(1). https://doi.org/10.1186/s40066-018-0243-8

Koçak, E. (2023). A Review of The Current Status of Forage Crops Cultivation and Evaluation in Türkiye. *DergiPark (Istanbul University)*, *4*(2), 59–65. https://doi.org/10.51801/turkjrfs.1327064

Köhler, B., Taube, F., Ostertag, J., Thurner, S., Kluß, C., & Spiekers, H. (2019). Dry-matter losses and changes in nutrient concentrations in grass and maize silages stored in bunker silos. *Grass and Forage Science*, *74*(2), 274–283. https://doi.org/10.1111/gfs.12430

Kondratuk, D., Trukhanska, O., & Priadkin, M. (2024). ANALYSIS OF ROTARY MOWER DESIGNS – CONDITIONERS. *ENGINEERING ENERGY TRANSPORT AIC*, 106–114. https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-1-12

Krzyżaniak, K., Kowalik, I., & Rybacki, P. (2023). Evaluation of the Operating Parameters of Self-Propelled Forage Harvesters During Maize Silage Harvest. *Agricultural Engineering/Inżynieria Rolnicza*, *27*(1), 229–239. https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0017

Leon-Tinoco, A. Y., García, M., Stonoha-Arther, C., Brito, A. F., & Romero, J. J. (2025). Factors Influencing Protein Utilisation in Legume Silage and Hay for Ruminants. *Grass and Forage Science*, *80*(2). https://doi.org/10.1111/gfs.12729

Li, Y., Xie, J., Liu, H., & Han, L. (2024). A Method of Coupling Lucerne Quality with Meteorological Data to Evaluate the Suitability of Hay Harvest. *Agronomy*, *14*(4), 761–761. https://doi.org/10.3390/agronomy14040761

Lyons, S. E., Ketterings, Q. M., Godwin, G. S., Cherney, D. J. R., Cherney, J. H., Amburgh, M. E. V., Meisinger, J. J., & Kilcer, T. (2019). Optimal harvest timing for brown midrib forage sorghum yield, nutritive value, and ration performance. *Journal of Dairy Science*, *102*(8), 7134–7149. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16516

Martelli, R., Ali, A., Rondelli, V., & Barbanti, L. (2025). Are We Up to the Best Practices in Forage and Grassland Precision Harvest? A Review. *Grass and Forage Science*, *80*(1). https://doi.org/10.1111/gfs.12701

Nave, R. L. G. (2025). Sustainable Forage Production in Crop–Livestock Systems. *Agronomy*, *15*(3), 657–657. https://doi.org/10.3390/agronomy15030657

Okçu, M. (2020). Türkiye ve Doğu Anadolu Bölgesi Çayır-Mer'a Alanları, Hayvan Varlığı ve Yem Bitkileri Tarımının Mevcut Durumu. *Atatürk University Journal of Agricultural Faculty*, *51*(3), 321–330. https://doi.org/10.17097/ataunizfd.708884

Oliveira, R. A. de, Näsi, R., Niemeläinen, O., Nyholm, L., Alhonoja, K., Kaivosoja, J., Jauhiainen, L., Viljanen, N., Nezami, S., Markelin, L., Hakala, T., & Honkavaara, E. (2020). Machine learning estimators for the quantity and quality of grass swards used for silage production using drone-based imaging spectrometry and photogrammetry. *Remote Sensing of Environment*, *246*, 111830–111830. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111830

Özkan, U., Yılmaz, D. İ., Tenikecier, H. S., & Ateş, E. (2025). Türkiye'de Kaba Yem ve Kuru Ot Durumu: 2004-2024 Dönem Analizi. *Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi*, *8*(1), 93–107. https://doi.org/10.55257/ethabd.1683613

Özkurt, M., & Çınar, S. (2020). Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi ve Muş İlinde Çayır Mera Yem Bitkileri ve Hayvancılığın Bugünkü Durumu. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, *8*(10), 2191–2201. https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i10.2191-2201.3656

Ponnampalam, E. N., Jairath, G., Alves, S. P., Gadzama, I. U., Santhiravel, S., Mapiye, C., & Holman, B. W. B. (2025). Sustainable livestock production by utilising forages, supplements, and agricultural by-products: Enhancing productivity, muscle gain, and meat quality – A review. *Meat Science*, *229*, 109921–109921. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2025.109921

Randby, Å. T., & Bakken, A. K. (2021). Bunkers or round bales: Losses and silage quality with or without acid treatment of low dry matter grass crops. *Animal Feed Science and Technology*, *275*, 114868–114868. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114868

Ridla, M., Albarki, H. R., Risyahadi, S. T., & Sukarman, S. (2024). Effects of wilting on silage quality: a meta-analysis. *Animal Bioscience*, *37*(7), 1185–1195. https://doi.org/10.5713/ab.23.0403

Rotz, C. A. (1995). Loss Models for Forage Harvest. *Transactions of the ASAE*, *38*(6), 1621–1631. https://doi.org/10.13031/2013.27987

Rotz, C. A., & Abrams, S. M. (1988). Losses and Quality Changes During Alfalfa Hay Harvest and Storage. *Transactions of the ASAE*, *31*(2), 350–355. https://doi.org/10.13031/2013.30713

Sheppard, S., Cattani, D. J., Ominski, K., Biligetu, B., Bittman, S., & McGeough, E. J. (2019). Sainfoin production in western Canada: A review of agronomic potential and environmental benefits. *Grass and Forage Science*, *74*(1), 6–18. https://doi.org/10.1111/gfs.12403

Shinners, K. J., Koegel, R. G., & Straub, R. J. (1991). Leaf Loss and Drying Rate of Alfalfa as Affected by Conditioning Roll Type. *Applied Engineering in Agriculture*, *7*(1), 46–49. https://doi.org/10.13031/2013.26189

Shinners, T. J., Digman, M. F., & Panuska, J. C. (2012). Overlap Loss of Manually and Automatically Guided Mowers. *Applied Engineering in Agriculture*, *28*(1), 5–8. https://doi.org/10.13031/2013.41277

Subhashree, S. N., Igathinathane, C., Akyüz, A., Borhan, M. S., Hendrickson, J., Archer, D. W., Liebig, M. A., Toledo, D., Sedivec, K. K., Kronberg, S. L., & Halvorson, J. J. (2023). Tools for Predicting Forage Growth in Rangelands and Economic Analyses—A Systematic Review. *Agriculture*, *13*(2), 455–455. https://doi.org/10.3390/agriculture13020455

Sweetman, E., Stockdale, E., Topp, C. F. E., Newbold, J. R., & Watson, C. A. (2022). *Scoping Study on the Opportunities and Barriers of Improved Forages for Livestock Sustainability and Productivity (ForaGIN)*. Scotland's Rural College (SRUC).

Tokarchuk, O., Mytko, M. V., Burlaka, S., Zozulyak, I., & Stadnik, M. (2025). Comparison of technological operations in processing alfalufer hay in terms of their impact on forage quality and quantity. *Technology Audit and Production Reserves*, *2*, 43–51. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326047

Tuğrul, K. M., & Bozbay, C. K. (2023). EFFECT OF TWO TYPES OF MOWERS ON CROP DRYING RATE, YIELD AND QUALITY OF ALFALFA (Medicago sativa L.). *Applied Ecology and Environmental Research*, *21*(3), 2731–2745. https://doi.org/10.15666/aeer/2103_27312745

Ülger, P. (2010). ERZURUM OVASI İKLİM KOŞULLARINDA YONCANIN GÜNEŞ ENERJİSİ İLE KURUTULMA VE BİÇİMDEN SONRA UYGUN BALYALAMA NEM ORANINA ERİŞME OLANAKLARI ÜZERİNDE BİR ARAŞTIRMA. *DergiPark (Istanbul University)*. https://dergipark.org.tr/en/pub/ataunizfd/article/41347

Wilkinson, J. M. (2015). Managing silage making to reduce losses. *Livestock*, *20*(5), 280–286. https://doi.org/10.12968/live.2015.20.5.280

Wróbel, B., Zielewicz, W., & Paszkiewicz-Jasińska, A. (2025). Improving Forage Quality from Permanent Grasslands to Enhance Ruminant Productivity. *Agriculture*, *15*(13), 1438–1438. https://doi.org/10.3390/agriculture15131438

Wu, B., Zuo, T., Li, Z., Qian, H., Huang, T., & Xiang, Y. (2023). Numerical Simulation and Optimization of the Airflow Field of a Forage Drum Mower. *Applied Sciences*, *13*(10), 5910–5910. https://doi.org/10.3390/app13105910

Zawada, M., Nijak, M., Mac, J., Szczepaniak, J., Legutko, S., Gościańska-Łowińska, J., Szymczyk, S., Kaźmierczak, M., Zwierzyński, M., Wojciechowski, J., Szulc, T., & Rogacki, R. (2023). Control and Measurement Systems Supporting the Production of Haylage in Baler-Wrapper Machines. *Sensors*, *23*(6), 2992–2992. https://doi.org/10.3390/s23062992

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

NDVI GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİNİN ÇAYIR VE MERALARDA KULLANIMI

Talha KİTAPÇI
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Van, Türkiye
E-posta: talhakitapci@hotmail.com ORCID ID: 0000-0002-7107-1135
Dr. Öğr. Üyesi Zübeyir AĞIRAĞAÇ
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Van, Türkiye
E-posta: zubeyiragiragac@yyu.edu.tr ORCID ID: 0000-0003-1414-1472
Prof. Dr. Şeyda ZORER ÇELEBİ
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Van, Türkiye
E-posta: seydazorer@yyu.edu.tr ORCID ID: 0000-0003-1278-1994

ÖZET

Çayır ve mera ekosistemlerinin sürdürülebilir yönetimi için biyokütle, yem kalitesi ve fenolojik değişimlerin izlenmesi kritik öneme sahiptir. Geleneksel ölçüm yöntemlerinin yüksek maliyet ve zaman kısıtlamalarına karşın, Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (NDVI) tabanlı uzaktan algılama teknolojileri geniş ölçekli, hassas ve ekonomik çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada; uydu (Sentinel-2, Landsat, MODIS), insansız hava aracı (İHA) ve çoklu sensör füzyonu (optik ve SAR) yaklaşımlarının meralardaki kullanım potansiyeli kapsamlı biçimde incelenmiştir. NDVI zaman serileri ve makine öğrenmesi algoritmaları (Rastgele Orman, Destek Vektör Makineleri vb.) entegre edilerek biyokütle tahmini, karbon stok hesaplaması ve iklim değişikliğine bağlı kuraklık etkilerinin izlenmesinde yüksek doğruluk oranlarına ulaşıldığı saptanmıştır. Optik ve mikrodalga verilerin birleştirilmesinin bulutluluk gibi kısıtları aşarak model performansını artırdığı görülmüştür. Elde edilen bulgular, NDVI tabanlı sistemlerin geleneksel saha ölçümlerine kıyasla önemli maliyet avantajları sağladığını ve mera yönetimi için etkin bir karar destek mekanizması oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler : Biyokütle Tahmini, Çayır ve Mera, Makine Öğrenmesi, NDVI, Uzaktan Algılama

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

NDVI GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİNİN ÇAYIR VE MERALARDA KULLANIMI

1.GİRİŞ

Çayır ve mera ekosistemleri hem biyolojik çeşitlilik hem de sürdürülebilir hayvancılık açısından kritik öneme sahiptir. Bu alanların verimliliği, otlatma kapasitesi ve yem kalitesi gibi parametrelerin doğru ve zamanında izlenmesi hem ekosistem sağlığı hem de ekonomik sürdürülebilirlik için gereklidir. Geleneksel arazi gözlemleri ve laboratuvar analizleri, geniş alanlarda ve yüksek zamansal çözünürlükte izleme için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle uzaktan algılama teknolojileri ve özellikle Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (NDVI), çayır ve meraların izlenmesinde devrim niteliğinde bir araç olarak öne çıkmıştır (Mermer vd., 2011).

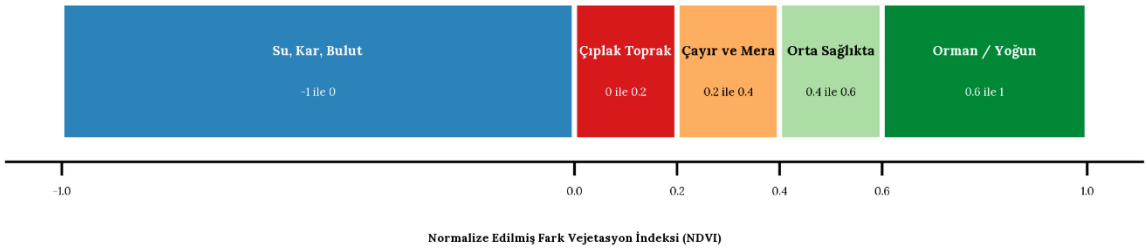
Bu rapor NDVI teknolojisinin çayır ve meralarda kullanımı kapsamlı şekilde incelemektedir. NDVI'nın teorik temellerinden başlayarak, farklı uydu sensörlerinin karşılaştırılması, yüksek çözünürlüklü ticari veriler, İHA ve proksimal sensör uygulamaları, biyokütle ve yem kalitesi tahmini, fenoloji ve zaman serisi analizleri, otlatma etkilerinin izlenmesi, veri işleme ve doğrulama metrikleri, makine öğrenmesi yaklaşımları, Türkiye ve bölgesel örnekler ile politika ve yönetim önerilerine kadar geniş bir yelpazede bulgular sunulmaktadır.

2. NDVI'NIN TEMELLERİ VE TEORİK ARKA PLANI

NDVI, bitki örtüsünün fotosentetik aktivitesini ve canlılığını ölçmek için kullanılan, kırmızı (RED) ve yakın kızılötesi (NIR) bantlar arasındaki yansıma farkına dayalı bir indekstir. Temel formülü aşağıdaki gibidir:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Sağlıklı bitkiler, klorofil nedeniyle kırmızı ışığı yoğun şekilde emerken, hücresel yapısı sayesinde NIR ışığını güçlü şekilde yansıtır. Bu nedenle, NDVI değeri +1'e yaklaştıkça yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünü, 0'a yaklaştıkça çıplak toprak veya zayıf vejetasyonu, -1'e yaklaştıkça ise su, kar veya bulut gibi bitki örtüsü olmayan yüzeyleri temsil eder (Mermer vd., 2011; Turan vd., 2022).



Görsel 1. NDVI Değer Skalası ve Arazi Örtüsü

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

NDVI'nın bu spektral temeli, bitki gelişiminin fenolojik evrelerinin, stres durumlarının ve biyokütle miktarının uzaktan algılama ile izlenmesini mümkün kılar. NDVI'nın teorik olarak -1 ile +1 arasında değişen değerleri, pratikte çoğunlukla 0 ile 0.8 arasında gözlemlenir. 0.2-0.4 arası değerler çayır ve mera gibi alanları, 0.6 ve üzeri ise orman veya çok yoğun bitki örtüsünü gösterir (Başarsoft, 2021; Turan vd., 2022).

3. NDVI'NIN BİYOFİZİKSEL ANLAMI VE SINIRLAMALARI

NDVI, fotosentetik olarak aktif biyokütlenin ve yaprak alan indeksinin (LAI) bir göstergesidir. Ancak çok yoğun bitki örtüsünde NDVI'nın doygunluğa ulaşabileceği ve LAI > 3 olduğunda farklılıkları ayırt edemeyeceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, son çalışmalar NDVI'nın fotosentetik kapasiteyle doğrudan ilişkili olduğunu ve doygunluk iddiasının çoğu durumda abartılı olduğunu göstermektedir.

NDVI'nın avantajları arasında basitliği, uzun arşiv geçmişi, farklı sensörler arasında karşılaştırılabilirliği ve atmosferik etkileri minimize etmesi sayılabilir. Ancak toprak arka planı, atmosferik koşullar, sensör kalibrasyonu ve geometrik farklılıklar gibi faktörler NDVI'nın doğruluğunu etkileyebilir. NDVI'nın yorumlanmasında dikkatli olunmalı ve gerekirse tamamlayıcı indeksler (EVI, SAVI, NDRE vb.) ile birlikte kullanılmalıdır (Tuğaç vd., 2019).

4. ALTERNATİF VE TAMAMLAYICI VEJETASYON İNDEKSLERİ (EVI, SAVI, NDRE)

NDVI'nın bazı sınırlamalarını aşmak için geliştirilmiş alternatif indeksler şunlardır:

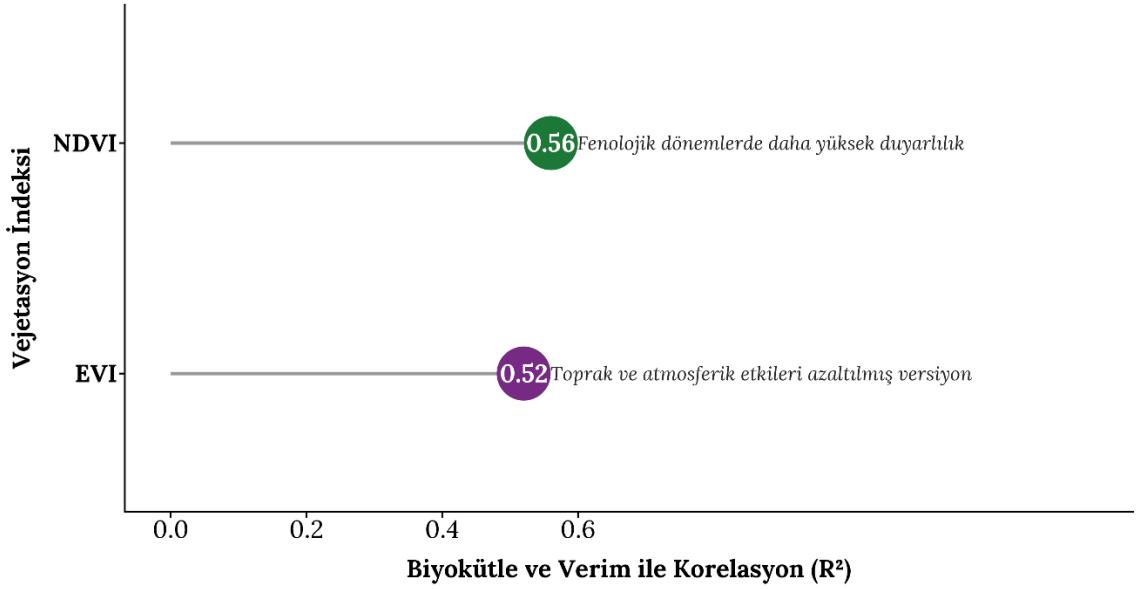
EVI (Enhanced Vegetation Index): Toprak arka planı ve atmosferik etkileri azaltır, ancak mavi bant kalibrasyon sorunları nedeniyle bazı uygulamalarda sınırlıdır.

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index): Toprak etkisini minimize eder, özellikle seyrek bitki örtüsünde avantajlıdır.

NDRE (Normalized Difference Red Edge): Kırmızı kenar bantlarını kullanarak klorofil ve azot içeriğiyle daha yüksek korelasyon sağlar.

EVI2: EVI'nin iki bantlı versiyonu olup, NDVI ile yüksek korelasyon gösterir ve mavi bant gerektirmez (Tuğaç vd., 2019).

Türkiye ve Akdeniz ekosistemlerinde yapılan çalışmalarda, NDVI ve EVI'nin biyokütle ve verim ile korelasyonları benzer düzeydedir (NDVI için R^2=0.56, EVI için R^2=0.52). Ancak fenolojik olarak kritik dönemlerde NDVI'nın daha yüksek duyarlılık gösterdiği belirtilmiştir (Tuğaç vd., 2019).



Görsel 2. Alternatif Vejetasyon İndekslerinin Performans Karşılaştırması

5. NDVI DOYGUNLUĞU, SENSÖR BAĞIMLILIĞI VE HATA KAYNAKLARI

NDVI'nın doygunluğu, özellikle yoğun orman ve çayır alanlarında LAI > 3 olduğunda ortaya çıkar ve farklılıkları ayırt etme gücünü azaltır. Sensörler arası bant farklılıkları, kalibrasyon hataları, atmosferik koşullar ve bulut örtüsü, NDVI'nın doğruluğunu etkileyen başlıca hata kaynaklarıdır. Son yıllarda makine öğrenmesi tabanlı kalibrasyonlar ve çapraz sensör düzeltmeleriyle bu sorunlar büyük ölçüde azaltılmıştır (Zhao vd., 2023).

6. UYDU SENSÖRLERİ, İHA'LAR VE TİCARİ VERİLER

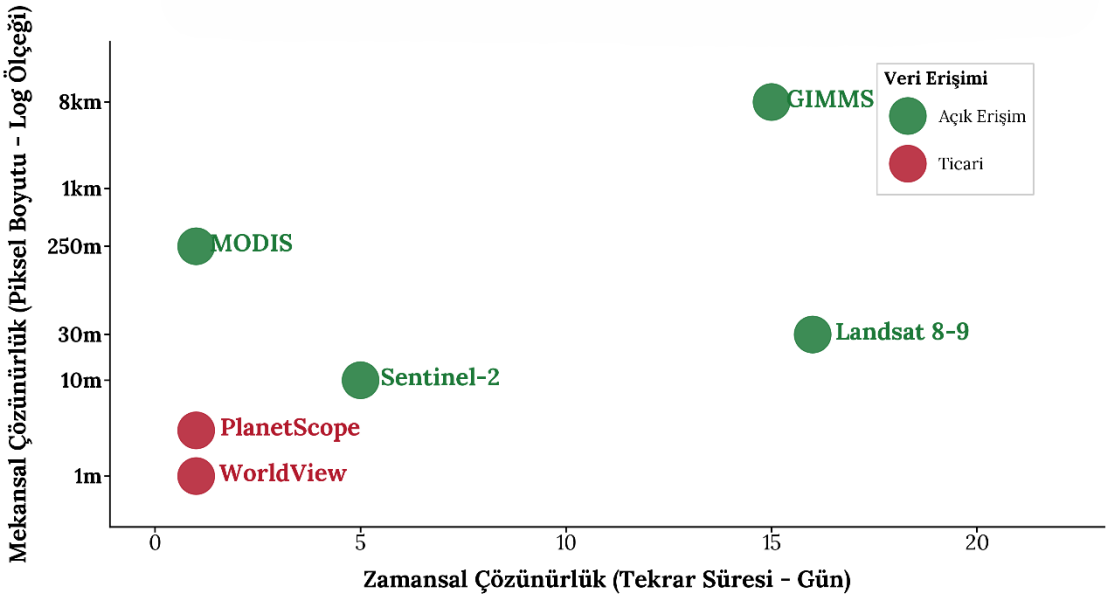
6.1. SENTİNEL-2, LANDSAT, MODIS VE GIMMS KARŞILAŞTIRMALARI

Sentinel-2, Copernicus programı kapsamında 10 m mekansal çözünürlükte, 13 bantlı multispektral görüntüler sunar. Özellikle Band 4 (665 nm, kırmızı) ve Band 8 (842 nm, NIR) NDVI hesaplaması için kullanılır. Sentinel-2'nin yüksek mekansal ve zamansal çözünürlüğü, çayır ve meralarda küçük ölçekli değişimlerin ve otlatma etkilerinin izlenmesini mümkün kılar (Sentinel Hub, 2017). Portekiz'de yapılan üç yıllık bir çalışmada, Sentinel-2 NDVI değerleri ile mera nemi (PMC), ham protein (CP) ve nötr deterjan lif (NDF) arasında sırasıyla R^2=0.72, 0.75 ve 0.50 düzeyinde anlamlı korelasyonlar bulunmuştur. Bu bulgular, Sentinel-2'nin mera kalitesinin izlenmesinde güçlü bir araç olduğunu göstermektedir.

Landsat serisi (Landsat 4-5 TM, 7 ETM+, 8-9 OLI) 30 m mekansal çözünürlükte, 16 günlük tekrar süresiyle NDVI hesaplaması için yaygın olarak kullanılır. Landsat'ın uzun arşiv geçmişi, çayır ve meraların zamansal değişiminin izlenmesinde avantaj sağlar. MODIS ise 250-500 m çözünürlükte, günlük veya 16 günlük kompozit NDVI ürünleriyle geniş alanların ve fenolojik döngülerin izlenmesinde tercih edilir (Zhao vd., 2023).

GIMMS NDVI3g ve yeni PKU GIMMS NDVI ürünleri, AVHRR sensörlerinden türetilmiş olup, 1980'lerden günümüze kadar 15 günlük aralıklarla küresel NDVI zaman serileri

sunar. Son yıllarda Landsat ve MODIS verileriyle makine öğrenmesi tabanlı kalibrasyonlar sayesinde, GIMMS NDVI'nın doğruluğu ve zamansal tutarlılığı önemli ölçüde artmıştır (R^2=0.97, RMSE=0.05) (Zhao vd., 2023).



Görsel 3. Uydu Sensörlerinin Mekânsal ve Zamansal Çözünürlük Matrisi

Görsel 3'te farklı sensörlerin mekânsal ve zamansal çözünürlükleri ile NDVI hesaplamasında kullanılan bantlarını özetlemektedir. Sentinel-2 ve Landsat, çayır meralarda hem detaylı hem de uzun dönemli izleme için idealdir. MODIS ve GIMMS ise geniş alanların ve uzun vadeli trendlerin analizinde öne çıkar (Zhao vd., 2023; Planet Labs, 2018).

6.2. YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ TİCARİ VERİLER: PLANET VE WORLDVİEW

PlanetScope (3-5 m) ve WorldView (0.3-2 m) gibi ticari uydular, çok yüksek mekansal çözünürlükte NDVI ve diğer indekslerin hesaplanmasını sağlar. Bu sensörler, küçük ölçekli mera alanlarında, otlatma etkilerinin, bitki kompozisyonunun ve mikro-habitat farklılıklarının detaylı haritalanmasında kullanılmaktadır. Ancak veri maliyeti ve arşiv uzunluğu, geniş ölçekli ve uzun dönemli izlemelerde kısıtlayıcı olabilir (Planet Labs, 2018).

6.3. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI (İHA/UAV) VE MULTİSPEKTRAL SENSÖRLER

İHA'lar, yüksek mekansal çözünürlükte (cm düzeyinde) multispektral görüntüler sağlayarak, çayır ve meralarda bitki sağlığı, stres, biyokütle ve tür kompozisyonunun detaylı haritalanmasını mümkün kılar. Multispektral kameralar (ör. Parrot Sequoia+) ile elde edilen NDVI değerleri, segmentasyon ve nesne tabanlı analiz (OBIA) ile birleştirilerek, bireysel bitki veya ağaçların sağlık durumu ve mekansal dağılımı hassas Görselde belirlenebilir (Yiğit ve Orhan, 2025).

NDVI analizleriyle sağlıklı (NDVI > 0.6), orta sağlıkta (0.4-0.6) ve stres altındaki (NDVI < 0.4) bitkiler ayrıştırılabilir. İHA tabanlı analizlerde doğruluk metrikleri (ör. RMSE,

Kappa, F-Skor) ile model performansı değerlendirilir ve arazi gerçekliğiyle karşılaştırılır. Son yıllarda OBIA ve makine öğrenmesi algoritmaları (Random Forest, CNN) ile İHA verilerinin sınıflandırma doğruluğu %89-92 düzeyine ulaşmıştır.

6.4. PROKSİMAL SENSÖRLER VE SAHA SPEKTROMETRESİ

Proksimal sensörler (ör. Greenseeker), arazi üzerinde doğrudan NDVI ölçümü yaparak, uydu ve İHA verilerinin kalibrasyonu ve doğrulamasında kullanılır. Saha spektrometreleri, bitki örtüsünün spektral imzasını detaylı Görselde ölçerek, NDVI ve diğer indekslerin laboratuvar veya arazi koşullarında hassas hesaplanmasını sağlar. Bu yöntemler, özellikle küçük alanlarda ve model geliştirme çalışmalarında önemlidir (Apogee Instruments, 2026).

7. ÇOKLU SENSÖR VERİ FÜZYONU

7.1. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE SENSÖR ÖZELLİKLERİ

Çoklu sensör veri füzyonu, optik (multispektral/hiperspektral) ve mikrodalga (SAR: Synthetic Aperture Radar) verilerinin entegrasyonu yoluyla çayır ve mera ekosistemlerinin izlenmesinde doğruluk ve güvenilirliği artıran yenilikçi bir yaklaşımdır. Optik sensörler, bitki örtüsünün yansıtıcı özelliklerini ve fotosentetik aktivitesini (NDVI, EVI, SAVI gibi indeksler) yüksek mekânsal ve spektral çözünürlükte sunarken, SAR sensörleri bulut örtüsünden ve atmosferik koşullardan bağımsız olarak yüzeyin geometrik ve dielektrik özelliklerini (ör. toprak nemi, yüzey pürüzlülüğü, bitki yapısı) ölçebilmektedir (Santoro ve Cartus, 2018). Son yıllarda, Sentinel-1 (C-band SAR), Sentinel-2 (optik), ALOS PALSAR (L-band SAR), Landsat TM/OLI ve PlanetScope gibi platformlar, çoklu sensör füzyonu çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

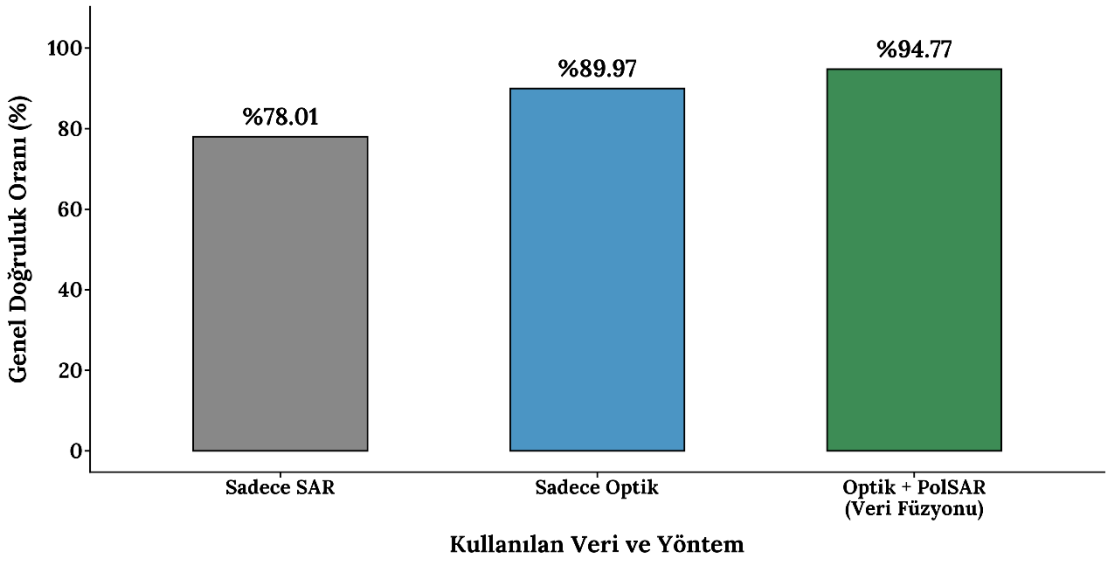
Çizelge 1. Sentinel-1A ve Sentinel-2A Sensörlerinin Temel Teknik Özellikleri

Özellikler	**SENTINEL-1A (C Band)**	**SENTINEL-2A (Optik)**
Fırlatma Yılı	2014	2015
Yörünge Yüksekliği	693 km	786 km
Sensör Modu	IW	MSI
Polarizasyon	VV+VH, HH+HV	-
Dalga Boyu	5.5466 cm	B2: 0.490 µm, B3: 0.560 µm, B4: 0.665 µm, B8: 0.842 µm
Radyometrik Çözünürlük	-	12 bit
Şerit Genişliği	290 km	250 km

Bu sensörlerin entegrasyonu, özellikle bulutlu, yağışlı ve değişken hava koşullarında optik verinin eksik kaldığı durumlarda SAR'ın tamamlayıcı rolünü öne çıkarmaktadır (Santoro ve Cartus, 2018).

7.2. TEKNİK YAKLAŞIMLAR VE FÜZYON ALGORİTMALARI

Çoklu sensör füzyonunda temel amaç, farklı sensörlerin sağladığı tamamlayıcı bilgileri birleştirerek arazi örtüsü sınıflandırması, biyokütle tahmini, toprak nemi izleme ve karbon stok hesaplamalarında doğruluğu artırmaktır. Füzyon algoritmaları arasında dalgacık çözünürlük birleştirme (WRM), yüksek geçirgenli filtre (HPF), Gram-Schmidt, Ehlers ve Brovey yöntemleri öne çıkmaktadır. Çanakkale'de yapılan bir çalışmada, Alos Palsar (HH, HV, VV) ve Landsat TM (SWIR, NIR, R, G) verileri Gram-Schmidt füzyon yöntemiyle birleştirilmiş ve en yüksek sınıflandırma doğruluğu %94.77 olarak elde edilmiştir. Sadece optik görüntüyle doğruluk %89.97, sadece SAR ile %78.01 olarak rapor edilmiştir (Açıksarı, 2019).

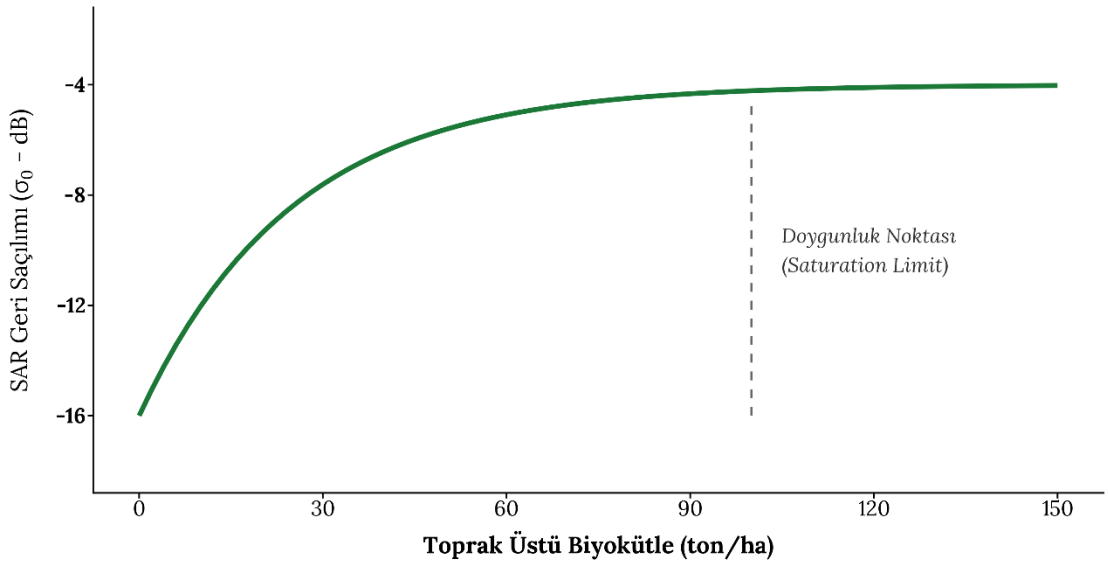


Görsel 4. Çoklu Sensör Veri Füzyonunun Sınıflandırma Doğruluğuna Etkisi

SAR verisinin biyofiziksel parametrelerle ilişkisi, geri saçılım (backscatter) modelleriyle analiz edilmektedir. Linear, rise-to-max-exponential ve Water Cloud Model (WCM) gibi modeller, SAR geri saçılımı ile biyokütle, toprak nemi ve bitki yapısı arasındaki ilişkileri tanımlamak için kullanılmaktadır. Örneğin, rise-to-max-exponential modelinde SAR geri saçılımı ile biyokütle arasında doğrusal olmayan bir ilişki varsayılır:

$$\sigma_0 = a + b(1 - e^{-cB})$$

Burada σ_0 SAR geri saçılımı, B biyokütle, a, b, c ise model parametreleridir (Santoro ve Cartus, 2018).



Görsel 5. SAR Geri Saçılımı ve Biyokütle Arasındaki Doygunluk Eğrisi (WCM)

7.3. OPTİK VE SAR ENTEGRASYONUNUN SINIFLANDIRMA VE DOĞRULUK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Çoklu sensör füzyonu, arazi örtüsü sınıflandırmasında ve biyokütle tahmininde doğruluk oranlarını anlamlı Görselde artırmaktadır. Çanakkale örneğinde, optik+PolSAR+NDVI veri füzyonuyla genel doğruluk %87.9, kappa değeri 0.84 olarak elde edilmiştir. Sadece optik+NDVI ile doğruluk %87, kappa 0.82; sadece optik ile %86.1, kappa 0.80'dir (Açıksarı, 2019). Benzer Görselde, Japonya'da ALS, Sentinel-2 ve PALSAR-2 verilerinin entegrasyonu ile karbon stok haritalarında belirsizlik önemli ölçüde azaltılmıştır (Demirel, 2025).

Çoklu frekans ve çoklu zamanlı SAR verilerinin kullanımı, biyokütle ve karbon stok tahminlerinde doğruluğu artırmaktadır. L-band (%71), C-band (%36), P-band (%21) gibi farklı frekansların kombinasyonu, özellikle yüksek biyokütleli alanlarda doygunluk sorununu azaltmakta ve model performansını iyileştirmektedir (Santoro ve Cartus, 2018).

7.4. UAV VE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ UYDU VERİLERİNİN ENTEGRASYONU

İnsansız hava aracı (İHA/UAV) tabanlı multispektral ve LiDAR verileri, yüksek mekânsal çözünürlükleri sayesinde çayır ve meralarda mikro ölçekte detaylı izleme imkânı sunmaktadır. UAV-LiDAR ve hiperspektral görüntülerin entegrasyonu, bireysel ağaç ve bitki düzeyinde karbon stok tahmininde $R^2 = 0.89$ gibi yüksek doğruluklar sağlamıştır (Demirel, 2025). Ayrıca UAV ve uydu verilerinin (ör. PlanetScope) füzyonu ile 30 cm çözünürlükteki verilerle saha ölçümlerine %87 korelasyon elde edilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

8. NDVI İLE BİYOKÜTLE, YEM KALİTESİ VE KARBON STOK TAHMİNİ

8.1. BİYOKÜTLE TAHMİNİ VE DOĞRULAMA

NDVI, doğrudan biyokütle ölçümü olmasa da çok sayıda çalışma NDVI ile toprak üstü biyokütle arasında orta ile yüksek düzeyde korelasyonlar bulmuştur. Türkiye'de Çankırı meralarında yapılan çalışmada, arazi ölçümleri ile tümleşik NDVI arasında R^2=0.45, LUE modeliyle hesaplanan biyokütle ile NDVI arasında ise R^2=0.69 düzeyinde anlamlı ilişkiler tespit edilmiştir. Bu oranlar, NDVI'nın biyokütle tahmininde güvenilir bir gösterge olduğunu göstermektedir (Tuğaç vd., 2019). MODIS ve Sentinel-2 gibi sensörlerle yapılan çalışmalarda, NDVI ile biyokütle arasındaki korelasyonlar genellikle 0.5-0.8 arasında değişmektedir. Fenolojik olarak en yüksek korelasyonlar, bitki gelişiminin pik yaptığı dönemlerde (ör. başaklanma/çiçeklenme) gözlenmektedir (Tuğaç vd., 2019).

LUE (Işık Kullanım Etkinliği) modelleri, NDVI ve fotosentetik aktif radyasyon (PAR) verilerini kullanarak net birincil üretim (NPP) ve biyokütle tahmini yapar. Türkiye'de Çankırı meralarında yapılan çalışmada, LUE modeliyle hesaplanan biyokütle ile tümleşik NDVI arasında %69 doğruluk oranı elde edilmiştir. LUE modeli, yağış ve sıcaklık gibi çevresel değişkenlerle birlikte kullanıldığında, biyokütle üretimindeki zamansal ve mekânsal değişimleri yüksek hassasiyetle izleyebilir (Ünal, 2011).

8.2. NDVI İLE YEM KALİTESİ GÖSTERGELERİ (CP, NDF, NEM)

NDVI'nın sadece biyokütle değil, aynı zamanda yem kalitesi parametreleriyle de ilişkili olduğu gösterilmiştir. Portekiz'de üç yıl ve sekiz farklı alanda yapılan çalışmada, NDVI ile ham protein (CP) arasında R^2=0.75, nötr deterjan lif (NDF) ile ise R^2=0.50 düzeyinde anlamlı korelasyonlar bulunmuştur. NDVI'nın yüksek olduğu dönemlerde CP yüksek, NDF ise düşüktür; bu da genç, yaprak oranı yüksek ve besleyici meraların NDVI ile tespit edilebileceğini gösterir (Wijesinghe vd., 2018). Brezilya'da yapılan bir başka çalışmada, el tipi sensörlerle ölçülen NDVI ile ham protein arasında R^2=0.51-0.49 düzeyinde anlamlı ilişkiler saptanmıştır. Bu bulgular, NDVI'nın mera yem kalitesinin izlenmesinde pratik ve maliyet etkin bir araç olduğunu göstermektedir (Wijesinghe vd., 2018).

Görsel 6. NDVI ile Yem Kalitesi ve Biyokütle Parametrelerinin Korelasyonu

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

8.3. MERALARIN KARBON YUTAK ALANI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ VE NDVI İLİŞKİSİ

Çayır ve mera ekosistemleri, küresel karbon döngüsünde önemli birer karbon yutak alanı olarak işlev görmektedir. Özellikle atmosferdeki CO_2'nin fotosentez yoluyla biyokütleye ve toprağa aktarılması, meraların karbon sekestrasyon kapasitesini belirleyen temel süreçtir. Orman ekosistemleriyle karşılaştırıldığında, meralar birim alanda daha düşük toplam karbon stoku barındırsa da geniş alan kaplamaları ve toprak karbonu birikimi açısından kritik öneme sahiptirler (Santoro ve Cartus, 2018).

NDVI, bitki örtüsünün canlılığı ve biyokütle miktarıyla doğrudan ilişkili olduğu için, karbon stok tahminlerinde dolaylı bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de Çankırı meralarında yapılan bir çalışmada, tümleşik NDVI (TNDVI) ile arazi biyokütle ölçümleri arasında $R^2 = 0.45$, uydu verisinden LUE modeliyle hesaplanan biyokütle ile TNDVI arasında ise $R^2 = 0.69$ korelasyon elde edilmiştir. Bu sonuçlar, NDVI'nın özellikle büyüme sezonunda karbon stok tahmininde güvenilir bir gösterge olduğunu ortaya koymaktadır (Ünal ve Aydoğdu, 2019).

Çin'de, Helan Dağları'nda Sentinel-2 verileri ve Random Forest algoritmasıyla geliştirilen yeni bir kırmızı kenar NDVI (NDVIRE) kullanılarak, orman stok hacmi (FSV) tahmininde eğitim aşamasında $R^2 = 0.93$, test aşamasında $R^2 = 0.60$ elde edilmiştir. NDVIRE'nin geleneksel NDVI'ya göre daha yüksek korelasyon ($r = 0.778$) sağladığı ve karbon stok haritalamasında doğruluğu artırdığı rapor edilmiştir (Ma vd., 2023). Karbon stok tahmininde kullanılan diğer yöntemler arasında, SAR geri saçılımı ile biyokütle arasındaki ilişkileri modelleyen Water Cloud Model (WCM), interferometrik SAR (InSAR) yükseklik modelleri ve LiDAR tabanlı üç boyutlu yapı analizleri bulunmaktadır. Özellikle LiDAR ve UAV-LiDAR verileriyle yapılan çalışmalarda, karbon stok tahmininde $R^2 = 0.76$-0.89 gibi yüksek doğruluklar elde edilmiştir (Demirel, 2025).

NDVI zaman serileri, meraların yıllık ve mevsimsel karbon sekestrasyon hızlarını izlemek için kullanılmaktadır. ABD Great Plains bölgesinde, 10 yıllık ΣNDVI analizleriyle C3 ve C4 baskın ot topluluklarının karbon tutulumu yıllık değişkenlik ve iklimsel kontrol mekanizmaları ortaya konmuştur. C4 baskın güney ve batı meralarında NDVI değişkenliği daha yüksek, C3 baskın kuzey ve doğu meralarında ise daha düşük bulunmuştur (Ricotta vd., 2002). Çin İç Moğolistan'da, 1990-2015 yılları arasında NDVI'nın zamansal trendleriyle karbon stok değişimleri analiz edilmiş; çayır alanlarında NDVI'nın azalması karbon kaybına, çölleşme eğilimindeki alanlarda ise NDVI artışı karbon birikimine işaret etmiştir (Yu vd., 2024).

Optik ve SAR verilerinin entegrasyonu, karbon stok haritalamasında doğruluk ve mekânsal çözünürlüğü artırmaktadır. Japonya'da ALS, Sentinel-2 ve PALSAR-2 verilerinin entegrasyonu ile yüksek çözünürlüklü karbon stok haritaları üretilmiş ve belirsizlik değerlendirmesi yapılmıştır. Benzer Görselde, Amazon havzasında ALS ve optik verilerin entegrasyonu ile bölgesel karbon stok haritaları oluşturulmuştur (Demirel, 2025).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

9. FENOLOJİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN/KURAKLIĞIN İZLENMESİ

9.1. FENOLOJİ, MEVSİMSELLİK VE ZAMAN SERİSİ ANALİZ YÖNTEMLERİ

NDVI zaman serileri, çayır ve meralarda fenolojik döngülerin, büyüme sezonunun başlangıç ve bitiş tarihlerinin, maksimum üretkenlik zamanının ve sezon uzunluğunun belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sentinel-2 ve MODIS gibi sensörlerle elde edilen NDVI zaman serileri, Savitzky-Golay filtreleri ve TIMESAT gibi yazılımlarla işlenerek, sezon başlangıcı, maksimum NDVI zamanı, sezon uzunluğu ve toplam üretkenlik gibi metrikler çıkarılır (Gurolkb, 2021).

NDVI zaman serileri, mera otlatma kapasitesinin ve otlatmaya başlama/bitiş tarihlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Eskişehir ve İç Anadolu meralarında yapılan çalışmalarda, NDVI'nın yıl içinde Mart başında yükselmeye başladığı, Mayıs ortasında maksimuma ulaştığı ve Temmuz ortasından itibaren azaldığı gösterilmiştir. Bu bilgiler, otlatma yönetimi ve mera planlamasında kritik öneme sahiptir (Mermer vd., 2011; Aygün vd., 2016).

Akdeniz ve Avrupa örneklerinde, otlatma müdahalesinin fenoloji üzerindeki etkileri NDVI zaman serileriyle izlenmiş; otlatılan alanlarda sezonun daha erken sona erdiği ve maksimum üretkenliğin azaldığı gösterilmiştir. Mera yönetimi ve restorasyon uygulamalarının izlenmesinde kritik rol oynamaktadır. BACI (Before-After-Control-Impact) tasarımlı çalışmalarda, Sentinel-2 NDVI zaman serileriyle otlatma öncesi ve sonrası değişimler analiz edilmiş; otlatılan alanlarda özellikle otsu bitkilerde sezonun erken sona erdiği, maksimum NDVI'nın azaldığı ve toplam üretkenliğin düştüğü gösterilmiştir. Aşırı otlatma, NDVI değerlerinde azalma, sezon uzunluğunda kısalma ve biyokütlede düşüş ile kendini gösterir. Bu tür analizler, sürdürülebilir otlatma yönetimi ve mera restorasyonu için bilimsel temel sağlar.

Topografya, toprak tipi ve bitki kompozisyonu da NDVI'ya etki eder. Yüksek rakımlı alanlarda vejetasyonun geç uyanması ve kısa sezon uzunluğu, NDVI zaman serilerinde belirgin Görselde izlenebilir (Mermer vd., 2011). Toprak arka planı, özellikle seyrek bitki örtüsünde NDVI'nın doğruluğunu azaltabilir; bu nedenle SAVI gibi indeksler tamamlayıcı olarak kullanılabilir. Bitki kompozisyonu, NDVI'nın biyokütle ve yem kalitesiyle ilişkisini etkiler. Yaprak oranı yüksek, genç vejetasyon dönemlerinde NDVI ile biyokütle/yem kalitesi korelasyonu artarken, olgunlaşma ve sap oranının arttığı dönemlerde bu ilişki zayıflar (Tuğaç vd., 2019).

9.2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KURAKLIK İZLEMEDE NDVI'NIN ROLÜ

Çayır ve mera ekosistemleri, iklim değişikliğinin etkilerine karşı son derece hassas olup, bu alanlarda meydana gelen biyofiziksel değişimleri izlemek için NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) yaygın olarak kullanılmaktadır. NDVI, bitki örtüsünün fotosentetik aktivitesini ve canlılığını yansıtan bir spektral indeks olarak, özellikle geniş alanlarda zamansal ve mekânsal değişimlerin izlenmesinde kritik bir araçtır. NDVI'nın temel avantajı, farklı bitki türlerinin vejetatif durumunu, biyokütle miktarını ve fenolojik evrelerini yüksek doğrulukla yansıtabilmesidir. Özellikle iklim değişikliğine bağlı olarak ortaya çıkan

kuraklık, aşırı yağış, sıcaklık artışı ve mevsimsel kaymalar gibi faktörlerin çayır ve meralarda neden olduğu değişimlerin izlenmesinde NDVI'nın etkinliğini artırmaktadır (Aygün vd., 2016).

Çin'in İç Moğolistan bölgesi, ABD'nin Great Plains alanı, İspanya'nın Akdeniz meraları ve Avustralya'nın güney bölgeleri gibi farklı iklim kuşaklarında yapılan çok dilli literatür taramaları, NDVI'nın iklimsel değişkenlik ve kuraklık izleme açısından evrensel bir gösterge olarak kabul edildiğini göstermektedir. Örneğin, İç Moğolistan'da 1990-2015 yılları arasında yapılan bir çalışmada, NDVI'nın zaman serisi analizleriyle çayır ve meraların hem bozulma hem de iyileşme süreçleri eşzamanlı olarak izlenmiş; özellikle çölleşme eğilimindeki alanlarda NDVI'nın yıllık artış oranı 1.98×10^{-4}/a, çayır alanlarında ise azalma oranı -4.88×10^{-4}/a olarak rapor edilmiştir (Yu vd., 2024). Benzer Görselde, ABD Great Plains bölgesinde NOAA AVHRR çok zamanlı NDVI verileriyle yapılan analizlerde, C3 ve C4 baskın ot topluluklarının iklimsel değişkenliğe tepkileri ve NDVI'nın yıllık toplamındaki (ΣNDVI) değişkenlik, kuraklık ve yağış rejimiyle doğrudan ilişkilendirilmiştir (Ricotta vd., 2002).

NDVI'nın iklim değişikliği ve kuraklık izleme uygulamalarında en önemli metodolojik yaklaşımlardan biri, uzun dönemli zaman serisi analizleridir. SPOT-VEGETATION, MODIS ve Landsat gibi uydulardan elde edilen 10 günlük, aylık veya yıllık maksimum NDVI kompozitleri, bitki örtüsünün mevsimsel ve yıllık değişkenliğini ortaya koymak için kullanılmaktadır. Türkiye'de yapılan bir çalışmada, 1999-2010 yılları arasında 36 adet 10 günlük NDVI katmanı kullanılarak, değişkenlik katsayısı (CV%) haritaları oluşturulmuş ve en yüksek değişkenliğin Aralık-Şubat aylarında, en düşük değişkenliğin ise Temmuz-Ağustos aylarında olduğu tespit edilmiştir. Kar örtüsü, yağış ve sıcaklık gibi iklimsel faktörlerin NDVI üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir (Yıldız vd., 2018). NDVI zaman serileri kullanılarak fenolojik parametreler (sezon başlangıcı, maksimum büyüme, sezon sonu) çıkarılmakta ve bu parametreler, kuraklık erken uyarı sistemlerinde ve tarımsal planlamada kullanılmaktadır. Eskişehir meralarında yapılan bir çalışmada, NDVI'nın yıllık döngüsü analiz edilerek otlatma başlangıç ve bitiş tarihleri optimize edilmiş ve mera yönetiminde karar destek aracı olarak kullanılmıştır (Aygün vd., 2016).

Kuraklık izleme uygulamalarında NDVI'nın duyarlılığı, özellikle toprak nemi, yağış ve sıcaklık anomalileriyle olan ilişkisi üzerinden değerlendirilmiştir. Çin İç Moğolistan'da yapılan çok sayıda çalışma, NDVI'nın yağışa karşı yüksek duyarlılık gösterdiğini, ancak sıcaklık artışının özellikle çölleşme eğilimindeki alanlarda NDVI üzerinde negatif etki yarattığını ortaya koymuştur. Yapısal eşitlik modellemesi ve coğrafi dedektör analizleriyle, sıcaklık ve yağışın NDVI üzerindeki doğrudan etkisi istatistiksel olarak doğrulanmıştır. Ayrıca, insan faaliyetlerinin (ör. aşırı otlatma, arazi kullanımı değişimi) NDVI üzerindeki dolaylı etkileri de vurgulanmıştır (Yu vd., 2024). İspanya'nın Akdeniz bölgesinde, büyük ölçekli yangınlar sonrası NDVI ve NBR (Normalized Burn Ratio) analizleriyle yapılan çalışmalarda, NDVI'nın yangın sonrası vejetasyonun rejeneratif kapasitesini izleme açısından yüksek performans gösterdiği, beş yıl içinde NDVI'nın yangın öncesi seviyesinin %75'ine ulaştığı rapor edilmiştir. Bu bulgu, Akdeniz meralarının kuraklık ve yangın gibi ekstrem iklim olaylarına karşı adaptif kapasitesini ve NDVI'nın bu süreci izleme yeteneğini göstermektedir (An analysis of the regenerative capacity, 2025).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

10.MAKİNE ÖĞRENMESİ YAKLAŞIMLARI VE DOĞRULAMA METRİKLERİ

NDVI ve diğer uzaktan algılama verilerinin biyokütle, verim ve yem kalitesi tahmininde kullanımı için çeşitli istatistiksel ve makine öğrenmesi modelleri geliştirilmiştir:

Doğrusal regresyon: NDVI ile biyokütle/verim arasında en yaygın kullanılan modeldir.

Random Forest (RF): Özellikle çoklu bant ve indekslerin birlikte kullanıldığı sınıflandırma ve regresyon analizlerinde yüksek doğruluk sağlar.

Destek Vektör Makineleri (SVM): Küçük veri setlerinde rekabetçi sonuçlar verir.

Derin öğrenme (CNN, U-Net): Yüksek çözünürlüklü görüntülerde mekansal bağlamı dikkate alarak piksel bazlı sınıflandırmada üstün performans gösterir.

Zamansal CNN/LSTM: NDVI zaman serilerinden fenolojik desenleri öğrenerek ürün ve bitki türü ayrımında kullanılır (Zhao vd., 2023).

Makine öğrenmesi tabanlı modeller, özellikle Landsat ve MODIS gibi farklı sensörlerden gelen verilerin kalibrasyonu ve birleştirilmesinde doğruluk ve tutarlılığı artırmaktadır (R^2=0.97, RMSE=0.05) (Zhao vd., 2023). Makine öğrenmesi algoritmaları (Random Forest, SVM, Gaussian Process Regression, derin öğrenme) çoklu sensör verilerinin birlikte işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Random Forest tabanlı modeller, optik ve SAR verilerinin birlikte kullanıldığı durumlarda R^2 = 0.76-0.93 aralığında yüksek performans göstermektedir. Model doğruluğu, kullanılan sensörlerin çözünürlüğü, bant sayısı ve veri ön işleme kalitesine bağlı olarak değişmektedir (Demirel, 2025). Karbon stok tahmininde Random Forest, SVM, Gaussian Process Regression ve derin öğrenme algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Model performansı genellikle R^2, RMSE ve MAE ile değerlendirilmekte; örneğin, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Fakültesi'nde yapılan bir çalışmada, ALS verisiyle R^2 = 0.76, RMSE = 4.25 tonC/ha elde edilmiştir. Modelin düşük ve yüksek uç değerlerdeki sapmaları, veri doygunluğu ve sensör özellikleriyle ilişkilendirilmiştir (Demirel, 2025).

Belirsizlik analizi ve hata propagasyonu, özellikle farklı sensörlerin entegrasyonu ve model transferabilitesi açısından kritik öneme sahiptir. Japonya ve Çin'de yapılan çalışmalarda, LiDAR ve hiperspektral veri entegrasyonu ile model doğruluğu ve belirsizlik azaltılmıştır (R^2 = 0.89) (Demirel, 2025). Çoklu sensör füzyonunda model doğruluğu genellikle genel doğruluk (%), kappa, R^2, RMSE ve MAE gibi metriklerle değerlendirilir. Ayrıca, model transferabilitesi (farklı yıllar, farklı alanlar arası geçerlilik) ve belirsizlik analizi de önemlidir. Avustralya'da Sentinel-2 NDVI zaman serisiyle yapılan beta regresyon modellerinde, yıllar arası transferabilite R^2 = 0.53-0.69 aralığında rapor edilmiştir; SAR ve optik veri füzyonunda ise doğruluk %94.77'ye ulaşmıştır (Açıksarı, 2019).

Veri kalitesini artırmak için çeşitli ön işleme adımları gereklidir. Atmosferik düzeltme: Sentinel-2 L2A ürünlerinde Rayleigh saçılımı, aerosol ve su buharı etkileri düzeltilir. Bulut maskesi: Bulutlu pikseller, otomatik bulut maskeleri ve görsel analizle hariç tutulur. Mozaikleme: Maksimum Değer Kompozisyonu (MVC) yöntemiyle bulut etkisi minimize edilir

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ve farklı görüntüler birleştirilir. Fourier tabanlı HANTS algoritması: Zaman serilerinde kalan bulut etkilerini ve gürültüyü azaltır (Gurolkb, 2021). Bu işlemler, NDVI zaman serilerinin doğruluğunu ve karşılaştırılabilirliğini artırır. Google Earth Engine (GEE), büyük ölçekli NDVI zaman serilerinin işlenmesi, bulut maskesi uygulanması, mozaikleme ve analizlerin otomasyonu için güçlü bir platformdur. GEE üzerinde Sentinel-2, Landsat ve MODIS gibi veri setleriyle NDVI hesaplanabilir, zaman serisi grafikleri oluşturulabilir ve mekansal analizler yapılabilir (Gurolkb, 2021). GEE'nin avantajları arasında bulut tabanlı işlem gücü, açık veri arşivleri, Python ve JavaScript API'leri ile esnek analiz imkanı ve görselleştirme araçları yer alır. Türkiye'de ve dünyada birçok araştırmacı, GEE ile NDVI zaman serisi analizlerini otomatikleştirmiştir.

11. EKONOMİK ANALİZ VE MALİYET-FAYDA KIYASLAMASI

11.1. GELENEKSEL YÖNTEMLERİN MALİYET BİLEŞENLERİ

Çayır ve mera ekosistemlerinde biyokütle, karbon stok ve vejetatif durum izleme amacıyla kullanılan geleneksel yöntemler, genellikle arazi tabanlı örnekleme, laboratuvar analizleri ve manuel ölçümlerden oluşmaktadır. Bu yöntemler, yüksek iş gücü, zaman ve maliyet gereksinimleri nedeniyle geniş alanlarda uygulanması güç ve ekonomik açıdan sürdürülebilir değildir. Türkiye'de 2026 yılı için yayımlanan resmi fiyat tarifesine göre, topraktan kompozit numune alma maliyeti 3.340 TL, azot analizi 3.545 TL, organik madde analizi 1.285 TL, laboratuvar raporlama ücreti analiz bedelinin %5'i, ulaşım bedeli ise km başına 30 TL (gidiş-dönüş) olarak belirlenmiştir. Bir saha kampanyasında, 10 farklı noktadan numune alınması ve temel analizlerin yapılması durumunda toplam maliyet 50.000 TL'yi aşabilmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025). Ayrıca geleneksel yöntemlerde kullanılan ekipman (ör. Rising Plate Meter, C-Dax, quadrat), laboratuvar sarf malzemeleri, uzman personel ve ulaşım giderleri toplam maliyetin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Özellikle geniş alanlarda ve tekrarlı izleme gerektiren uygulamalarda, bu maliyetler katlanarak artmaktadır.

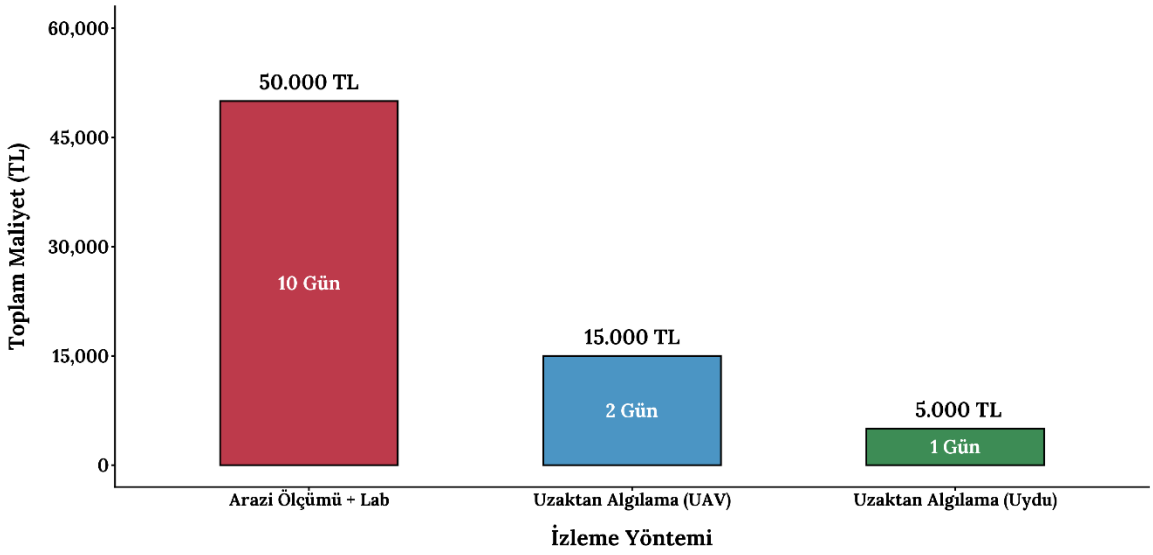
11.2. UZAKTAN ALGILAMA TABANLI YÖNTEMLERİN MALİYET BİLEŞENLERİ

Uzaktan algılama tabanlı izleme sistemlerinde temel maliyet kalemleri; uydu verisi (çoğu zaman ücretsiz veya düşük maliyetli), veri işleme yazılımları (ör. Google Earth Engine, Copernicus platformları ücretsiz; ticari yazılımlar ise lisans bedeli gerektirir), bulut bilişim altyapısı, İHA/UAV platformları (donanım ve bakım maliyeti), sensör kalibrasyonu ve sınırlı sayıda doğrulama amaçlı arazi ölçümleridir. Sentinel-1, Sentinel-2, MODIS ve Landsat gibi açık veri kaynakları sayesinde, geniş alanlarda yüksek frekansta izleme neredeyse sıfır veri maliyetiyle gerçekleştirilebilmektedir (TerraScane, 2026). İHA/UAV tabanlı izleme sistemlerinde ise, platform maliyeti (5.000-50.000 USD arası), sensör (multispektral, hiperspektral, LiDAR) maliyeti (2.000-30.000 USD), yazılım lisansı ve bakım giderleri toplam maliyetin ana bileşenleridir. Ancak bu sistemler kısa sürede geniş alanlardan yüksek çözünürlüklü veri toplayabildiği için, birim alan başına maliyet geleneksel yöntemlere göre çok daha düşüktür.

11.3. MALİYET-FAYDA KARŞILAŞTIRMASI VE VERİMLİLİK ANALİZİ

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Uzaktan algılama tabanlı yöntemler, geniş alanlarda zamansal ve mekânsal olarak sürekli izleme imkânı sunarak, geleneksel yöntemlere göre önemli maliyet avantajı sağlamaktadır. Çin'de yapılan bir çalışmada, Sentinel-2 ve UAV-LiDAR verilerinin entegrasyonu ile karbon stok haritalaması, geleneksel arazi ölçümlerine göre %70 daha düşük maliyetle ve %30 daha yüksek doğrulukla gerçekleştirilmiştir (Demirel, 2025). Avustralya ve ABD'de yapılan ekonomik analizlerde, uzaktan algılama tabanlı izleme sistemlerinin birim alan başına maliyeti, geleneksel yöntemlere göre 5-10 kat daha düşük bulunmuştur (Santoro ve Cartus, 2018).



Görsel 7. Geleneksel ve Uzaktan Algılama Yöntemlerinin Maliyet Karşılaştırması (Örnek Birim Alan İçin)

Bu görsel uzaktan algılamanın hem maliyet hem de doğruluk açısından geleneksel yöntemlere göre üstünlüğünü açıkça göstermektedir. Maliyet unsurlarının detaylı analizinde; Saha Örnekleme: Numune alma, ulaşım, personel, ekipman ve zaman maliyetleri toplam maliyetin %40-60'ını oluşturur. Laboratuvar Analizleri: Kimyasal analizler, cihaz kullanımı, sarf malzemeleri ve raporlama ücretleri toplam maliyetin %20-30'unu oluşturur. Sensör ve Yazılım: Uzaktan algılamada sensör ve yazılım maliyetleri başlangıçta yüksek olsa da uzun vadede birim alan başına maliyet hızla düşer. Doğrulama ve Kalibrasyon: Uzaktan algılamada sınırlı sayıda arazi ölçümüyle model kalibrasyonu yapılır; bu, toplam maliyetin %10-15'ini oluşturur.

Uzaktan algılama tabanlı sistemler, geniş alanlarda hızlı, tekrarlanabilir ve objektif veri sağlayarak, yönetim kararlarının zamanında alınmasını ve kaynakların etkin kullanılmasını sağlar. Ayrıca, bulut tabanlı platformlar (ör. Google Earth Engine, TerraScane, EOSDA) sayesinde, kullanıcılar herhangi bir coğrafi bölge için anlık NDVI analizleri ve raporları oluşturabilmektedir (EOSDA, 2026).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

12. TÜRKİYE VE DÜNYA ÖRNEKLERİ

Çankırı, Eskişehir, Sivas ve Konya gibi illerde yapılan çalışmalarda, NDVI zaman serileriyle mera fenolojisi, biyokütle üretimi, otlatma kapasitesi ve kuraklık etkileri detaylı Görselde analiz edilmiştir (Mermer vd., 2011; Aygün vd., 2016). Doğu Anadolu bölgesinde yüksek rakım ve kısa büyüme sezonu nedeniyle NDVI'nın sezon başlangıcı ve maksimumu geç tarihlere kaymaktadır. Bu bölgelerde NDVI'nın otlatma yönetimi ve kuraklık izleme için kritik bir gösterge olduğu vurgulanmıştır (Mermer vd., 2011).

13. ARAŞTIRMA BOŞLUKLARI VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

13.1. ARAŞTIRMA BOŞLUKLARI

NDVI'nın yem kalitesi (CP, NDF, nem) ile ilişkisi farklı ekosistemlerde ve bitki kompozisyonlarında daha fazla saha doğrulamasına ihtiyaç duymaktadır. Yüksek çözünürlüklü ticari verilerin (Planet, WorldView) uzun dönemli ve geniş alan uygulamaları sınırlıdır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modellerin, farklı sensör ve indeks kombinasyonlarıyla karşılaştırmalı analizleri yetersizdir. Türkiye'de Doğu Anadolu ve Van gibi yüksek rakımlı bölgelerde uzun dönemli NDVI zaman serisi analizleri azdır.

13.2. POLİTİKA VE YÖNETİM ÖNERİLERİ

NDVI tabanlı izleme sistemleri, mera yönetim planlarının ve otlatma takvimlerinin bilimsel temele dayandırılmasını sağlamalıdır. Açık veri kaynaklarının ve Google Earth Engine gibi platformların yaygın kullanımı teşvik edilmelidir. Yerel yönetimler ve tarım politikaları, NDVI ile izlenen biyokütle ve yem kalitesi değişimlerine göre esnek otlatma ve destekleme programları geliştirmelidir. İHA ve proksimal sensör uygulamaları, küçük ölçekli ve hassas mera yönetimi için yaygınlaştırılmalıdır. Arazi gerçekliği (ground truth) verilerinin toplanması ve model doğrulama süreçleri için ulusal standartlar oluşturulmalıdır.

Karbon stok haritaları ve NDVI tabanlı izleme sistemleri, REDD+ ve diğer iklim değişikliğiyle mücadele programlarında, sürdürülebilir mera yönetimi ve karbon kredisi mekanizmalarında karar destek aracı olarak kullanılmaktadır. Çin'de ekolojik tazminat politikaları, Japonya'da karbon stok haritalaması ve Avrupa Birliği'nde karbon piyasası uygulamaları, NDVI ve çoklu sensör verilerine dayalı izleme bulgularına dayandırılmaktadır (Santoro ve Cartus, 2018). NDVI tabanlı izleme sistemleri kuraklık erken uyarı sistemleri ve sürdürülebilir arazi kullanımı politikalarının geliştirilmesinde de karar destek aracı olarak kullanılmaktadır. Çin'de ekolojik tazminat politikaları, Moğolistan'da geleneksel göçebe otlatma ile modern uygulamaların entegrasyonu ve Rusya'da aşırı otlatmanın önlenmesine yönelik düzenlemeler, NDVI tabanlı izleme bulgularına dayandırılmaktadır (Yu vd., 2024). Ekonomik analizler, uzaktan algılama tabanlı izleme sistemlerinin sürdürülebilir mera yönetimi, karbon kredisi mekanizmaları ve iklim değişikliğiyle mücadele politikalarında yaygın olarak benimsenmesini teşvik etmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, düşük

maliyetli ve yüksek doğruluklu izleme sistemleri, doğal kaynakların korunması ve yönetiminde kritik rol oynamaktadır (Demirel, 2025).

14. SONUÇLAR

NDVI görüntüleme teknolojisi, çayır ve meraların izlenmesinde, biyokütle ve yem kalitesi tahmininde, otlatma etkilerinin değerlendirilmesinde ve fenolojik döngülerin analizinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Sentinel-2, Landsat, MODIS ve GIMMS gibi açık veri kaynakları, hem detaylı hem de uzun dönemli analizler için geniş olanaklar sunmaktadır. İHA ve proksimal sensörler, yüksek mekansal çözünürlükte detaylı izleme ve model doğrulama için tamamlayıcı rol oynamaktadır.

NDVI'nın biyokütle ve yem kalitesiyle ilişkisi, çok sayıda saha çalışması ve istatistiksel analizle doğrulanmıştır. Fenolojik analizler ve zaman serisi yöntemleri, otlatma yönetimi ve restorasyon uygulamalarının izlenmesinde kritik öneme sahiptir. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modeller, farklı sensörlerden gelen verilerin entegrasyonunda ve doğruluk artırımında yeni ufuklar açmaktadır.

Türkiye ve Akdeniz ekosistemlerinde yapılan çok sayıda çalışma, NDVI'nın hem bilimsel hem de pratik uygulamalarda güvenilir ve maliyet etkin bir izleme aracı olduğunu göstermektedir. Ancak, sensörler arası kalibrasyon, veri işleme standartları, saha doğrulaması ve çok dilli literatür taraması gibi alanlarda daha fazla araştırma ve kapasite geliştirme ihtiyacı devam etmektedir. Sonuç olarak, NDVI tabanlı uzaktan algılama teknolojileri, sürdürülebilir mera yönetimi, hayvancılık politikaları ve ekosistem sağlığı için bilimsel temelli, hızlı ve geniş ölçekli karar destek sistemlerinin temelini oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Açıksarı, E. (2019). Polarimetrik SAR ve optik uydu görüntülerinin veri füzyonu ile sınıflandırma analizi [Yüksek lisans tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

An analysis of the regenerative capacity of vegetation using NDVI and NBR. (2025). Sciety. https://sciety.org/articles/activity/10.20944/preprints202508.0467.v1

Apogee Instruments. (2026). NDVI sensors. Apogee Instruments.

Aygün, C., Sever, A. L., Kara, İ., Erdoğdu, İ. ve Atalay, A. K. (2016). Use of NDVI data on planning of grazing in Eskişehir grasslands. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 25(1), 67-77. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/220258

Başarsoft. (2021). NDVI analizi - NDVI formülü ve skalası. Başarsoft.

Demirel, T. (2025). Orman ekosistemlerinde hava tabanlı LiDAR ile toprak üstü karbon stoklarının tahmini. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 27(3), 447-465. https://doi.org/10.24011/barofd.1798937

EOSDA. (2026). NDVI analizi: Yüksek verim için hassas haritalama. https://eos.com/tr/make-an-analysis/ndvi/

Gurolkb. (2021). Google Earth Engine ile NDVI zaman serisi oluşturma [Yazılım]. GitHub. GitHub Gurolkb Repository.

Ma, T., Hu, Y., Wang, J., Beckline, M., Pang, D., Chen, L., Ni, X. ve Li, X. (2023). A novel vegetation index approach using Sentinel-2 data and random forest algorithm for

estimating forest stock volume in the Helan Mountains, Ningxia, China. Remote Sensing, 15(7), 1853. https://doi.org/10.3390/rs15071853

Mermer, A., Yıldız, H., Ünal, E., Urla, Ö., Aydoğdu, M., Avağ, A. ve Özgöz, M. M. (2011, 12-15 Eylül). Doğu Anadolu Bölgesinde mera vejetasyonunun uydu görüntüleri (NDVI) ile izlenmesi [Bildiri sunumu]. 9. Tarla Bitkileri Kongresi, Bursa, Türkiye. https://www.tufuab.org.tr/uploads/files/articles/mera-vejetasyonunun-uydu-goruntuleri-ndvi-ile-izlenmesi-1790.pdf

Planet Labs. (2018). Deriving a vegetation index from PlanetScope imagery [Jupyter Notebook]. Notebook Community.

Ricotta, C., Reed, B. C. ve Tieszen, L. L. (2002). The contribution of C3 and C4 grasses to interannual variability in time-integrated NDVI over the U.S. Great Plains. Analysis of multi-temporal remote sensing images: Proceedings of the first international workshop on multitemp 2001 içinde (s. 379-386). World Scientific. https://doi.org/10.1142/9789812777249_0043

Santoro, M. ve Cartus, O. (2018). Research pathways of forest above-ground biomass estimation based on SAR backscatter and interferometric SAR observations. Remote Sensing, 10(4), 608. https://doi.org/10.3390/rs10040608

Sentinel Hub. (2017). Normalized difference vegetation index - Sentinel Hub custom scripts. Sentinel Hub Custom Scripts.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). 2026 yılı asgari fiyat tarifesi. https://webdosya.csb.gov.tr/v2/lab/2025/12/2026-Y-l-Asgari-Fiyat-Tarifesi-20251230173407.pdf

TerraScane. (2026). Uydu görüntü analiz platformu. https://www.terrascane.com/

Tuğaç, M. G., Torunlar, H., Karakurt, E. ve Aydoğan, S. (2019). Buğday verimi ve biyokütlesi ile uzaktan algılama vejetasyon indisleri arasındaki ilişkilerin tarımsal iklim bölgeleri bazında değerlendirilmesi. Toprak Su Dergisi, 8(2), 99-109.

Turan, M., Alphan, H. ve Önem, M. (2022). NDVI ve DEM verileriyle bitki örtüsünün yatay, dikey ve zamansal değişimi. DergiPark Journal, 10(2), 154-167. DergiPark.

Ünal, E. (2011). Işık kullanım etkinliği (LUE) modeli ile Çankırı ilindeki meralarda biyokütle tahmini (Doktora tezi, Danışman: Prof. Dr. İlhami Bayramin, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Ankara Üniversitesi Açık Erişim Sistemi.

Ünal, E., & Aydoğdu, M. (2019). Çankırı meralarında biyokütle ve vejetasyon indeks ilişkisi. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences, 5*(2), 118–121. https://ijans.org/index.php/ijans/article/view/193

Wijesinghe, A., Beeri, O., & Hendrickson, J. (2018). The potential use of vegetation index to estimate crude protein on rangelands. Journal of Rangeland Science, 8(4), 321-332. PubMed Central (PMC).

Yıldız, H., Ünal, E. ve Aydoğdu, M. (2018, 18-21 Eylül). NDVI zaman serisi görüntülerinde değişkenliğin izlenmesi [Bildiri sunumu]. VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2016), Eskişehir, Türkiye.

Yiğit, A. Y. ve Orhan, O. (2025). Multispektral İHA görüntüleri kullanılarak nesne tabanlı görüntü analizi ile ağaç tespiti ve NDVI tabanlı bitki sağlığı analizi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 27(2), 183-209.

Yu, Z., Liu, Q., Zhang, Y., Ju, L. ve Miao, L. (2024). 内蒙古不同草地NDVI变化及其驱动要素 [Changes of NDVI and driving factors in different grasslands in the Inner Mongolia]. Shengtai Xuebao, 44(22), 10068-10082. https://doi.org/10.20103/j.stxb.202309182009

Zhao, Y., Liang, S. ve Yu, J. (2023). Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS NDVI3g. Earth System Science Data, 15(9), 4181-4201. Copernicus ESSD.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

KENTSEL ATIKSUDA DİYABET İLAÇLARI VE ARITMA TESİSİNDE GİDERİMLERİ

Doç. Dr. Arzu ULVİ

Necmettin Erbakan Üniversitesi, atekinay@erbakan.edu.tr - 0000-0001-7303-1869

Prof. Dr. Senar AYDIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, sozcan@erbakan.edu.tr - 0000-0002-0960-480X

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, meaydin@erbakan.edu.tr - 0000-0001-6665-198X

ÖZET

Farmasötik kullanımlarının artması ile birlikte, atıksularda bu bileşiklerin giderek daha yüksek konsantrasyonlarda tespit edildikleri görülmektedir. Dünya çapında görülme sıklığı sürekli artan kronik bir hastalık olan diyabet için kullanılan farmasötiklerinde tüketimi artış göstermektedir. Bu çalışmada Konya kenti kanalizasyon sistemi ve kentsel atıksu arıtma tesisinden alınan numunelerde diyabet ilaçlarından metformin ve glibenclamide farmasötiklerinin varlığı araştırılmıştır. Glibenclamide farmasötiği atıksu numunelerinde tespit edilmezken metformin ise kanalizasyon sisteminde 1394-12614 ng/L aralığında, giriş atıksuyunda 3396- 6810 ng/L aralığında ve çıkış atıksuyuda 60.6-640 ng/L aralığında tespit edilmiştir. Metformin bileşiğinin atıksu arıtma tesisinde %86-98 oranında giderildiği gözlenmiştir. Alıcı ortama deşarj edilen çıkış suyu için balık, *Daphnia magna* ve alg için risk değerlendirmesi yapılmış ve düşük risk tespit edilmiştir. Diyabet ilaçları kronik bir rahatsızlığın tedavisinde kullanıldığı için sürekli tüketilen farmasötik grubundadır. Özellikle metformin uzun yıllardır diyabet tedavisinde yaygın olarak tüketilen, en çok reçete edilen farmasötiktir. Farmasötikler çevresel ortamlarda hedef olmayan canlıları da etkileyebildikleri ve besin zincirine karışıp insana geri dönebildikleri için konsantrasyonlarının takip edilip önlem alınması gerekir. Diyabet ilaçları dünya genelinde sürekli tüketilmelerine rağmen atıksulardaki varlığı ve çevresel etkileri diğer farmasötik gruplar kadar incelenmemiştir. Yeterli verinin sağlanabilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atıksu, arıtma, diyabet ilaçları, metformin, glibenclamide, farmasötik.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. GİRİŞ

İnsanların sağlık problemlerinin tedavisinde, yaşam refahının artmasında, hayvancılık ve su ürünleri yetiştiriciliğinde verimi arttırmakta kullanılan 3000'den fazla aktif farmasötik mevcuttur (Shearer ve diğ., 2022; Monk ve diğ., 2025).

İnsanlar ve hayvanlar tarafından tüketilen ilaçların önemli bir miktarı, insan vücudundan değişmeden atılır ve atık suya karışır. Atıksu arıtma arıtma tesislerinde mikrokirleticilerin yetersiz arıtımı sonucu alıcı ortama deşarj edilir (Oertel ve diğ., 2018). Özellikle farmasötiklerin yoğun kullanıldığının düşünüldüğü sağlık merkezleri ve huzurevleri atıksulardaki farmasötik konsantrasyonu ile ilişkilendirilmiştir. Endüstriyel atıklar, hayvancılık, su ürünleri yetiştiriciliği ve veterinerler de farmasötiklerin atıksulara girebileceği önemli kaynaklardır (Shearer ve diğ., 2022).

Diyabet, dünya çapında giderek daha fazla insanı etkileyen, oldukça yaygın bir hastalıktır. Dünya Sağlık Örgütü'ne (DSÖ) göre, 2025 yılında dünya çapında yaklaşık 860 milyon kişide diyabet hastasıdır. Diyabet nedeniyle her yıl 1.5 milyon insan hayatını kaybetmektedir (David ve diğ., 2025; DSÖ, 2026). Hipertansiyon, obezite ve dislipidemi diyabete en çok eşlik eden diğer rahatsızlıklardır (Jelinek ve diğ., 2017). Diyabet hastaları diyabet ilaçlarının yanı sıra yaşam konforunu sağlamak için farklı ilaçlarda tüketmeleri gerekebilmektedir. Son yıllarda su ortamlarında farmasötik bileşiklerin varlığı ve etkileri birçok makalede araştırılmıştır. Ancak diyabet ilaçları kronik bir rahatsızlığın tedavisinde kullanılıp insanlar tarafından sürekli tüketilmesine rağmen literatürde diğer farmasötiklere kıyasla daha az araştırılmıştır.

Metformin ve glibenclamide DSÖ tarafından tip 2 diyabet tedavisinde önerilen antidiyabetik farmasötikler (Alanís-Leal ve diğ., 2024). Metformin çok uzun yıllardır kullanılan ve diğer diyabet ilaçları arasında lider konumda olan oral bir antidiyabetiktir. DSÖ tarafından temel ilaçları listesinde ilan edilmiştir (Balakrishnan ve diğ., 2022). Glibenclamide FDA tarafından 1984 yılında onaylanmış, İkinci nesil bir sülfonilüre ilaçtır. Çoğunlukla ilk tedavi olan metformin ile tedavi edilemeyen hastalar tarafından kullanılır (Guo ve diğ., 2024).

Bu çalışmada kronik bir rahatsızlık olan tip 2 diyabet tedavisinde kullanılan metformin ve glibenclamide ilaçlarının Konya kentsel atıksuyunda ve atıksu arıtma tesisi giriş ve çıkışında varlığı araştırılmıştır.

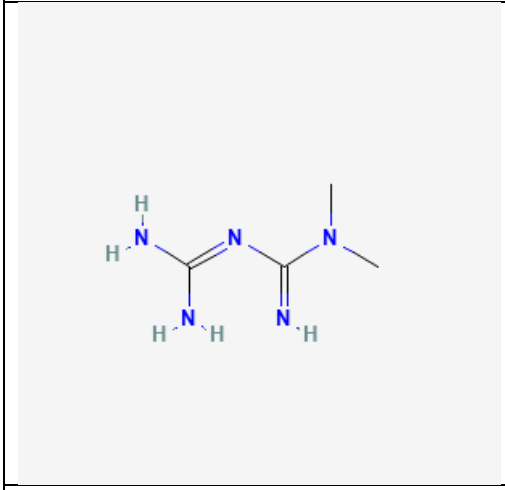
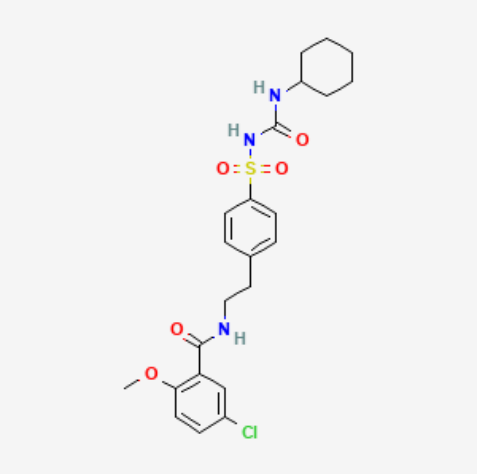
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Araştırılan bileşikler

Çalışmada atıksu numunelerinde diyabet ilaçlarından metformin ve glibenclamide ilaçları araştırılacaktır. Metformin ve glibenclamide tip 2 diyabet tedavisinde kullanılan ilaçlardır. Fizkokimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çizelge 1. Araştırılan bileşiklerin fizikokimyasal özellikleri

Metformin	Glibenclamide
	
Molekül ağırlığı=129.16 g/mol	Molekül ağırlığı=494.0 g/mol
Logkow=-1.3	Logkow =4.8

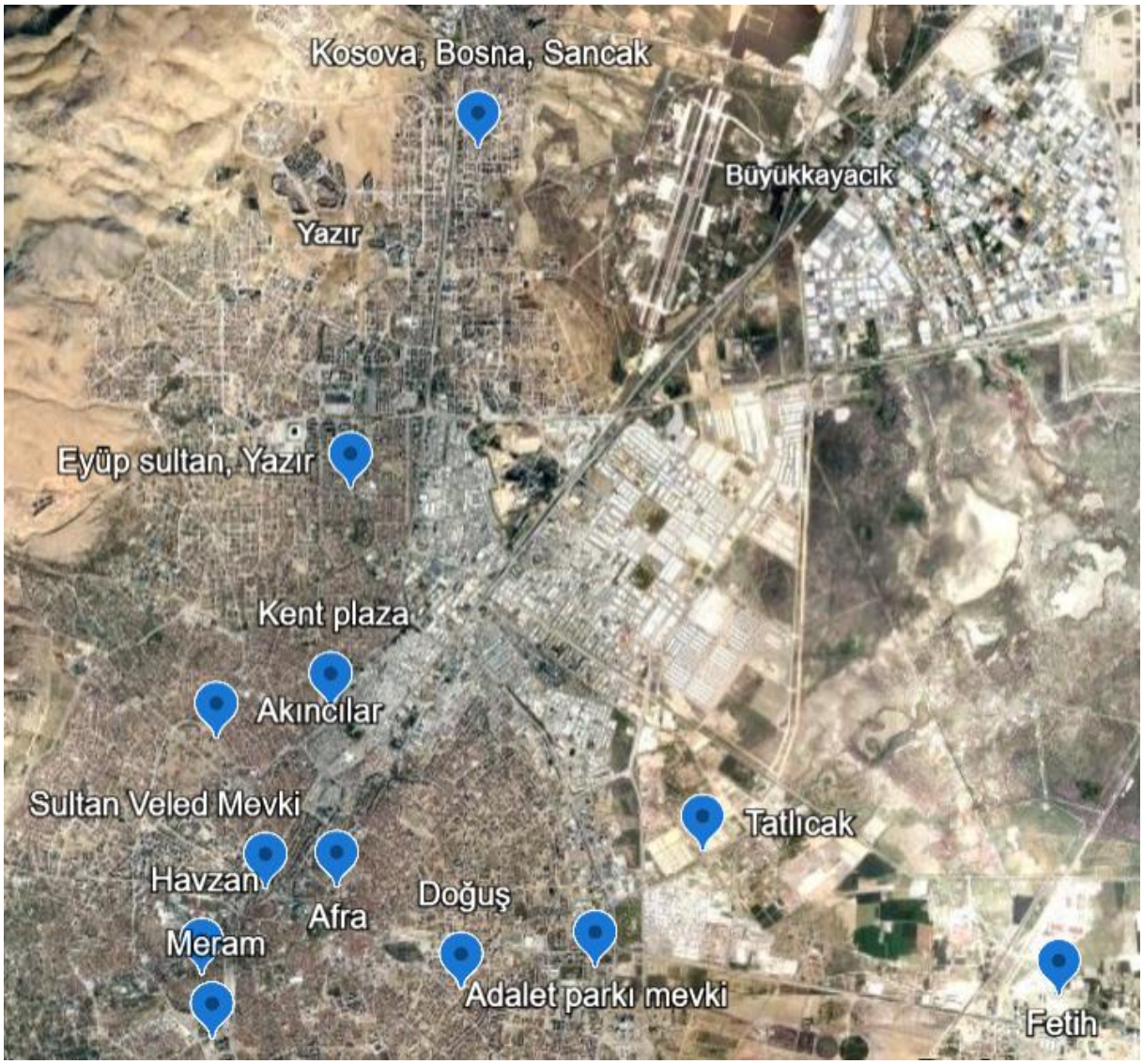
Atıksu numuneleri

Atıksu numuneleri Konya kenti Selçuklu, Meram, Karatay ilçelerinin kanalizasyon sisteminden ve atıksu arıtma tesisinin giriş ve çıkışından alınmıştır. Kanalizasyon sisteminden atıksu numuneleri hafta içi ve hafta sonu olmak üzere aynı noktadan ikişer tekrarlı alınmıştır. Atıksu arıtma tesisinden ise 8 gün boyunca giriş ve çıkış atıksu numuneleri alınmıştır. Konya Kentsel Atıksu Arıtma Tesisinde azot fosfor giderimli aktif çamur prosesi kullanılmaktadır. Çizelge 2'de numune numaraları ve numune alınan bölgeler verilmiştir. Görsel 1'de numune noktaları harita üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 2. Numune alma noktaları ve numune numaraları

Numune no	**Numune bölgesi**
1	Kosova bosna sancak mevki
2	Yazır eyüp sultan mevki
3	Kent plaza mevki
4	Akıncılar mevki
5	Afra mevki
6	Fetih mevki
7	Tatlıcak mevki
8	Doğuş mevki
9	Havzan mevki
10	Meram mevki
11	Sultan veled mevki
12	Adalet parkı mevki
13	Adalet parkı mevki

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 1. Numune alma noktalarının harita üzerinde gösterimi

Atıksu numunelerinde diyabet ilaçlarının analizi

Numunelerin ekstraksiyonu katı faz ekstraksiyon sistemi ile kantitatif analizleri ise Agilent marka sıvı kromatografi kütle spektrometre dedektör (liquid chromatography/tandem-mass spectrometry, LC/MS/MS) sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle 200 mL atıksu numuneleri önce cam fiber filtreden (1.2 µm), sonra nylon membran filtreden (0.45 µm) süzülmüştür. Katı faz ekstraksiyon yöntemi numuneyi temizlemek ve analiti konsantre etmek için kullanılır. Katı faz ekstraksiyon işlemi Aydın ve diğ., (2019)'a göre yapılmıştır. Ekstraksiyon işleminde Oasis HLB kartuşu kullanılmıştır. 5 mL methanol, 5 mL saf su ile şartlandırılan kartuşa örnekler 1mL/dk akış hızında kartuşa yüklenmiştir. 4x2.5 mL methanol ile bileşiklerin elüsyonu gerçekleştirilmiştir. Elüsyonlar evaparatör ve azot gazı ile konsantre edilmiştir. Analitlerin kantitatif analizleri için LC/MS/MS sisteminde Agilent Poroshell 120 EC-C18 (3.0x100 mm, 2.7 µm) kolon kullanılmıştır. Çizelge 3'de LC-MS/MS yöntemi için belirlenen LOD ve LOQ değerleri verilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

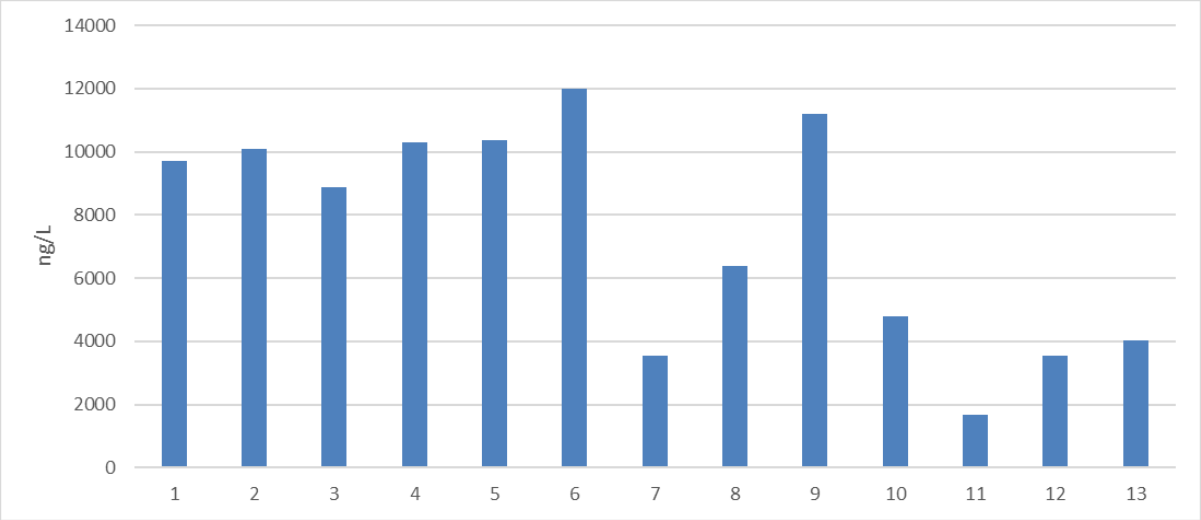
Çizelge 3. Araştırılan bileşiklerin LOD ve LOQ değerleri (ng/L)

Farmasötik	LOD	LOQ
Metformin	0.0035	0.0117
Glibenclamide	0.0025	0.0084

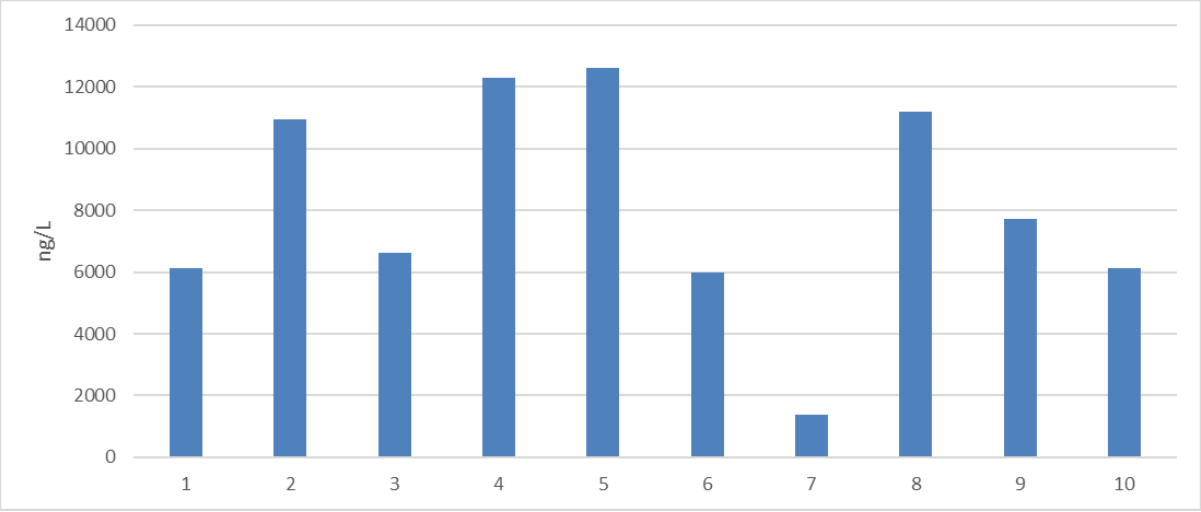
3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Konya kanalizasyon ve atıksu arıtma tesisinde tespit edilen konsantrasyonlar

Konya kenti kanalizasyon sisteminde diyabet ilaçlarından metformin ve glibenclamide bileşikleri araştırılmıştır. Glibenclamide bileşiği bütün atıksu numunelerinde <dl olarak tespit edilmiştir. Hafta içi alınan numunelerde tespit edilen metformin konsantrasyonları Görsel 2'de, hafta sonu alınan numunelerde tespit edilen metformin konsantrasyonu Görsel 3'te verilmiştir. Hafta içi alınan numunelerde 1683-11990 ng/L arasında, hafta sonu alınan numunelerde 1394-12614 ng/L arasında metformin konsantrasyonu tespit edilmiştir.



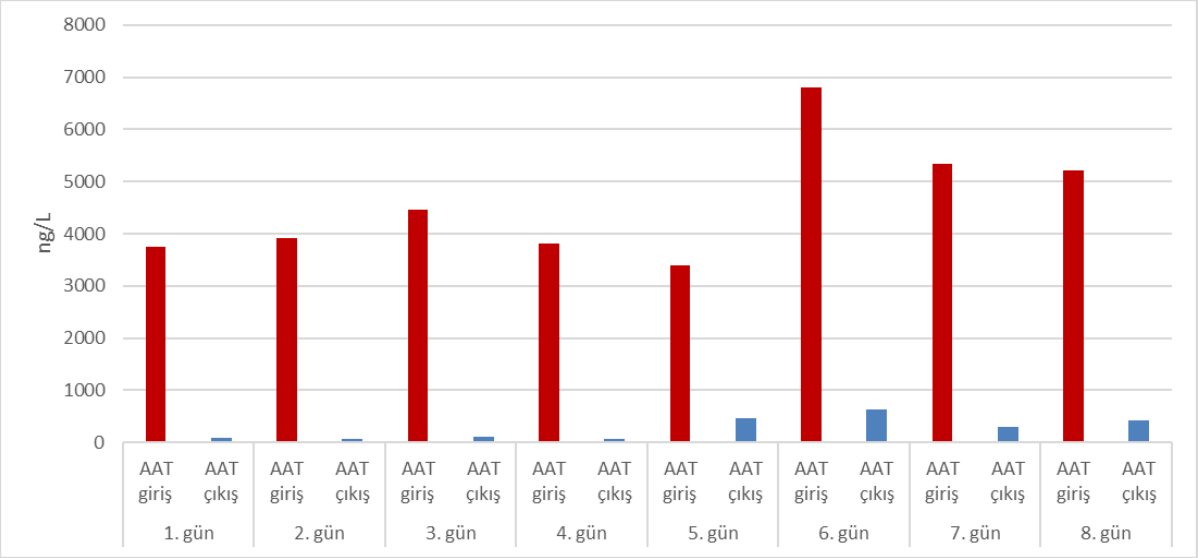
Görsel 2. Hafta içi alınan numunelerde tespit edilen metformin konsantrasyonları



Görsel 3. Hafta sonu alınan numunelerde tespit edilen metformin konsantrasyonları

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Görsel 4'te 8 gün boyunca atıksu arıtma tesisi giriş ve çıkışından alınan numunelerde tespit edilen metformin konsantrasyonları verilmiştir. Atıksu arıtma tesisi girişinde 3396- 6810 ng/L aralığında, çıkışında 60.6-640 ng/L aralığında tespit edilmiştir.



Görsel 4. AAT giriş ve çıkışta tespit edilen metformin konsantrasyonları

Çizelge 4'te farklı ülkelerde yapılan çalışmalarda tespit edilen metformin ve glibenclamide bileşiklerinin konsantrasyonları verilmiştir. Metformin bileşiği literatürde bazı çalışmalarda araştırılmıştır. Ancak glibenclamide bileşiği için literatüde çok yaygın veri bulunmamaktadır. Bunun sebebi metforminin glibenclamide bileşiğine göre oldukça fazla reçete edilmesi ve yaygın olarak tüketilmesidir. Mısır, İspanya, Güney Afrika ve Portekiz de yapılan çalışmalara bakılınca metformin konsantrasyonlarının giriş atıksularında 70325 ng/L düzeylerine kadar tespit edildiği görülmektedir. Çıkış atıksularında ise Mısır da maksimum 5610 ng/L konsantrasyonları tespit edilmiştir. Türkiye de gerçekleştirilen bu çalışmada metformin konsantrasyonları tabloda da görüldüğü gibi literatürle uyumlu tespit edilmiştir. Glibenclamide bileşiği ise bu çalışma da bütün atıksu numunelerinde <dl olarak tespit edilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde İspanya da giriş atıksuyunda yüksek konsantrasyonlarda glibenclamide bileşiği tespit edilirken, diğer ülkelerde düşük konsantrasyonlarda tespit edilmiştir. Martin ve diğ., (2012) çıkış atıksuyunda metformin ve glibenclamide bileşiklerini araştırmış, metformin 253 ng/L konsantrasyonda tespit edilirken, glibenclamide bileşiği tespit edilmemiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

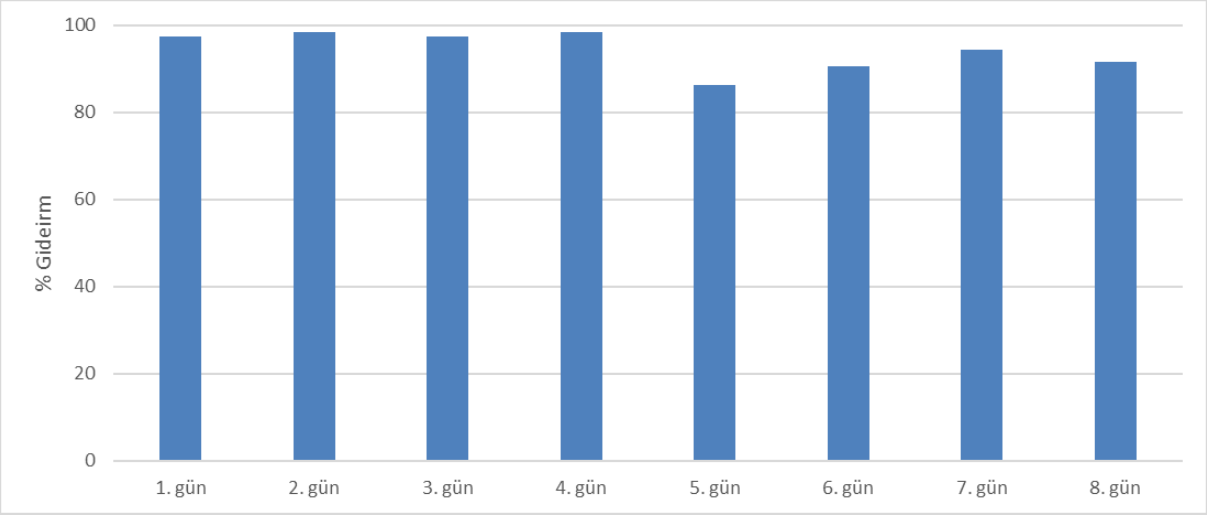
Çizelge 4. Farklı ülkeler de AAT giriş ve çıkışta tespit edilen metformin konsantrasyonları (ng/L)

Ülke	AAT giriş	AAT çıkış	Kaynak
Metformin			
Mısır	-	168-5610	Nguyen, 2018
İspanya	5927	1252	Carmona ve diğ., 2017
Güney Afrika	3585-9228	167-568	Archer ve diğ., 2017
Portekiz	70325	50-580	de Jesus Gaffney ve diğ., 2016
Avusturya		253	Martin ve diğ., 2012
Türkiye	3396-6810	62-640	Bu çalışma
Glibenclamide			
Çin	2.5-10	<dl-7.2	Yao ve diğ., 2025
İspanya	120–15900	-	Radjenovic ve diğ., 2009
İspanya	-	13.13	López-Serna ve diğ., 2010
Avusturya		Tespit edilmedi	Martin ve diğ., 2012
Türkiye	<dl	<dl	Bu çalışma

Konya kentsel atıksu arıtma tesisinde tespit edilen giderimler

Görsel 5'te Konya Kentsel atıksu arıma tesisinde meformin bileşiğinin giderim oranları verilmiştir. Tesisin giriş ve çıkışından yapılan 8 günlük örnekleme sonucu metforminin aktif çamur prosesinde metformin giderimi %86-98 arasında tespit edilmiştir. Tesisin metformin giderimi için yüksek performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Metformin farmasötiği guanilüre'ye biyotransforme olan bir bileşiktir. Aktif çamurun metformin ve guanilüre'yi parçalayabilmesi daha önce maruz kalınmasına yani mikrobiyal adaptasyona ve çevresel koşullara bağlıdır (Poursat ve diğ., 2019). Kosma ve diğ., (2015) metformin giderim verimliliği %99'larda tespit edilirken, guanilüre oluşumunun %95'lere ulaştığını bildirmişlerdir.



Görsel 5. AAT metformin giderim verimleri

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çevresel risk değerlendirmesi

Metformin bileşiğinin çevresel risk değerlendirmesi risk oranı (RQ) metoduna göre yapılmıştır. Çıkış atıksuyunda ölçülen konsantrasyonlar (MEC), tahmini etki göstermeyen konsantrasyonlara (PNEC) oranı ile RQ değerleri hesaplanmıştır. Metformin için balık, *daphnia magna* ve alg için ECOSAR verilerinden elde edilen EC/LC50 değerleri ile hesaplanan PNEC değerleri sırası ile 27737 µg/L, 1927 µg/L, 4624 µg/L'dir.

Hesaplanan RQ < 0.1 ise düşük risk, 0.1 ≤ RQ < 1 ise orta risk RQ ≥ 1 ise yüksek risk olarak değerlendirilmektedir (Aydın ve diğ., 2026).

Metformin için hesaplanan RQ değerleri üç tür içinde 0.1'den düşük tespit edilerek metformininin alıcı ortam için düşük risk oluşturduğu tespit edilmiştir.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Konya kanalizasyon sisteminde ve atıksu arıtma tesisisi giriş ve çıkışında diyabet ilaçlarından metformin ve glibenclamide bileşiklerinin araştırıldığı bu çalışmada glibenclamide <dl olarak tespit edilirken, metformin yüksek konsantrasyonlarda tespit edilmiştir. Oldukça sık reçete edilen bu farmasötiğin kullanım alışkanlıkları takip edilmelidir. Tesiste metformin bileşiğinin %86'nın üzerinde giderildiği tespit edilmiştir ancak dönüşüm ürünü olan guanilüre bileşiği için detaylı araştırma gerekmektedir. Çıkış atıksularının tuz gölüne deşarj edildiği Konya kentsel atıksu arıtma tesisi çıkış atıksularında metformin için yapılan risk değerlendirmesinde düşük risk tespit edilmiştir. Ancak bu farmasötiğin arıtma çamuru ve sedimentlerde birikim yapabileceği, diğer kirleticiler ile sinerjik etki gösterebileceği de unutulmamalıdır.

KAYNAKÇA

Alanis-Leal, A. I., Hincapie-Mejia G., Granda-Ramirez, F., M. Blanco, L., & Josse Peral. Degradation of Metformin Hydrochloride and Glibenclamide by Several Advanced Oxidation Processes. Photocatalysis: Research and Potential, 2(1), 10001. 2025. https://doi.org/10.70322/prp.2025.10001

Archer, E., Petrie, B., Kasprzyk-hordern, B., Wolfaardt, G.M., The fate of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs), endocrine disrupting contaminants (EDCs), metabolites and illicit drugs in a WWTW and environmental waters. Chemosphere. 2017. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.101

Aydın, S., Ulvi, A., & Aydın, M. E. Illicit drugs and therapeutic opioids in urban wastewater: Occurrence, consumption estimates, removal and ecotoxicological implications. Environmental Pollution, 402, 128363. 2026. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2026.128363

Aydin, S. Aydin M.E. and Ulvi, A. Monitoring the release of anti-inflammatory and analgesic pharmaceuticals in the receiving environment. Environmental Science and Pollution Research, 26(36):36887-36902, 2019. https://doi.org/10.1007/s 11 356-019-06821-4.

Balakrishnan, A., Sillanpaa, M., Jacob, M.M., N. Vo, D.V. Metformin as an emerging concern in wastewater: Occurrence, analysis and treatment methods, Environmental Research 213, 113613. 2022.

Carmona, E., Andreu, V., Pic´o, Y., Multi-residue determination of 47 organic compounds in water , soil , sediment and fish – turia River as case study. J. Pharm. Biomed. Anal. 2017. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2017.08.014.

David, D. B., Mezence, J., Lange, C. R., Menges, D., & Carette, C. Antidiabetic Drugs Consumption in France Over a Decade: An Observational Study. Clinical Therapeutics. 2025. https://doi.org/10.1016/j.clinthera.2025.02.005

de Jesus Gaffney, V., Cardoso, V.V., Cardoso, E., Teixeira, A.P., Martins, J., Benoliel, M. J., Almeida, C.M.M., Occurrence and behaviour of pharmaceutical compounds in a Portuguese wastewater treatment plant: removal efficiency through conventional treatment processes. Environ. Sci. Pollut. Res. 24, 14717–14734. 2017. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9012-7.

Guo, Y.-Y., Zhang, J.-Y., Sun, J.-F., & Gao, H. A comprehensive review of small-molecule drugs for the treatment of type 2 diabetes mellitus: Synthetic approaches and clinical applications. European Journal of Medicinal Chemistry, 267, 116185. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2024.116185

Jelinek, H. F., Osman, W. M., Khandoker, A. H., Khalaf, K., Lee, S., Almahmeed, W., & Alsafar, H. S. Clinical profiles, comorbidities and complications of type 2 diabetes mellitus in patients from United Arab Emirates. BMJ Open Diabetes Research & Care, 5(1), Article e000427. 2017. https://doi.org/10.1136/bmjdrc-2017-000427

Kosma, C. I., Lambropoulou, D. A., & Albanis, T. A. Comprehensive study of the antidiabetic drug metformin and its transformation product guanylurea in Greek wastewaters. Water Research, 70, 436–448. 2015. https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.010

López-Serna, R., Pérez, S., Ginebreda, A., Petrović, M., & Barceló, D. Fully automated determination of 74 pharmaceuticals in environmental and waste waters by online solid phase extraction–liquid chromatography-electrospray–tandem mass spectrometry. Talanta, 83(2), 410–424. 2010. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.09.046

Martín, J., Buchberger, W., Santos, J. L., Alonso, E., & Aparicio, I. High-performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry method for the analysis of antidiabetic drugs in aqueous environmental samples. Journal of Chromatography B, 895-896, 94–101. 2012. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2012.03.023

Monk, J. R., Hooda, P. S., Busquets, R., & Sims, D. Occurrence of pharmaceuticals, illicit drugs and PFAS in global surface waters: A meta-analysis-based review. Environmental Pollution, 126412. 2025. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126412

Nguyen, K.H., 2018. Analysis of Emerging Environmental Contaminations Using Advanced Instrumental Tools : Application to Human and Environmental Exposure. College of Life and Environmental Science The University of Birminham, 2018.

Oertel, R., Baldauf, J., & Rossmann, J. Development and validation of a hydrophilic interaction liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the quantification of the antidiabetic drug metformin and six others pharmaceuticals in wastewater. Journal of Chromatography A, 1556, 73–80. 2018. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.04.068

Poursat, B. A. J., van Spanning, R. J. M., Braster, M., Helmus, R., de Voogt, P., & Parsons, J. R. Biodegradation of metformin and its transformation product, guanylurea, by natural and exposed microbial communities. Ecotoxicology and Environmental Safety, 182, 109414. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109414

Radjenovic, J., Petrovic, M., Barcelo, D., Fate and distribution of pharmaceuticals in wastewater and sewage sludge of the conventional activated sludge (CAS) and advanced membrane bioreactor (MBR) treatment. Water Res 43, 831–841. 2009. https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.043.

Shearer, L., Pap, S., & Gibb, S. W. Removal of pharmaceuticals from wastewater: a review of adsorptive approaches, modelling and mechanisms for metformin and macrolides. Journal of Environmental Chemical Engineering, 108106. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108106

Yao, L., Hu, Y., Yang, J.-H., Wu, R., Chen, F.-L., & Zhou, X. Wastewater surveillance for chronic disease drugs in wastewater treatment plants: Mass load, removal, and sewage epidemiology. Journal of Hazardous Materials, 489, 137661. 2025. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137661

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

GELENEKSEL ERZURUM PEYNİRİNDEN İZOLE EDİLEN PROTEAZ ÜRETEN BAKTERİ VE FUNGUSLARIN TARANMASI

Arife BİLGİÇ
Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı
E-posta: arife.ozcelik38@gmail.com – ORCID: 0009-0006-0415-0489

Doç. Dr. Sümeyra GÜRKÖK
Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı
E-posta: sgurkok@atauni.edu.tr – ORCID: 0000-0002-2707-4371

ÖZET

Bu çalışmada, Erzurum yöresinde geleneksel olarak üretilen küflü peynirlerden proteaz üreten bakteri ve fungusların izole edilmesi, proteolitik potansiyellerinin karşılaştırılması ve en yüksek enzim üretim kapasitesine sahip izolatın belirlenmesi amaçlanmıştır. Peynir örneklerinden 28 bakteri ve 14 fungus olmak üzere toplam 42 izolat elde edilerek saflaştırılmıştır. Bakteri izolatlarının proteolitik aktiviteleri yağsız süt agarında (SMA) 30 °C'de 48 saatlik, fungus izolatlarının aktiviteleri ise yağsız süt içeren patates dekstroz agarında (SM-PDA) 30 °C'de beş günlük inkübasyon sonunda oluşan hidroliz zonları esas alınarak değerlendirilmiştir. Bakteri izolatlarının büyük çoğunluğu belirgin hidroliz zonu oluştururken, 14 fungus izolatının yalnızca dördünde belirlenebilir proteolitik aktivite gözlenmiştir. En geniş hidroliz zonlarını oluşturan N17, N22, N24, N25, N26, N27-1, N27-2, N31 ve N32 kodlu dokuz bakteri izolatı sıvı proteaz üretim ortamına alınmış ve 30 °C'de beş gün inkübe edilmiştir. Kültür süpernatantlarındaki proteaz aktivitesi spektrofotometrik yöntemle karşılaştırılmıştır. En yüksek kantitatif proteaz aktivitesi N24 izolatında belirlenmiştir. İzolatın morfolojik ve biyokimyasal özellikleri değerlendirilmiş; 16S rDNA dizi analizi ve NCBI-BLAST karşılaştırması sonucunda Bacillus zhangzhouensis olarak tanımlanmış ve ASP suş koduyla adlandırılmıştır. Bulgular, geleneksel Erzurum küflü peynirinin proteaz üreten mikroorganizmalar açısından değerli bir kaynak olduğunu ve B. zhangzhouensis ASP suşunun ileri üretim optimizasyonu ile enzim karakterizasyonu çalışmaları için umut verici olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Proteaz, küflü peynir, bakteri, fungus, Bacillus zhangzhouensis, tarama

1. GİRİŞ

Proteazlar, proteinlerdeki peptit bağlarının hidrolizini katalizleyerek proteinlerin daha küçük peptitlere ve amino asitlere parçalanmasını sağlayan enzimlerdir. Hücresel metabolizmada temel görevler üstlenen bu enzimler; gıda, deterjan, deri, ilaç, tekstil ve atıkların biyolojik değerlendirilmesi gibi çok sayıda endüstriyel alanda kullanılmaktadır [1,2]. Bitkisel ve hayvansal kaynaklardan elde edilebilmelerine rağmen kısa üretim süreleri, kültür koşullarının kolay kontrol edilebilmesi, yüksek verim ve geniş katalitik çeşitlilik nedeniyle mikrobiyal proteazlar endüstriyel açıdan özel bir öneme sahiptir [1].

Geleneksel peynirler, standart starter kültür kullanılmadan veya bölgesel üretim uygulamaları altında olgunlaştırılmaları nedeniyle bakteriler, mayalar ve filamentli funguslardan oluşan karmaşık mikrobiyal topluluklar barındırabilmektedir. Bu toplulukların proteolitik faaliyetleri, kazeinin parçalanması ve aroma öncüllerinin oluşması yoluyla peynirin olgunlaşmasına, yapısına ve duyusal özelliklerine katkı sağlamaktadır [3,4]. Dolayısıyla geleneksel peynir mikrobiyotası, yalnızca ürün özelliklerinin anlaşılması için değil, biyoteknolojik değeri olan yeni enzim üreticilerinin bulunması için de önemli bir kaynaktır.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Proteaz üreticilerinin belirlenmesinde süt proteini içeren katı besiyerlerinde oluşan şeffaf hidroliz zonları hızlı ve ekonomik bir ön tarama ölçütüdür. Bununla birlikte zon büyüklüğü; koloni gelişimi, enzimin agar içinde yayılması ve ortam özelliklerinden etkilenebildiği için en güçlü üreticinin seçimi sıvı kültürde kantitatif aktivite ölçümüyle desteklenmelidir [5,6]. Bu çalışmada Erzurum yöresi geleneksel küflü peynirlerinden bakteri ve fungusların izolasyonu, katı besiyerinde proteolitik aktivitelerinin taranması, seçilen bakteri izolatlarının sıvı ortamda karşılaştırılması ve en yüksek aktiviteye sahip izolatın tanımlanması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Peynir Örneklerinden Mikroorganizma İzolasyonu

Erzurum yöresinde geleneksel olarak üretilen küflü peynir örnekleri mikrobiyolojik izolasyon amacıyla kullanılmıştır. Geleneksel yöntemle üretilmiş küflü peynirlerden aseptik koşullarda örnekler alınmıştır. Parçalar steril serum fizyolojik içerisinde seri ardışık seyreltmelere tabi tutulmuştur. Seyreltiler; bakteriler için genel besiyerine, funguslar için Patates Dekstroz Agar (PDA)'a yayma plak yöntemiyle ekilmiştir. Farklı morfolojik özellik gösteren koloniler ayrı ayrı işaretlenerek seçilmiştir. Seçilen koloniler ardışık pasajlarla tekrar ekilerek saf kültür haline getirilmiştir.

2.2. Katı Besiyerinde Proteolitik Aktivite Taraması

Bakteri izolatları yağsız süt agarına (SMA) nokta ekim yöntemiyle inoküle edilmiş ve 30 °C'de 48 saat inkübe edilmiştir. Fungus izolatları ise yağsız süt içeren patates dekstroz agarına (SM-PDA) ekilmiş ve 30 °C'de beş gün inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda koloni çevresinde oluşan şeffaf hidroliz zonları, besiyerindeki kazeinin ekstraselüler proteazlar tarafından parçalanmasının göstergesi olarak kabul edilmiştir. Zonların varlığı ve göreli genişliği dikkate alınarak yüksek potansiyele sahip izolatlar seçilmiştir.

2.3. Sıvı Ortamda Proteaz Üretimi ve Aktivite Tayini

Katı besiyerinde en geniş hidroliz zonlarını oluşturan dokuz bakteri izolatı sıvı proteaz üretim ortamına aktarılmı; 5 g kazein, 2 g maya özütü, 5 g pepton, 5 g NaCl, 0,2 g $MgSO_4.7H_2O$, 0,1 g $CaCl_2$ ve 1 g K_2HPO_4 1 L saf su içinde çözüldü ve pH 8,0'a ayarlandıktan sonra steril edillerek ve 30 °C'de beş gün süreyle inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda hücrelerden uzaklaştırılan kültür süpernatantları ham enzim kaynağı olarak kullanılmıştır. Proteaz aktivitesi, kazeinin substrat olarak kullanıldığı spektrofotometrik yöntemle belirlenmiş ve dokuz izolat kantitatif aktivite bakımından karşılaştırılmıştır.

2.4. Seçilen İzolatın Tanımlanması

En yüksek proteaz aktivitesini gösteren izolatın koloni ve hücre morfolojisi incelenmiş; Gram boyama, katalaz, amilaz, selüloz,hemoliz, üreaz, ve hareket özellikleri değerlendirilmiştir. Moleküler tanımlama için 16S rDNA bölgesi çoğaltılarak dizi analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen dizi NCBI veri tabanındaki referans dizilerle BLAST aracılığıyla karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR

3.1. İzolasyon ve Katı Besiyeri Taraması

Peynir örneklerinden 28 bakteri ve 14 fungus olmak üzere toplam 42 saf izolat elde edilmiştir. SMA besiyerindeki taramada bakteri izolatlarının büyük çoğunluğunun belirgin hidroliz zonları oluşturduğu gözlenmiştir. Fungus izolatlarında ise 14 izolattan yalnızca P5, P6, P11 ve P12 kodlu dört izolat belirlenebilir proteolitik aktivite göstermiştir. Bu gözlem, incelenen kültür ve inkübasyon koşullarında proteolitik aktivitenin bakteri izolatlarında daha yaygın olduğunu ortaya koymuştur.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çizelge 1. İzolatların proteolitik tarama sonuçlarının özeti

Mikroorganizma grubu	Toplam izolat	Proteolitik bulgu
Bakteri	28	Büyük çoğunluk pozitif; belirgin zonlar
Fungus	14	4 pozitif izolat: P5, P6, P11, P12

3.2. Sıvı Ortamda Kantitatif Aktivite

Katı besiyerinde en geniş zonları oluşturan N17, N22, N24, N25, N26, N27-1, N27-2, N31 ve N32 kodlu dokuz bakteri izolatı sıvı ortam çalışmaları için seçilmiştir. Spektrofotometrik ölçümler sonucunda en yüksek proteaz aktivitesi N24 izolatında belirlenmiş ve bu izolat ileri tanımlama çalışmasına alınmıştır.

Çizelge 2. Sıvı üretim ortamına aktarılan bakteri izolatları

Seçim aşaması	İzolatlar	Sonuç
Katı besiyeri ön taraması	N17, N22, N24, N25, N26, N27-1, N27-2, N31, N32	9 izolat seçildi
Kantitatif aktivite	N24	En yüksek aktivite

3.3. N24 İzolatının Tanımlanması

N24 izolatının Gram pozitif, basil biçimli, yuvarlak kolonili ve katalaz, selüloz, amilaz pozitif; hemoliz, üreaz ve hareket testlerinde negatif olduğu belirlenmiştir. 16S rDNA dizi analizi ve NCBI-BLAST karşılaştırması sonucunda izolat *Bacillus zhangzhouensis* olarak tanımlanmış ve ASP suş koduyla adlandırılmıştır.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada geleneksel Erzurum küflü peynirinden elde edilen 28 bakteri izolatının büyük çoğunluğunun SMA üzerinde proteolitik zon oluşturması, geleneksel peynirlerin proteaz üreticileri bakımından zengin bir tarama kaynağı olduğunu göstermiştir. Benzer biçimde Alemu [5], peynir örneklerinden elde ettiği 35 bakteri izolatının tamamına yakınının süt agarında kazein hidrolizi oluşturduğunu bildirmiştir. Divle Obruğu peynirinden izole edilen mikroorganizmaların incelendiği çalışmada ise 18 bakteri suşunun 14'ünde katı besiyerinde proteaz aktivitesi belirlenmiştir [4]. Mevcut çalışmanın bu araştırmalarla uyumlu olması, peynirdeki protein açısından zengin ekolojik koşulların proteolitik mikroorganizmaların seçilmesini destekleyebileceğini düşündürmektedir.

Fungus izolatlarında yalnızca dört kültürün belirlenebilir aktivite göstermesi, kullanılan fungus koleksiyonunda proteolitik özelliğin bakterilere göre daha sınırlı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte bu sonuç, fungusların genel olarak düşük proteaz üreticisi olduğu anlamına gelmemektedir. Öztürkoğlu-Budak ve ark. [4], Divle Obruğu peynirinden elde edilen Penicillium brevicompactum, P. cavernicola ve P. olsonii suşlarında yüksek proteaz aktivitesi saptamıştır. İki çalışma arasındaki farklılık; izole edilen türlerin yapısı, besiyerinin pH'sı ve bileşimi, ekim biçimi ile inkübasyon süresi gibi suşa ve yönteme bağlı değişkenlerden kaynaklanabilir. Ayrıca bakteriler için 48 saat, funguslar için beş gün uygulanmış olması grupların biyolojisine uygun olmakla birlikte, zon çaplarının doğrudan gruplar arası nicel üstünlük şeklinde yorumlanmasını sınırlar.

Katı besiyeri taramasında öne çıkan dokuz izolatın sıvı ortamda yeniden değerlendirilmesi, yalnızca zon çapına dayalı seçimin sınırlılıklarını azaltmıştır. Katı ortamdaki zon büyüklüğü enzimin üretim

miktarının yanı sıra agar içinde difüzyonuna ve koloni büyüklüğüne de bağlıdır. Feyissa [6], 36 bakteriyel izolat arasından SMA'da en geniş zonu oluşturan suşu seçmiş ve bunu kantitatif aktivite ölçümleriyle desteklemiştir. Bu çalışmada da aynı iki aşamalı yaklaşım uygulanmış ve N24 izolatının dokuz aday arasında en yüksek sıvı proteaz aktivitesini göstermesi, izolatın ileri çalışmalar için seçilmesini güçlendirmiştir.

En yüksek aktiviteli izolatın Bacillus zhangzhouensis olarak tanımlanması, Bacillus cinsinin hücre dışı proteaz üretimindeki bilinen önemini desteklemektedir. Bacillus türleri, yüksek düzeyde ekstraselüler enzim salgılamaları, hızlı gelişmeleri ve farklı üretim koşullarına uyum sağlayabilmeleri nedeniyle proteaz biyoteknolojisinde sıklıkla tercih edilmektedir [1,2]. Divle peyniri çalışmasında proteolitik bakteriler arasında Bacillus stratosphericus'un da yer alması [4], geleneksel peynirlerin farklı Bacillus türleri için doğal bir kaynak olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte B. zhangzhouensis'in proteaz üretimine ilişkin çalışmaların sınırlı olması, ASP suşunun özgünlüğünü artırmakta ve üretim koşulları ile enzimin biyokimyasal özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Bakteri izolatlarının bu çalışmada funguslara göre daha yaygın aktivite göstermesi, yalnızca endüstriyel potansiyel bakımından bir öncelik göstergesi olarak değerlendirilmelidir. Çünkü proteazın uygulama değeri, toplam aktivitenin yanı sıra optimum pH ve sıcaklık, stabilite, substrat özgüllüğü, inhibitörlere dayanıklılık ve güvenlik gibi özelliklere bağlıdır [1,2]. Örneğin Öztürkoğlu-Budak ve ark. [4], fungal proteazların aspartik proteaz karakteri ve sütü pıhtılaştırma potansiyeli nedeniyle peynir teknolojisi için avantaj sağlayabileceğini bildirmiştir. Bu nedenle çalışmadaki dört aktif fungus izolatının tamamen elenmesi yerine, farklı pH koşullarında ve sıvı üretim ortamlarında ayrıca değerlendirilmesi yeni enzim adaylarının ortaya çıkarılmasına katkı sağlayabilir.

Çalışmanın başlıca sınırlılığı, sunulan tarama aşamasında hidroliz zonları ile sıvı aktivite değerlerinin tüm izolatlar için ayrıntılı sayısal karşılaştırmasının verilmemesidir. İleri çalışmalarda deneylerin biyolojik tekrarlarla yürütülmesi, zon/koloni oranlarının hesaplanması, proteaz aktivitesinin U/mL olarak raporlanması ve sonuçların istatistiksel analizle desteklenmesi önerilmektedir. Ayrıca ASP suşunun üretim ortamı, sıcaklık, başlangıç pH'sı ve karbon–azot kaynakları bakımından optimize edilmesi; enzimin saflaştırılarak moleküler kütle, pH ve sıcaklık özelliklerinin belirlenmesi endüstriyel kullanım potansiyelinin daha güvenilir biçimde değerlendirilmesini sağlayacaktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Erzurum yöresel küflü peynirinden elde edilen 42 saf izolatın taranması sonucunda proteolitik aktivitenin bakteri izolatlarında fungus izolatlarına göre daha yaygın olduğu belirlenmiştir. Katı besiyerinde en geniş zonları oluşturan dokuz bakteri izolatının sıvı kültürde karşılaştırılması sonucunda N24 izolatı en yüksek aktiviteyi göstermiştir. Morfolojik, biyokimyasal ve moleküler incelemeler sonucunda bu izolat *Bacillus zhangzhouensis* ASP olarak tanımlanmıştır. Bulgular, geleneksel Erzurum küflü peynirinin yeni mikrobiyal proteaz üreticilerinin araştırılmasında değerli bir kaynak olduğunu ortaya koymuştur.

B. zhangzhouensis ASP suşunun proteaz üretim koşullarının optimize edilmesi, enzimin saflaştırılması ve biyokimyasal karakterizasyonunun yapılması önerilmektedir. Ayrıca aktif fungus izolatlarının farklı pH ve besiyeri koşullarında yeniden değerlendirilmesi, bakteriyel ve fungal proteazların farklı endüstriyel uygulamalar bakımından karşılaştırılmasına olanak sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

[1] Solanki, P., Putatunda, C., Kumar, A., Bhatia, R., & Walia, A. (2021). Microbial proteases: ubiquitous enzymes with innumerable uses. *3 Biotech*, *11*(10), 428.

[2] Razzaq, A., Shamsi, S., Ali, Ali, Q., Sajjad, M., Malik, A., & Ashraf, M. (2019). Microbial proteases applications. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, *7*, 110.

[3] Zheng, X., Shi, X., & Wang, B. (2021). A review on the general cheese processing technology, flavor biochemical pathways and the influence of yeasts in cheese. *Frontiers in microbiology*, *12*, 703284.

[4] Ozturkoglu-Budak, S., Wiebenga, A., Bron, P. A., & de Vries, R. P. (2016). Protease and lipase activities of fungal and bacterial strains derived from an artisanal raw ewe's milk cheese. *International Journal of Food Microbiology*, *237*, 17-27.

[5] Alemu, F. (2015). Isolation and screening of protease enzyme producing bacteria from cheese at Dilla University, Ethiopia. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, *4*(2), 234-239.

[6] Feyissa, B. H. (2025). Screening, Identification, and Optimization of Protease Producing Bacillus pumilus Strain DT-15 From Tannery Waste Disposal Site in Addis Ababa, Ethiopia. *International Journal of Microbiology*, *2025*(1), 7176092.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SCREENING OF PROTEASE-PRODUCING BACTERIA AND FUNGI ISOLATED FROM TRADITIONAL ERZURUM CHEESE

Arife BİLGİÇ

Atatürk University / Graduate School of Natural and Applied Sciences / Department of Biology

Email Address - arife.ozcelik38@gmail.com- ORCID ID: 0009-0006-0415-0489

Assoc. Prof. Dr. Sümeyra GÜRKÖK

Atatürk University / Graduate School of Natural and Applied Sciences / Department of Biology

Email Address – sgurkok@atauni.edu.tr ORCID ID: 0000-0002-2707-4371

ABSTRACT

In this study, it was aimed to isolate protease-producing bacteria and fungi from traditional moldy cheeses produced in the Erzurum region, to compare their proteolytic potentials, and to identify the isolate with the highest enzyme production capacity. A total of 42 isolates, consisting of 28 bacteria and 14 fungi, were obtained from the cheese samples and purified. The proteolytic activities of the bacterial isolates were evaluated based on the hydrolysis zones formed on skim milk agar (SMA) after 48 hours of incubation at 30 °C, while the activities of the fungal isolates were evaluated based on the hydrolysis zones formed on skim milk-containing potato dextrose agar (SM-PDA) after five days of incubation at 30 °C. While the majority of the bacterial isolates formed distinct hydrolysis zones, detectable proteolytic activity was observed in only four of the 14 fungal isolates. Nine bacterial isolates, coded N17, N22, N24, N25, N26, N27-1, N27-2, N31, and N32, which formed the largest hydrolysis zones, were transferred to liquid protease production medium and incubated at 30 °C for five days. The protease activities in the culture supernatants were compared using a spectrophotometric method. The highest quantitative protease activity was determined in isolate N24. The morphological and biochemical characteristics of the isolate were evaluated; as a result of 16S rDNA sequence analysis and NCBI-BLAST comparison, it was identified as *Bacillus zhangzhouensis* and designated with the strain code PZ779393. The findings demonstrated that traditional Erzurum moldy cheese is a valuable source of protease-producing microorganisms, and that the *B. zhangzhouensis* ASP strain is promising for further production optimization and enzyme characterization studies.

Keywords: Protease, enzyme screening, traditional moldy cheese, *Bacillus zhangzhouensis*, proteolytic activity.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. INTRODUCTION

Proteases are enzymes that catalyze the hydrolysis of peptide bonds in proteins, enabling the breakdown of proteins into smaller peptides and amino acids. Playing fundamental roles in cellular metabolism, these enzymes are used in numerous industrial fields such as food, detergent, leather, pharmaceuticals, textiles, and the biological valorization of wastes [1,2,]. Although they can be obtained from plant and animal sources, microbial proteases hold particular industrial importance due to their short production times, the ease with which culture conditions can be controlled, high yields, and broad catalytic diversity [1].

Traditional cheeses, being ripened without the use of standard starter cultures or under regional production practices, may harbor complex microbial communities consisting of bacteria, yeasts, and filamentous fungi. The proteolytic activities of these communities contribute to cheese ripening, texture, and sensory properties through the breakdown of casein and the formation of flavor precursors [3,4]. Therefore, the traditional cheese microbiota constitutes an important source not only for understanding product characteristics but also for discovering new enzyme producers of biotechnological value.

In identifying protease producers, the clear hydrolysis zones formed on solid media containing milk protein serve as a rapid and economical preliminary screening criterion. However, since zone size can be influenced by colony growth, the diffusion of the enzyme within the agar, and medium characteristics, the selection of the strongest producer should be supported by quantitative activity measurements in liquid culture [5,6]. In this study, it was aimed to isolate bacteria and fungi from traditional moldy cheeses of the Erzurum region, to screen their proteolytic activities on solid media, to compare the selected bacterial isolates in liquid medium, and to identify the isolate with the highest activity.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Isolation of Microorganisms from Cheese Samples

Moldy cheese samples traditionally produced in the Erzurum region were used for microbiological isolation. Samples were taken aseptically from the traditionally produced moldy cheeses. The pieces were subjected to serial successive dilutions in sterile physiological saline. The resulting dilutions were inoculated by the spread plate method onto Skim Milk Agar (SMA) for bacterial isolation and onto Potato Dextrose Agar (PDA) for fungi [8]. Colonies exhibiting different morphological characteristics were individually marked and selected. The selected colonies were re-cultured through successive passages to obtain pure cultures.

2.2. Screening of Proteolytic Activity on Solid Medium

Bacterial isolates were inoculated onto skim milk agar (SMA) by the spot inoculation method and incubated at 30 °C for 48 hours. Fungal isolates were inoculated onto skim milk-containing potato dextrose agar (SM-PDA) and incubated at 30 °C for five days. At the end of incubation, the clear hydrolysis zones formed around the colonies were considered indicative of the breakdown of casein in the medium by extracellular proteases [9]. Isolates with high potential were selected based on the presence and relative width of these zones.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

2.3. Protease Production in Liquid Medium and Activity Determination

The nine bacterial isolates that formed the largest hydrolysis zones on solid medium were transferred to liquid protease production medium. The medium was prepared by dissolving 5 g casein, 2 g yeast extract, 5 g peptone, 5 g NaCl, 0.2 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.1 g $CaCl_2$, and 1 g K_2HPO_4 in 1 L of distilled water; after adjusting the pH to 8.0, 50 mL aliquots were dispensed into 250 mL Erlenmeyer flasks, sterilized, and incubated at 30 °C for five days. At the end of incubation, culture supernatants freed from cells were used as the crude enzyme source. Protease activity was determined by a spectrophotometric method using casein as the substrate, and the nine isolates were compared in terms of quantitative activity.

The inoculum cultures of the bacterial isolates exhibiting protease activity were inoculated into 50 mL of liquid protease production medium at a rate of 1% (OD600 = 1). Following inoculation, the cultures were incubated at 30 °C and 185 rpm for 5 days. At the end of the incubation period, the cultures were centrifuged at 10,000 rpm for 5 min at 4 °C to remove the cells. The cell-free supernatant obtained after centrifugation was used as the crude enzyme preparation.

Casein was used as the substrate for the determination of protease activity. For the activity assay, 0.5 mL of the crude enzyme preparation was mixed with 2.5 mL of 0.6% (w/v) casein solution, and the reaction mixture was incubated at 30 °C for 10 min. At the end of the reaction period, enzymatic hydrolysis was terminated by adding 2.5 mL of 0.1 M trichloroacetic acid (TCA), and the mixture was allowed to stand at 30 °C for 10 min. Following the reaction, the mixture was filtered through Whatman No. 1 filter paper to remove the insoluble and unhydrolyzed casein fraction.

An aliquot of 0.25 mL of the filtrate was taken, and 2.5 mL of 0.5 M Na_2CO_3 and 0.5 mL of 1 N Folin–Ciocalteu phenol reagent were added. The mixture was homogenized and then allowed to stand at room temperature for 30 min. The color development resulting from the reaction was measured spectrophotometrically at a wavelength of 660 nm. The absorbance values obtained were evaluated using a tyrosine standard curve, and protease activity was calculated accordingly. All analyses were performed in three independent replicates [7].

2.4. Identification of the Selected Isolate

The colony and cell morphology of the isolate exhibiting the highest protease activity were examined; Gram staining, catalase, cellulose, amylase, hemolysis, urease, and motility characteristics were evaluated. For molecular identification, the 16S rDNA region was amplified and sequenced, and the resulting sequence was compared with reference sequences in the NCBI database via BLAST [10,11].

3. RESULTS

3.1. Isolation and Solid Medium Screening

A total of 42 pure isolates, consisting of 28 bacteria and 14 fungi, were obtained from the cheese samples. Screening on SMA medium revealed that the majority of the bacterial isolates formed distinct hydrolysis zones. Among the fungal isolates, on the other hand, only four isolates, coded P5, P6, P11, and P12, out of the 14 isolates exhibited detectable proteolytic activity. This

observation revealed that, under the culture and incubation conditions examined, proteolytic activity was more common among the bacterial isolates.

Table 1. Summary of proteolytic screening results of the isolates

Microorganism group	Total isolate	Proteolytic finding
Bacterium	28	The vast majority are positive; distinct zones.
Fungus	14	4 positive isolates: P5, P6, P11, P12

3.2. Quantitative Activity in Liquid Medium

The nine bacterial isolates coded N17, N22, N24, N25, N26, N27-1, N27-2, N31, and N32, which formed the largest zones on solid medium, were selected for liquid medium studies. As a result of the spectrophotometric measurements, the highest protease activity was determined in isolate N24, and this isolate was taken forward for further identification studies.

Table 2. Bacterial isolates transferred to the liquid production medium

Selection phase	Isolates	Conclusion
Solid medium preliminary screening	N17, N22, N24, N25, N26, N27-1, N27-2, N31, N32	9 isolates were selected.
Quantitative activity	N24	Highest activity

3.3. Identification of Isolate N24

Isolate N24 was determined to be Gram-positive, rod-shaped, with round colonies, and positive for catalase, cellulose, and amylase, while negative for hemolysis, urease, and motility tests. As a result of 16S rDNA sequence analysis and NCBI-BLAST comparison, the isolate was identified as *Bacillus zhangzhouensis* and designated with the strain code PZ779393.2.

4. DISCUSSION

In this study, the fact that the majority of the 28 bacterial isolates obtained from traditional Erzurum moldy cheese formed proteolytic zones on SMA demonstrated that traditional cheeses constitute a rich screening source in terms of protease producers. Similarly, Alemu [5] reported that nearly all of the 35 bacterial isolates obtained from cheese samples exhibited casein hydrolysis on milk agar. In a study examining microorganisms isolated from Divle Obruğu cheese, protease activity on solid medium was detected in 14 of 18 bacterial strains [4]. The consistency of the present study with these findings suggests that the protein-rich ecological conditions of cheese may favor the selection of proteolytic microorganisms.

The fact that only four fungal cultures exhibited detectable activity indicated that proteolytic properties were more limited among the fungal collection used compared to the bacteria. However, this result does not imply that fungi are generally poor protease producers. Öztürkoğlu-Budak et al. [4] detected high protease activity in *Penicillium brevicompactum*, *P.*

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

cavernicola, and *P. olsonii* strains obtained from Divle Obruğu cheese. The difference between the two studies may stem from strain- and method-dependent variables such as the composition of the isolated species, the pH and composition of the medium, the inoculation method, and the incubation period. Furthermore, although the use of 48 hours for bacteria and five days for fungi was appropriate to the biology of each group, this limits the direct interpretation of zone diameters as quantitative superiority between groups.

The re-evaluation of the nine isolates that stood out in the solid medium screening in liquid medium reduced the limitations of selection based solely on zone diameter. Zone size on solid medium depends not only on the amount of enzyme produced but also on its diffusion within the agar and on colony size. Feyissa [6] selected the strain forming the largest zone on SMA among 36 bacterial isolates and supported this selection with quantitative activity measurements. In this study, the same two-stage approach was applied, and the fact that isolate N24 exhibited the highest liquid protease activity among the nine candidates strengthened the case for its selection for further studies.

The identification of the isolate with the highest activity *B. zhangzhouensis* supports the well-established importance of the genus *Bacillus* in extracellular protease production. *Bacillus* species are frequently preferred in protease biotechnology owing to their ability to secrete high levels of extracellular enzymes, their rapid growth, and their adaptability to different production conditions [1,2]. The presence of *B. stratosphericus* among the proteolytic bacteria in the Divle cheese study [4] indicates that traditional cheeses may serve as a natural source for different *Bacillus* species. Nevertheless, the limited number of studies on protease production by *B. zhangzhouensis* increases the novelty of the ASP strain and necessitates a detailed investigation of its production conditions and the biochemical properties of the enzyme.

The fact that bacterial isolates exhibited more widespread activity than fungi in this study should be considered only as an indicator of priority in terms of industrial potential. This is because the application value of a protease depends not only on its total activity but also on properties such as optimum pH and temperature, stability, substrate specificity, resistance to inhibitors, and safety [1,2]. For instance, Öztürkoğlu-Budak et al. [4] reported that fungal proteases may offer advantages for cheese technology due to their aspartic protease character and milk-clotting potential. Therefore, rather than being entirely excluded, the four active fungal isolates in this study could be further evaluated under different pH conditions and in liquid production media, which may contribute to the discovery of new enzyme candidates.

The main limitation of the study is that a detailed numerical comparison between hydrolysis zones and liquid activity values was not provided for all isolates during the screening stage presented. In future studies, it is recommended that the experiments be carried out with biological replicates, that zone/colony ratios be calculated, that protease activity be reported in U/mL, and that the results be supported by statistical analysis. In addition, optimizing the ASP strain's production medium, temperature, initial pH, and carbon–nitrogen sources, as well as purifying the enzyme to determine its molecular mass, pH, and temperature characteristics, will enable a more reliable evaluation of its industrial application potential.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

5. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

As a result of screening 42 pure isolates obtained from Erzurum traditional moldy cheese, proteolytic activity was found to be more widespread among bacterial isolates than among fungal isolates. Comparison of the nine bacterial isolates that formed the largest zones on solid medium in liquid culture revealed that isolate N24 exhibited the highest activity. As a result of morphological, biochemical, and molecular analyses, this isolate was identified as *B. zhangzhouensis* ASP. The findings demonstrated that traditional Erzurum moldy cheese is a valuable source for the discovery of new microbial protease producers.

It is recommended that the protease production conditions of the *B. zhangzhouensis* ASP strain be optimized and that the enzyme be purified and biochemically characterized. In addition, the re-evaluation of the active fungal isolates under different pH and medium conditions will enable a comparison of bacterial and fungal proteases in terms of different industrial applications.

REFERENCES

[1] Solanki, P., Putatunda, C., Kumar, A., Bhatia, R., & Walia, A. (2021). Microbial proteases: ubiquitous enzymes with innumerable uses. *3 Biotech*, *11*(10), 428.

[2] Razzaq, A., Shamsi, S., Ali, A., Ali, Q., Sajjad, M., Malik, A., & Ashraf, M. (2019). Microbial proteases applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *7*, 110.

[3] Zheng, X., Shi, X., & Wang, B. (2021). A review on the general cheese processing technology, flavor biochemical pathways and the influence of yeasts in cheese. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 703284.

[4] Ozturkoglu-Budak, S., Wiebenga, A., Bron, P. A., & de Vries, R. P. (2016). Protease and lipase activities of fungal and bacterial strains derived from an artisanal raw ewe's milk cheese. *International Journal of Food Microbiology*, *237*, 17-27.

[5] Alemu, F. (2015). Isolation and screening of protease enzyme producing bacteria from cheese at Dilla University, Ethiopia. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, *4*(2), 234-239.

[6] Feyissa, B. H. (2025). Screening, identification, and optimization of protease producing *Bacillus pumilus* Strain DT-15 from tannery waste disposal site in addis ababa, Ethiopia. *International Journal of Microbiology*, *2025*(1), 7176092.

[7] Hemsinli, A., & Gurkok, S. (2024). Evaluation of a novel purified and characterized alkaline protease from the extremophile *Exiguobacterium alkaliphilum* VLP1 as a detergent additive. *Biotechnology Journal*, *19*(1), 2300441.

[8] Song, P., Zhang, X., Wang, S., Xu, W., Wang, F., Fu, R., & Wei, F. (2023). Microbial proteases and their applications. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1236368.

[9] Shaikh, I. A., Turakani, B., Malpani, J., Goudar, S. V., Mahnashi, M. H., Al-Serwi, R. H., ... & Iqubal, S. S. (2023). Extracellular protease production, optimization, and partial purification from Bacillus nakamurai PL4 and its applications. *Journal of King Saud University-Science*, *35*(1), 102429.

[10] Altschul, S. F., Gish, W., Miller, W., Myers, E. W., & Lipman, D. J. (1990). Basic local alignment search tool. *Journal of Molecular Biology*, *215*(3), 403-410.

[11] Weisburg, W. G., Barns, S. M., Pelletier, D. A., & Lane, D. J. (1991). 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *Journal of Bacteriology*, *173*(2), 697-703.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

JELMA/PEGDA BİYOKOMPOZİTLERİN SENTEZİ VE DOKU MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

SABİHA DEMİRCİ CENGİZ[1,2]

[1]Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Biyokimya ve Biyomalzemeler Araştırma Laboratuvarı

sabihademirci87@gmail.com - 0000-0001-7857-0001

[2]Asos Proses Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. – sabiha.demircicengiz@asos.com.tr

Prof. Dr. Fatma AYHAN[1]

[1]Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Biyokimya ve Biyomalzemeler Araştırma Laboratuvarı

fayhan@mu.edu.tr-0000-0003-2220-4496

ÖZET

Jelatin Metakrioil (JELMA), jelatin ve metakrilik anhidritin kimyasal reaksiyonu ile elde edilen ve fotopolimerizasyon metodu ile polimerleştirilebilen bir malzemedir. Polietilen glikol Diakrilat'ın (PEGDA) fotopolimerizasyonru ile oluşan hidrojeller yüksek biyouyumluluğa sahip, toksik olmayan, ilaç salımı ve doku mühendisliği çalışmalarında kullanılan bir malzemedir. Yapılan bu çalışmada, yüksek biyouyumluluğa sahip olan JELMA ve PEGDA 6000 makromerleri birlikte kullanılarak, biyokompozit hidrojellerin sentezi yapılmış ve doku mühendisliğinde kullanımı incelenmiştir.

Sunulan araştırmada tip A jelatin metakriloilleme, Polietilen Glikol de diakrilleme işlemleri sonrası fotopolimerize edilebilen JELMA ve PEGDA elde edilmiştir. JELMA ve Poli(etilen glikol) Diakrilat (PEGDA) kullanılarak biyokompozit hidrojellerin sentezi yapılmıştır. Sentezlenen Tip A JELMA/PEGDA 6000 biyokompozit hidrojellerin karakterizasyon çalışmaları kapsamında L929 fibroblast hücre hattı ile etkileşimleri incelenerek sitotoksik etkileri ortaya çıkarılmıştır. Deneysel sonuçlarda hücre canlılıkları %20 Tip A JELMA, PEGDA 6000, %20 Tip A JELMA / %10 PEGDA 6000 ve %15 Tip A JELMA / %15 PEGDA 6000 hidrojeller için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

JELMA içeren tüm hidrojellerde canlılık oranı yaklaşık %100 ler civarında olduğu gözlenirken düşük PEGDA oranında 48. saate en yüksek hücre canlılığı gözlenmiştir. PEGDA oranı arttığında kompozitlerin en yüksek hücre canlılığı geciktirilerek 72. saatte en yüksek değerine ulaşmıştır.

Tip A JELMA / PEGDA 6000 biyokompozit hidrojellerin L929 fibroblast hücre hattında toksik etki yaratmadığı, hücrelerin büyümesine ve canlılığının devam etmesine uygun ortam sağladığı görülmüştür. Sentezlenen bu hidrojellerin doku iskelesi olarak kullanılarak üzerinde hücrelerin büyümesine uygun ortam sağlayabileceği sonucu elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: JELMA, PEGDA, Biyokompozit hidrojeller, Hücre etkileşimi

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. GİRİŞ

Hidrojeller, monomerlerin bir araya gelmesi ile oluşan, suda ve vücut sıvısı gibi biyolojik sıvı ortamlarında şişebilen, çapraz bağlı üçboyutlu yapılardır. Hidrojeller, doğal hidrojeller ve sentetik hidrojeller olmak üzere ayrılmaktadır. Doğal hidrojeller yüksek biyouyumluluğa sahip olmaları, biyodegrede olabilmeleri, moleküler bağlama kapasiteleri ve biyoaktif özellikler sahip olmaları gibi pek çok avantaja sahiptir. Sentetik hidrojeller ise; yüksek su tutma kapasitesi ve mekanik dayanım gibi avantajlara sahiptir. Bu sebeple, doğal ve sentetik polimerlerin birlikte kullanılarak sentezlenen biyokompozit hidrojeller ile doğal ve sentetik hidrojellerin özelliklerinin birlikte göstermesini sağladığı hidrojellerin sentezlenmesi sağlanmaktadır [1,2]. Hidrojeller sahip olduğu özellikleri ile yara iyileşmesi, kontakt lensler, doku mühendisliği, ilaç salım sistemleri gibi pek çok biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır [3].

Polietilen glikol diakrilat (PEGDA) hidrofilik, suda ve organik çözenlerde çözünebilen PEG'den sentezlenen bir polimerdir. PEG'den sentezlediği için, PEG'in sahip olduğu özellikleri göstermektedir. PEGDA, PEG ve akriloil klorürün reaksiyonu ile sentezlenmektedir. Ayrıca PEGDA sahip olduğu gruplar sayesinde kolayca polimerize olabilmektedir [4,5]. PEGDA hidrojeller biyouyumluluk, düşük sitotoksisite gibi özelliklere sahip olup, biyoteknolojik uygulamalarda kullanımı tercih edilmektedir [6].

JELMA (Jelatin Metakriloil), jelatin ve metakrilik anhidridin reaksiyonuyla meydana gelen bir bileşiktir. Jelatin sahip olduğu amino gruplarının içerdiği yan gruplar sayesinde modifiye olabilmektedir. JELMA yapısında bulunan metakriloil grubu ile çapraz bağlarla bağlanabilmektedir. JELMA içeren hidrojeller düşük sitotoksisite, biyouyumlu ve hücre etkileşimleri konusunda kolay etkileşime girmesi dolayısı ile doku mühendisliği ve kontrollü ilaç salım teknikleri gibi pek çok biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır [7,8,9].

Yapılan bu çalışmada, biyokompozit hidrojellerin sentezi için jelatin metakriloil ve polietilen glikol diakrilat sentezi yapılmış ve sentezlenen PEGDA ve JELMA'lar ile biyouyumluluğa sahip biyokompozit hidrojeller sentezlenmiş ve hidrojellerin karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Sentezlenen JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin doku mühendisliğinde kullanımının araştırılması amacıyla L929 hücre etkileşimleri incelenerek sitotoksisiteleri belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Kimyasallar

Yaptığımız çalışmada; polietilen glikolün diakrilasyonu için polietilen glikol (Fluka-Bioultra, Mn:6000), trietil amin (Sigma Aldrich, ≥99,5%), tetrahidrofuran (Sigma Aldrich, susuz,≥99,9%,inhibitörsüz), akriloil klorür (Sigma Aldrich, ≥97%) temin edilmiştir. Jelatinin metakrilasyonu için; jelatin (Sigma Aldrich, Tip A,175 bloom), metakrilik anhidrit (Sigma Aldrich, ≥94%) alınmıştır. Hidrojellerin sentezinde fotobaşlatıcı olarak 2-hydroxy-2-methyl-propiophenone (IGRACURE 2959, Ciba Inc.) temin edilmiştir.

JELMA'nın karakterizasyon çalışmaları için TNBS analizinde; pikrilsülfonik asit (2,4,6-trinitrobenzen sülfonik asit-TNBS, Sigma Aldrich) ve sodyum dodesil sülfat (Sigma

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Aldrich) temin edilmiştir. Hücre kültüründe hücrelerin büyümesi için ortam olarak Roswell Park Memorial Institute Media (RPMI 1640, with L- Glutamin) (Cegrogen), antibiyotik olarak penisilin-streptomisin (100U/ml-100µg/ml) (Cegrogen), hücrelerin çoğalması amacıyla fetal bovine serum (FBS) (Cegrogen), hücrelerin pasajlanması için tripsin (Cegrogen) temin edilmiştir. Hücre kültürü çalışmalarında kullanılan dimetil sülfoksit (DMSO) (Appplichem) ve 3-(4,5-dimetiltiyazol-2-il)-2,5-difeniltetrazolyum bromür (MTT) (Applichem) satın alınmıştır. Hücrelerin boyanması için Trypan Blue (Sigma Aldrich) temin edilmiştir.

2.2. PEGDA sentezi ve karakterizasyonu

Yaptığımız bu çalışmada polietilen glikol (PEG) monomerinden yola çıkılarak, polietilen glikol diakrilat (PEGDA) sentezlenmiştir. Sentez için polietilen glikol (Mn:6000 g/mol) monomeri 50°C'de susuz tetrahidrofuran (THF) içerisinde 1/20 oranında çözülmüştür. Çözeltinin üzerine mol oranı PEG'den daha fazla olacak şekilde önce trietil amin (TEA), sonrasında akriloil klorür (ACl) (PEG:TEA:ACl – 1:4:2) eklenmiştir. Yapılan eklemeler sonrasında 5 saat azot gazı altında reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon süresi sonrasında, çözelti önce oda sıcaklığına, sonrasında ise +4°C'ye düşürülerek kristalize edilmiştir. Elde edilen PEGDA susuz THF ile tekrar çözdürülerek, tekrar kristalize edilerek, daha yüksek saflıkta PEGDA sentezlenmiştir. Sentezlenen PEGDA FTIR ve NMR analizleri ile karakterize edilmiştir.

2.3. JELMA sentezi ve karakterizasyonu

JELMA sentezi için, Tip A (175 bloom) jelatinden yola çıkılmış ve jelatin karbonat/bikarbonat tamponunda %10 oranında olacak şekilde, 50°C'de çözülmüştür. Jelatin çözeltisi elde edildikten sonra 1 gram jelatine 0,1 ml metakrilik anhidrit (MAA) olacak şekilde ilave edilmiştir. Metakrilik anhidrit ilavesi öncesinde ortamın pH'ı düzenli olarak NaOH ile pH=9'a ayarlanmıştır. Metakrilik anhidrit (MAA) 1 saatte 6 defada ve her seferinde ortamında pH=9 olacak şekilde ayarlanarak ilave edilmiştir. Metakrilik anhidrit ilavesi sonrası reaksiyon yarım saat daha devam ettikten sonra, reaksiyonun sonlanması için 1M HCl ile pH=7,4'e çekilmiştir. Reaksiyon sonrasında elde edilen çözelti 7kDA ayrımlı diyaliz torbasına alınarak, 37°C'de 6 saat diyaliz edilmiştir. Diyaliz sonrası elde edilen JELMA çözeltisi liyofilize edilerek, -20°C'de saklanmıştır. Elde edilen JELMA TNBS analizi ile substitusyon derecesinin belirlenmesi ve NMR ile karakterizasyonu yapılmıştır.

2.4. JELMA substitusyon derecesinin belirlenmesi

JELMA'nın substitusyon derecesi TNBS analiz metodu ile yapılmıştır. TNBS analizi 2,4,6,-trinitrobenzen-1-sülfonik asit(TNBS) ile primer amin gruplarının reaksiyona girmesi ile kolorimetrik olarak tayin edilmesine dayanan bir metottur. Bu metotta kullanılacak olan kalibrasyon grafiği glisin aminoasidi kullanılarak çizilmiştir. JELMA'nın TNBS analizinde, sentezlenmiş olan JELMA 1,6mg/ml olacak şekilde 0,1M pH=8,5 bikarbonat tamponunda çözülmüştür. Çözülen JELMA çözeltisinin 0,5 ml'sinin üzerine 0,5 ml %0,01'lik TNBS çözeltisi ilave edilerek, elde edilen çözelti 37°C'de 2 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonrasında elde edilen çözeltiye %10'luk 0,5ml sodyum dodesil sülfat (SDS) ve 1N HCl eklenerek, reaksiyon sonlandırılmıştır. Reaksiyon sonrası çözeltiler spektrofotometrede 335nm'de absorbanslar elde edilmiştir. Elde edilen absorbanslar

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

oluşturulan glisin kalibrasyon grafiğinde yerine konularak, substitusyon dereceleri elde edilmiştir [10].

2.5. JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojel sentezi

Sentezlenen tip A JELMA (%15 ve 20 ağırlık/hacim) ve PEGDA 6000(%15 ve 10 ağırlık/hacim) oranlarında, içerisine %1 oranında fotobaşlatıcı IRGACURE 2959 olacak şekilde karışım karanlık bir ortamda ısıtılarak, çözülmüştür. Hazırlanan çözelti küçük petrilere aktarılarak, ortamdan azot gazı geçirilerek 365 nm 10 mW cm^{-2} UV ışık altında polimerize edilmiştir. PEGDA ve JELMA ile yüksek molekül ağırlıklı PEGDA'lar kullanılarak yüksek protein içeriğine sahip biyokompozit hidrojeller sentezlenmiştir.

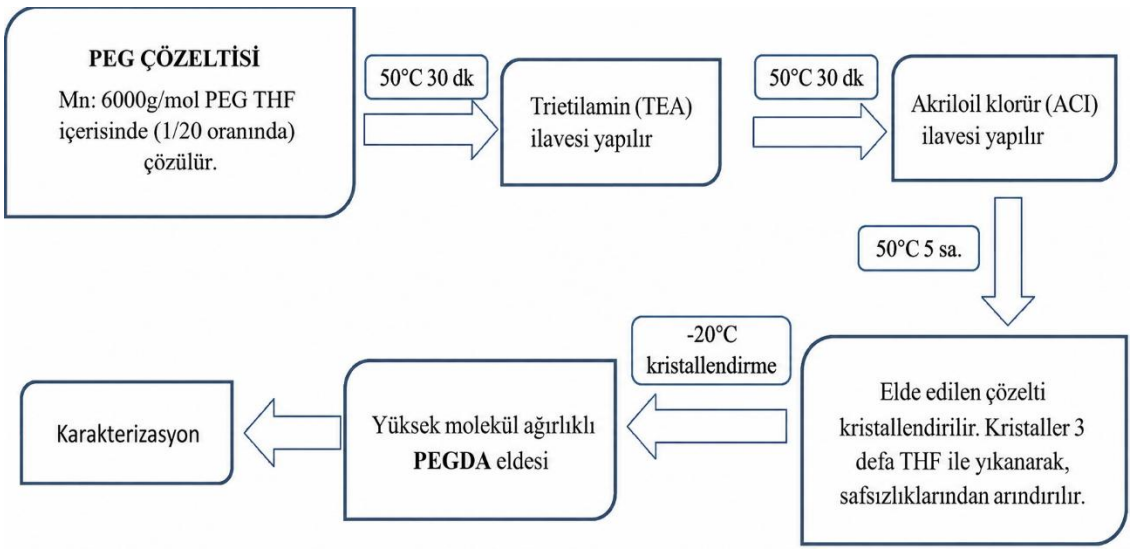
2.6. MTT Testi ile hücre canlılığının belirlenmesi

Sentezlenen biyokompozit hidrojellerin L929 hücre hattı üzerinde hücre canlılığı etkisi MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2)-2,5-difeniltetrazolyum bromür) yöntemi ile 24, 48 ve 72 saat için belirlenmiştir. MTT testi için, 96 kuyucuklu mikroplakalara hücre yoğunluğu $2x10^4$ hücre/ kuyucuk olacak şekilde hücreler ekilmiş ve 37°C'de %5 CO_2 ve %95 nemli CO_2 inkübatöründe 24 saat inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrasında kuyucukların üzerine sentezlenen biyokompozit hidrojeller eklenmiştir. Belirlenen 24,48 ve 72 saat inkübasyon sonrasında her kuyucuktaki besiyeri uzaklaştırılmış ve 100µl taze besiyeri ve 10µl MTT (5g/ml) eklenerek, plakalar 4 saat CO_2 inkübatöründe inkübe edilmiştir. 4 saatin sonunda her kuyucuğa 100µl DMSO eklenmiş ve 150 rpm'de 5-6 dakika çalkalanmıştır. Çalkalama sonrasında mikroplakalar 540nm dalga boyunda spektrofotometrede okunmuştur. Hidrojellerin hücre canlılığı üzerine etkisi % hücre canlılığı formülüne göre hesaplanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

$$\%\ \text{Hücre canlılığı} = \frac{Muamele\ edilen\ hücrelerin\ ortalama\ absorbansı}{Kontrol\ grubu\ hücrelerin\ ortalama\ absorbansı} \text{x}100$$

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

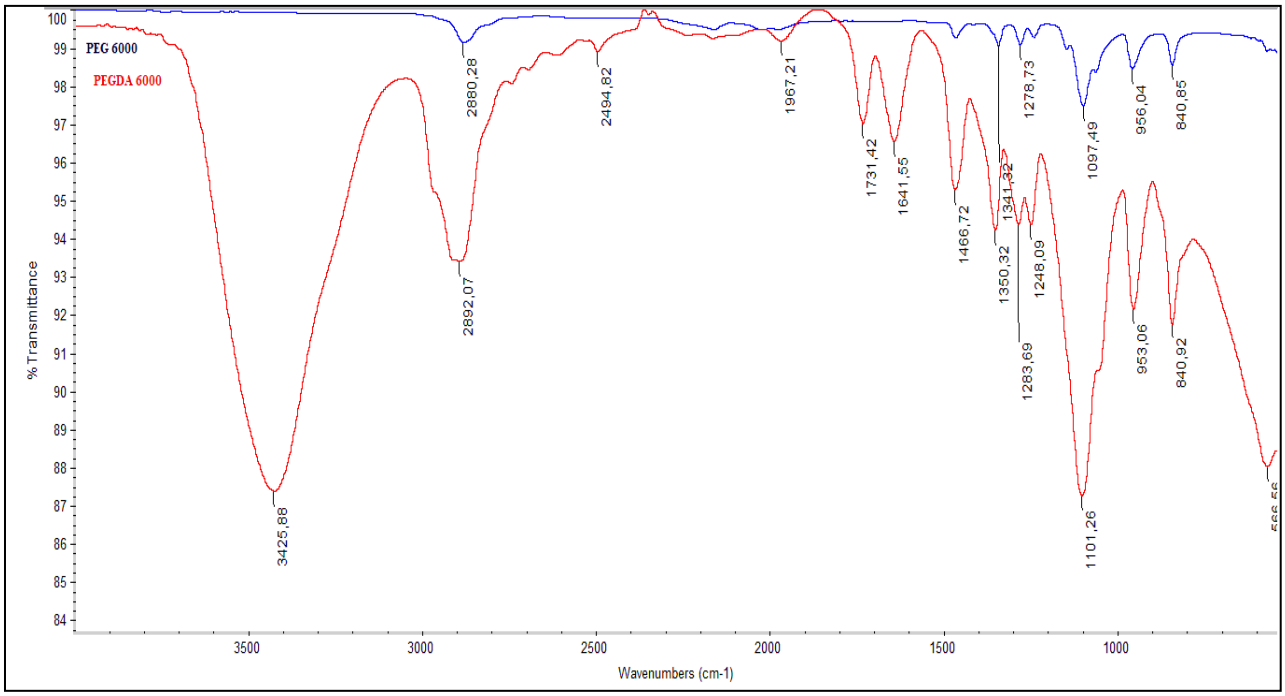
3.1. PEGDA Sentezi ve Karakterizasyonu



Görsel 1. PEGDA sentezi akış diyagramı

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

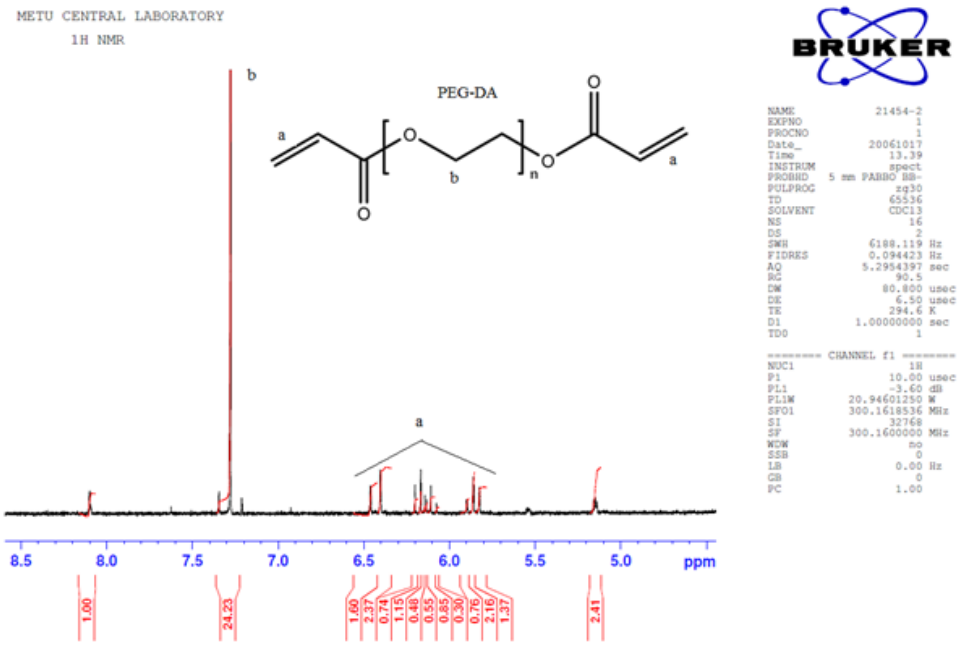
Görsel 1'de verildiği üzere PEG'den yüksek molekül ağırlıklı PEGDA sentezi gerçekleştirilmiş ve sentezlenen PEGDA'nın FTIR ve NMR ile karakterizasyonu yapılmıştır.



Görsel 2. PEG 6000 – PEGDA 6000 FTIR karşılaştırma spektrumları

Görsel 2'de PEG 6000 ve sentezlenen PEGDA 6000'nin ATR-FTIR'ları incelenmiştir. PEGDA için 1730-1760 cm^{-1} de ester C=O bağlarının varlığı ve 2885 cm^{-1} de PEG için metilen C-H gerilmelerinin varlığı gözlenmiştir. Akrillenmeye özgü olarak 1640 – 1675 cm^{-1}'de ve 1968 cm^{-1}'de akrilat pikine özgü bulunan gerilme titreşimi net olarak gözlenmiştir. Görsel 2' de görüldüğü üzere PEG momerinden yola çıkılarak, başarı ile diakrillenme yapılarak, PEGDA sentezlenmiştir [11,12].

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 3. PEGDA 6000 NMR spektrumu (5-8,5 ppm)

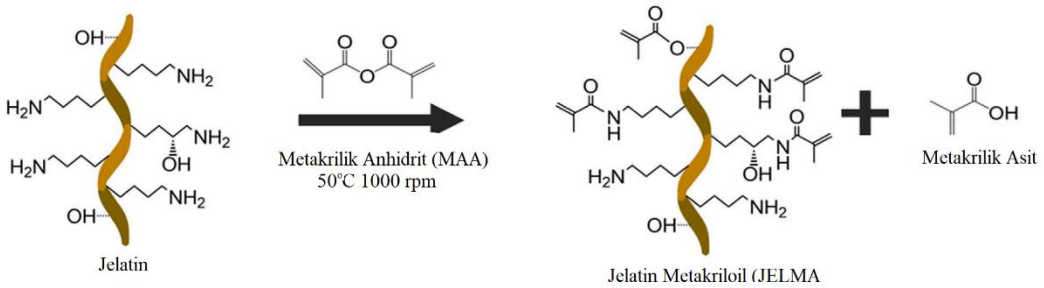
PEG 6000 ve PEG 6000'den sentezlenip, daha yüksek benzerliğe sahip olan PEGDA'nın katı hal yüksek güçlü NMR spektrofotometresi ile ^{1}H-NMR 'ları çekilmiştir. Elde edilen ^{1}H-NMR sonuçları incelendiğinde; PEG'e spesifik olan 3,5ppm'deki bağlar ve PEGDA'daki 5,82 –5,87 ppm'de akrilat C ve 60-6,22 ppm'de görülen akrilat pikleri gözlemlenmiştir.

PEG 6000'den yola çıkılarak sentezlenen farklı oranlarda TEA ve ACl içeren PEGDA'ların ^{1}H-NMR'larını incelediğimizde PEGDA spektrumlarında 5,79-6,43 ppm aralığında pikler gözlenmiştir. Bu pikler PEG makromerinin NMR spektrumlarında gözlenmemiştir. PEG makromeri ve sentezlenen PEGDA'ların NMR spektrumlarındaki alan hesabı ile akrilasyon derecesi hesaplanmıştır [13].

$$\%\ \text{Akrilasyon} = \frac{\text{Vinilin İntegrali}/6}{\left[\frac{\text{Vinilin Integrali}}{6} + \frac{\text{Oksietilenin Integrali}}{4} + \frac{44}{\text{PEG'inmolekül ağırlığı}}\right]} \text{x}100$$

PEGDA 6000'nin akrilasyon derecesi %98,8 olarak hesaplanmıştır.

3.2. JELMA Sentezi ve Karakterizasyonu



Görsel 4. JELMA sentezi akış diyagramı

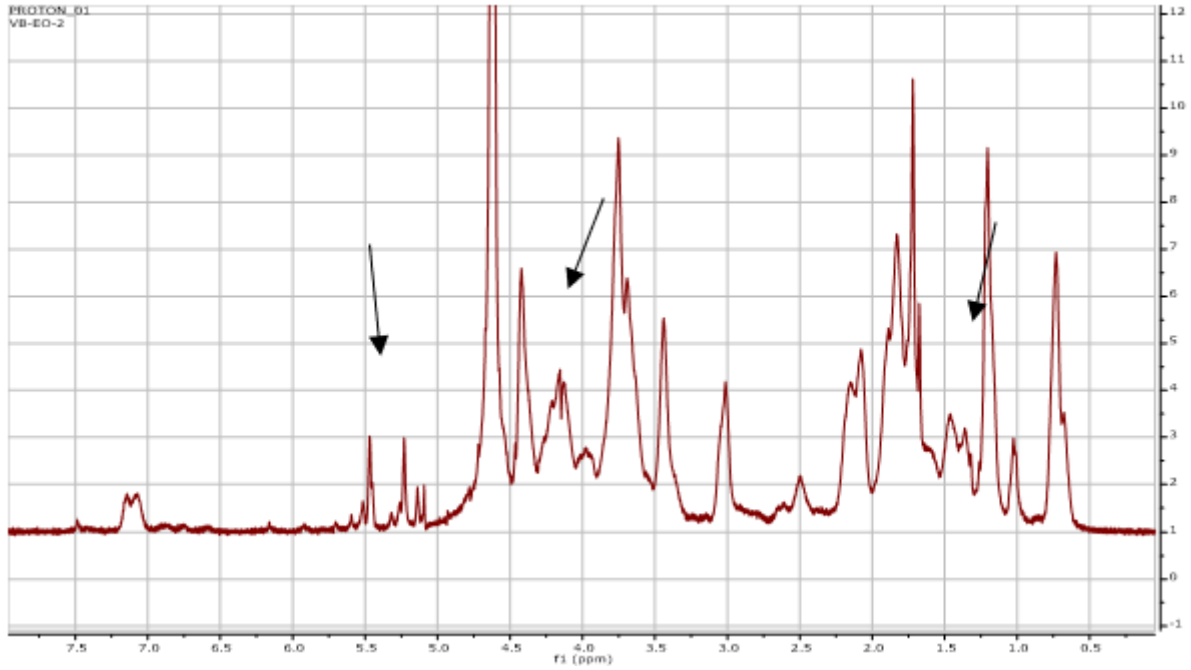
ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

JELMA sentezi jelatin ve metakrilik anhidritin reaksiyona girmesi ile meydana gelmektedir. Jelatinin yapısında yer alan Ɛ-amino (-NH_3) gruplarının metakrilik anhidritteki anhidrit grupları ile reaksiyona girmesi ile sentezlenmiştir. Sentezlenen JELMA karakterizasyonu TNBS analizi ve NMR ile karakterizasyonu yapılmıştır.

JELMA substitusyon derecesinin belirlenmesi için yapılan TNBS analizi sonucu; %82,9 oranında dönüşümün olduğu hesaplanmıştır.

Görsel 5'te jelatinin yapısında yer alan lizinin metilen protonundan gelen 2,8-2,95 ppm'deki sinyalin azaldığı gözlenmiştir. JELMA sentezi sonrasında metakrilamid gruplarından gelen akrilik protonun sinyalinin 5,4-5,6 ppm arasında oluştuğu, metakrilid anhidritin metil grubundan sinyalinin ise 1,8 ppm'de oluştuğu gözlenmiştir [13]. Jelatinden JELMA sentezinin metakrilasyon derecesi için NMR spektrumları kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

$$\%\ \text{Metakrilasyon derecesi (DM)} = \left(1 - \frac{\text{pik alanı (JELMA lizin metileni)}}{\text{pik alanı (modifiye olmayan jelatinin lizin metileni)}}\right) X100$$



Görsel 5. JELMA NMR spektrumu

Çizelge 1. JELMA dönüşüm dereceleri

Jelatin	TNBS analizine göre substitusyon derecesi	NMR analizine göre metakrilasyon derecesi
Tip A Jelatin	%82,91 ±0,01	%61,6

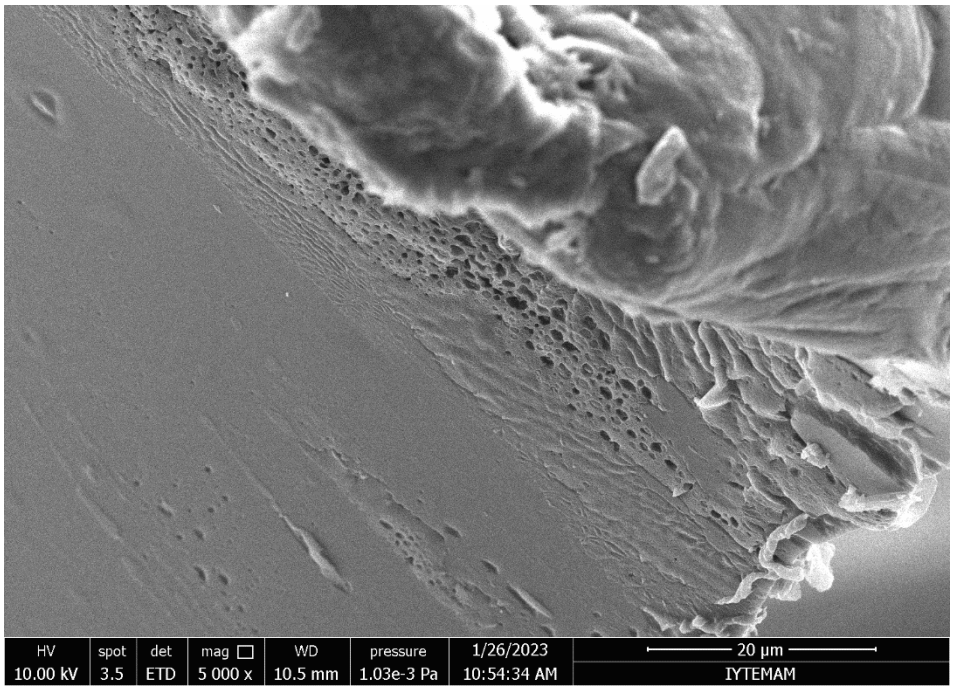
3.3. JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojel sentezi ve karakterizasyonu

Sentezlenen JELMA'lar tip A JELMA (%10,15 ve 20 ağırlık/hacim) ve PEGDA 6000(%20,15 ve 10 ağırlık/hacim) oranlarında, içerisine %1 oranında fotobaşlatıcı IRGACURE 2959 olacak şekilde karışım karanlık bir ortamda ısıtılarak, çözülmüştür.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Hazırlanan çözelti küçük petrilere belli miktarlarda alınarak, ortamdan azot gazı geçirilerek 365 nm 10 mW cm^{-2} UV ışık altında polimerize edilmiştir. JELMA ile yüksek molekül ağırlıklı PEGDA'lar kullanılarak yüksek protein içeriğine sahip biyokompozit hidrojeller sentezlenmiştir. Sentez sırasında ağırlıkça daha yüksek miktarda PEGDA içeren biyokompozit hidrojellerin polimerleşme süresinin daha uzun olduğu belirlenmiştir.

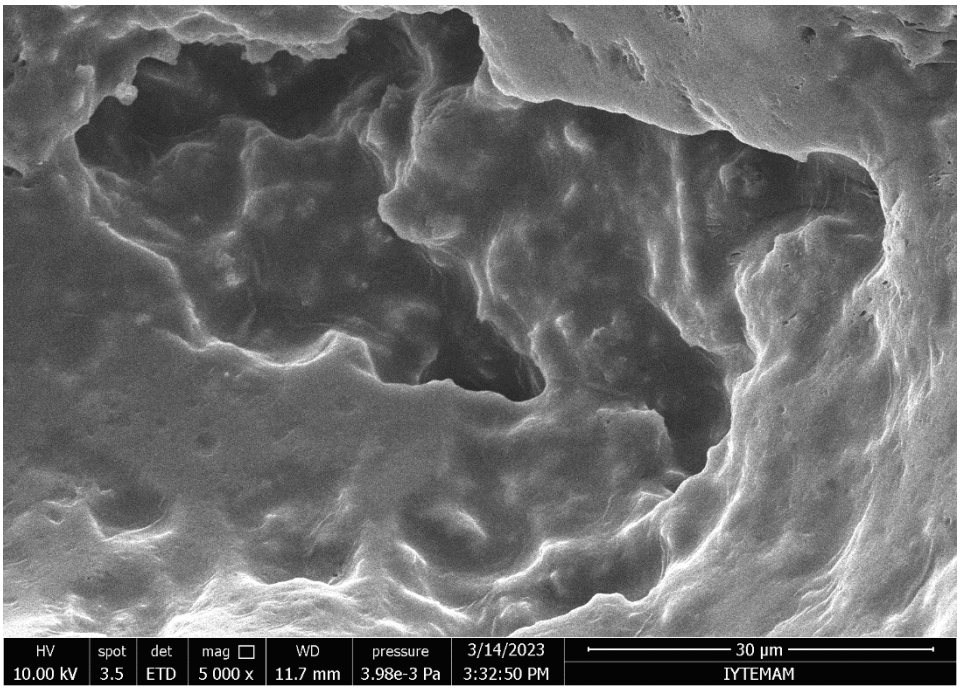
Sentezlenen JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin taramalı elektron mikroskobu ile görüntülemesi yapılarak, karakterize edilmiştir.



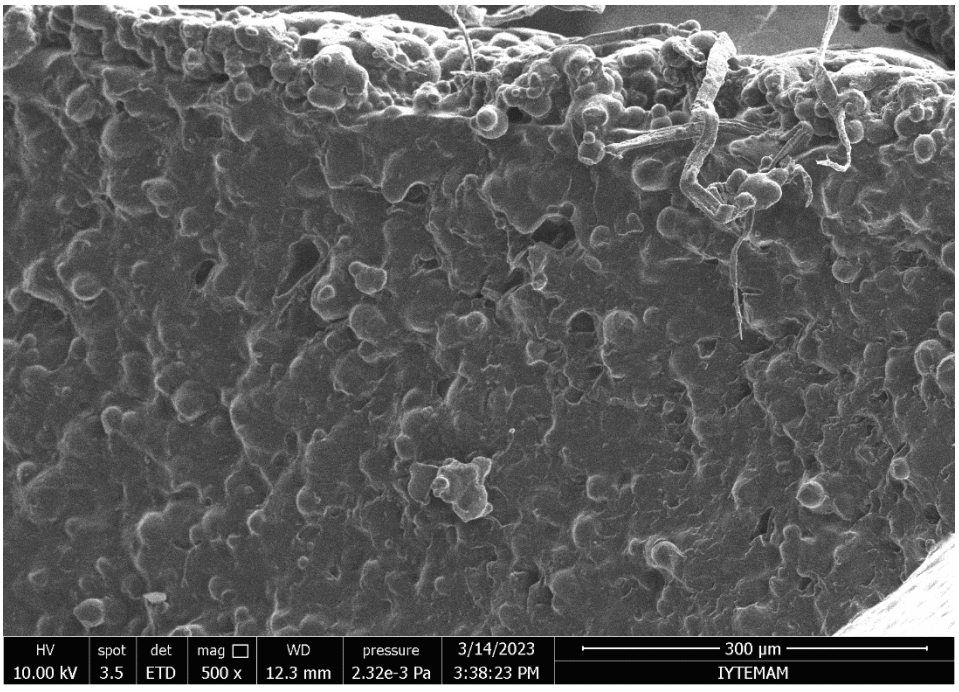
Görsel 6. %20 JELMA hidrojelin SEM görüntüsü

Görsel 6'da sadece %20 oranında JELMA hidrojelin SEM görüntüsü verilmiş ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Görsel 7 ve görsel 8'de ise JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görseller 7 ve 8 karşılaştırıldığında, içerdikleri JELMA dolayısı ile yapılarında multi katmanlı ve süngerimsi bir yapıda olduğu, protein içerdiği ve iki yapının birbirinin içine geçtiği gözlenmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 7. % 20 JELMA/ %10 PEGDA 6000 biyokompozit hidrojellerin SEM görüntüsü

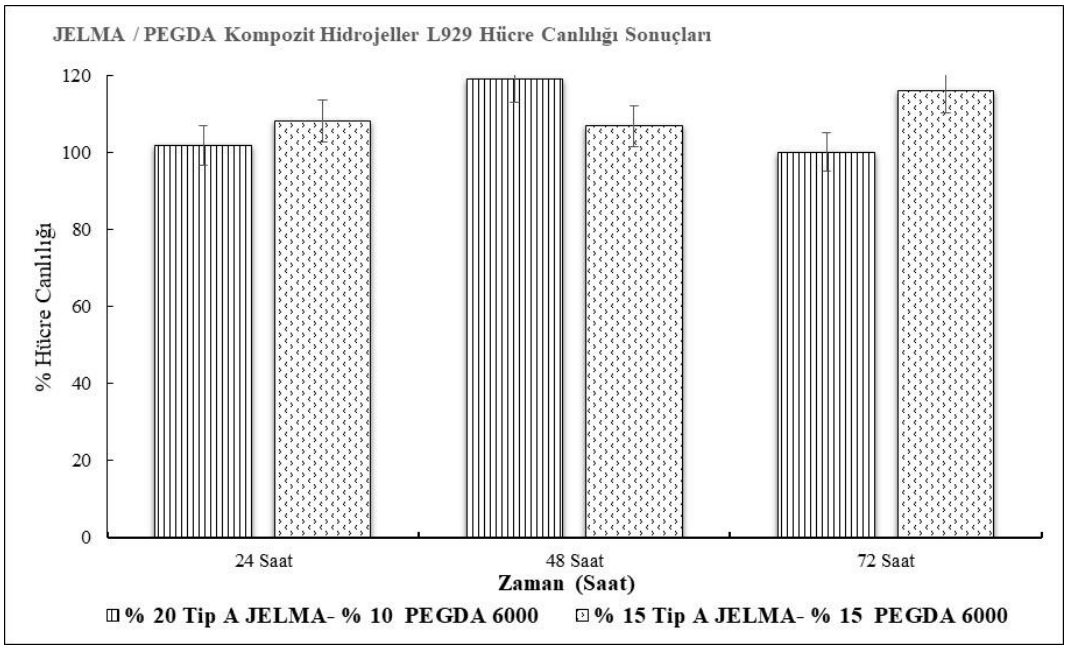


Görsel 8. %15 JELMA / %15 PEGDA 6000 biyokompozit hidrojellerin SEM görüntüsü

3.4. Hidrojellerin hücre etkileşim deneyleri

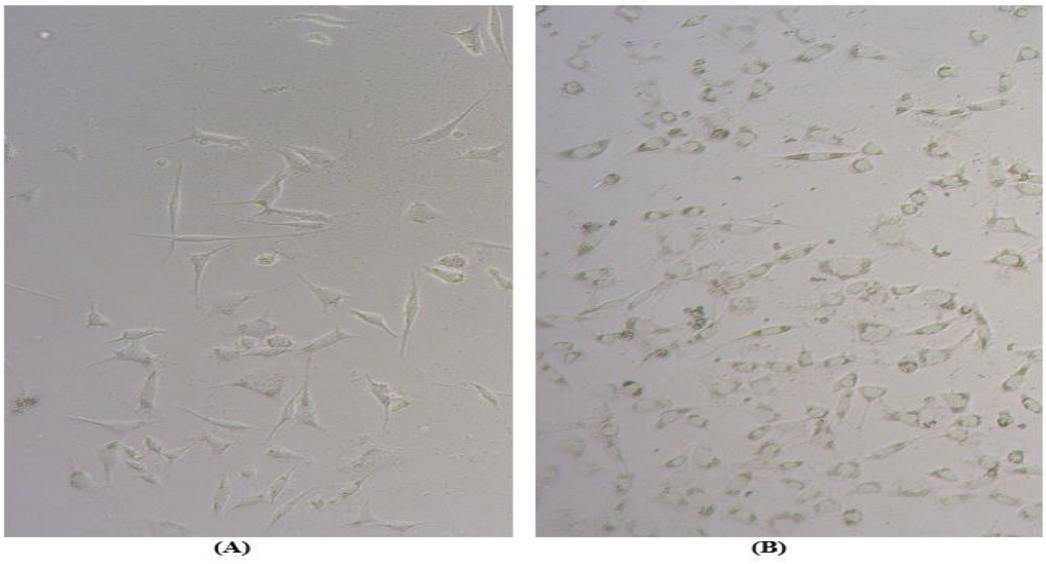
Sentezlenen JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin L929 hücre hatları ile etkileşimi incelenmiştir. Bunun için MTT metodu kullanılarak hücre canlılığı çalışmaları yapılmıştır. L929 hücre hattı 37°C'de %5 CO_2 içeren %95 nemli ortamda CO_2 etüvünde büyütülerek, çoğaltılmıştır. Hücrelerin üzerine belirli miktarlarda hidrojeller eklenerek, 24,48 ve 72 saatin sonunda MTT metodu ile hücre canlılığı incelenmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



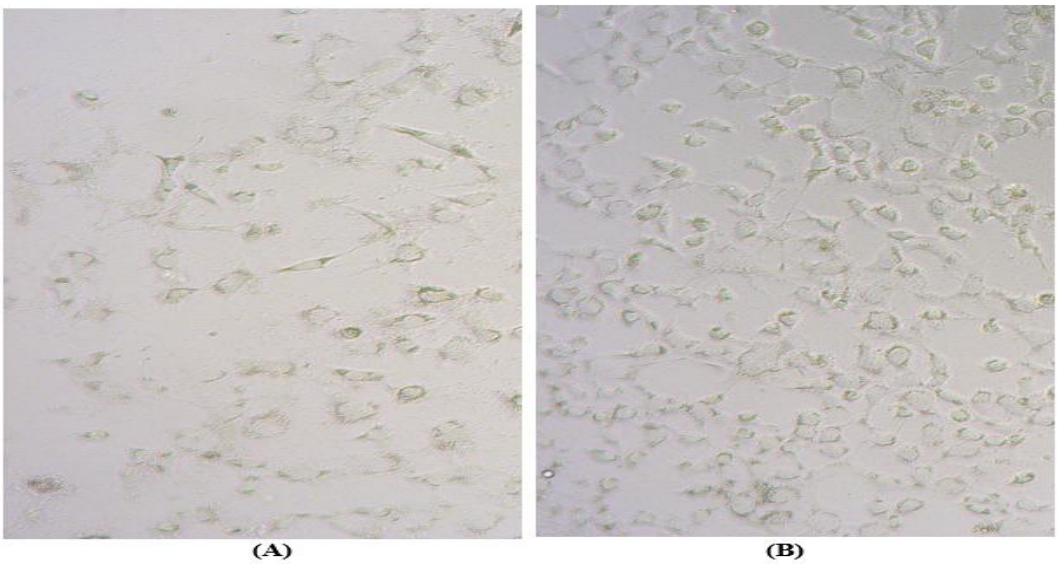
Görsel 9. JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin MTT sonuçları

Görsel 9'da tip A JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin L929 hücre hattı MTT sonuçları verilmiştir. MTT sonuçları incelendiğinde, hücrelerin hidrojeller eklendikten sonraki hücre canlılığı incelendiğinde hücrelerin %100'ün üzerinde canlılığa sahip olduğu ve hücreler üzerinde sitotoksik bir etki yaratmadığı gözlenmiştir. %15 JELMA/%15 PEGDA içeren biyokompozit hidrojellerin 24 ve 72 saatin sonundaki hücre canlılığının %20 JELMA/%10 PEGDA içeren biyokompozit hidrojellerden daha yüksek oranda hücre canlılığına sahip olduğu görülmüştür. %20 JELMA/%10 PEGDA biyokompozit hidrojellerin ise 48 saatin sonunda %15 JELMA/ %15 PEGDA içeren biyokompozit hidrojellerden hücre canlılığının daha iyi görülmüştür.

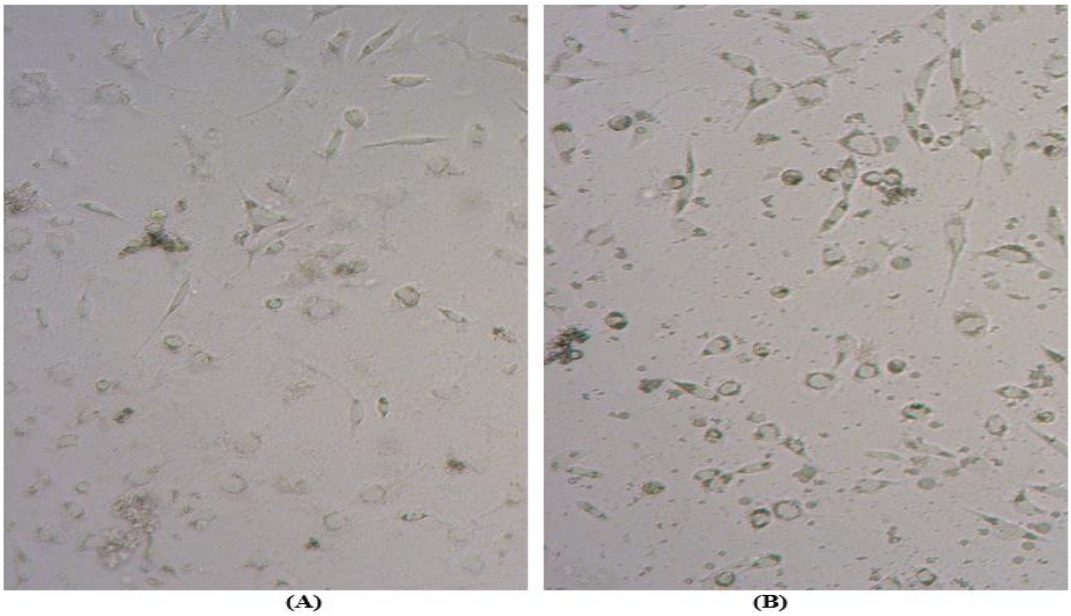


Görsel 10. A) 20 Tip A JELMA/%10 PEGDA6000 hidrojel; B) %15Tip A JELMA/%15 PEGDA6000 hidrojel; L929 Fibroblast hücre canlılığı sonuçları. (t=24 saat)

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1



Görsel 11. A) %20 Tip A JELMA/%10 PEGDA6000 hidrojel; B) %15Tip A JELMA/%15 PEGDA6000 hidrojel; L929 Fibroblast hücre canlılığı sonuçları. (t=48 saat).



Görsel 12. A) %20 Tip A JELMA/%10 PEGDA6000 hidrojel; B) %15Tip A JELMA/%15 PEGDA6000 hidrojel; L929 Fibroblast hücre canlılığı sonuçları. (t=72 saat)

Görsel 10,11 ve 12'de %20 Tip A JELMA/%10 PEGDA6000 hidrojel ve %15Tip A JELMA/%15 PEGDA6000 hidrojellerin L929 hücre hattı ile etkileşiminin 24, 48 ve 72 sonundaki hücre görüntüleri verilmiştir. Hücre görüntüleri incelendiğinde hücrelerin büyümesinin devam ettiği gözlenmiştir. Farklı oranlarda JELMA ve PEGDA içeren hidrojellerin 3T3 hücre hattı ile etkileşiminin incelendiğinde; hidrojellerin 3T3 hücrelerinin üzerinde sitotoksik etki yaratmadığı gözlenmiştir [14]. Literatür ile tip A JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin L929 hücre hattı sonuçlarımızı karşılaştırdığımızda, sentezlediğimiz biyomalzemelerin biyoyumluluğunun yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

edilen hücre etkileşim çalışmaları sonrasında ise; sentezlenen biyokompozit hidrojellerin hücre doku iskelesi, yara örtü materyali olarak kullanımına uygun olduğu görülmüştür.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Sunulan çalışmada, PEG 6000'den yola çıkarak PEGDA 6000 %98,8 gibi yüksek bir verimle ve yüksek dönüşümle sentezlenmiştir. Jelatinden yola çıkılarak JELMA sentezi %61 oranında metakrilleme işleminin olduğu görülmüştür. JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin sentezi gerçekleştirilmiş ve yapılan karakterizasyon çalışmaları sonrasında başarılı bir şekilde biyokompozit olduğu ve birbirine entegre olduğu görülmüştür. JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin hücre hattı üzerinde sitotoksik bir etki göstermediği, hücre büyümesi ve canlılığının devam etmesi için uygun ortam olduğu gözlenmiştir. Sonuçlar incelediğinizde, JELMA/PEGDA biyokompozit hidrojellerin doku mühendisliği çalışmalarında kullanılabileceği görülmüştür. Sentezlenen biyokompozit hidrojellerin doku mühendisliği çalışmalarında ve hücre çalışmaları için hücre büyümesine uygun bir ortam olduğu sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 21/129/01/1/1 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazar Sabiha Demirci Cengiz, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Biyomalzeme ve Doku Mühendisliği Doktora Burs Programı tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı YÖK'e teşekkür eder.

KAYNAKÇA

[1] El Sayed M.M. Production of Polymer Hydrogel Compositesand Their Applications, Journal of Polymers and the Environment, 31, 2855-2879, 2023

[2] Priya A.S., Premanand R., Ragupathi I., Bhaviripudi V.R., Aepuru R., Kannan K., Shanmugaray K. Comprehensive Review of Hydrogel Synthesis, Characterization and Emerging Applications, J. Compos. Sci., 8 (11),457, 2024.

[3] Choi H., Choi W-S., Jeong J-H. A Review af Advanced Hydrogel Applications for Tissue Engineering and Drug Delivery Systems as Biomaterials, Gels, 10(11),693,2024

[4] Ali S., Cuchiara M.L., West J.L. Micropatterning of Poly(ethylene glycol) Diacrylate Hydrogels, Methods in Cell Biology, 121, 105-119, 2014

[5] Wang, Q., Ren, L., Xu, C., Zhai, Z., Zhou, J.-a., Yao, Y., Xia, H. and Wang, Y. Synthesis and Characterization of Glucosamine Modified Poly(Ethylene Glycol) Hydrogels Via Photopolymerization. J. Appl. Polym. Sci., 128: 89-96, 2012

[6] Moore E.M., West J.L. Bioactive Poly(ethylene Glycol) Acrylate Hydrogels for Regenerative Engineering, Regenerative Engineering and Translational Medicine, 5,167-179,2019

[7] Yue K., Santiago G.T., AlvaresM.M., Tamayol A., Khademhosseini A.Synthesis, Properties and Biomedical Applications of Gelatin Methacryloyl (Gelma) Hydrogels, Biomaterials, 73,254-271,2015

[8] Wang Y., Ma M., Wang J. Zhang W., Lu W., Gao W., Zhang B., Guo Y. Development of a Photo-Crosslinking, Biodegradable GelMA/PEGDA Hydrogel for Guided Bone Regeneration Materials, *Materials*, *11*(8), 1345, 2018

[9] Sun M., Sun X., Wang Z., Guo S., Yu G., Yang H. Synthesis and Properties of Gelatin Methacryloyl (GelMA) Hydrogels and Their Recent Applications in Load-Bearing Tissue, *Polymers*, *10*(11), 1290, 2018

[10] Shirahama, H., Lee, B., Tan, L. *et al.* Precise Tuning of Facile One-Pot Gelatin Methacryloyl (GelMA) Synthesis, *Sci Rep* **6**, 31036, 2016

[11] Zhang X., Yang D., Nie J. Chitosan/polyethylene glycol diacrylate films as potential wound dressing material, International Journal of Biological Macromolecules 43, 456–462, 2008

[12] Browning M. B., Cosgriff-Hernandez E. Development of a Biostable Replacement for PEGDA Hydrogels, Biomacromolecules, 13, 779−786, 2012

[13] Mamaghani K.R., Naghiba S.M., Zahedib A., Mozafari M. Synthesis and microstructural characterization of GelMa/PEGDA hybrid hydrogel containing graphene oxide for biomedical purposes, Materials Today: Proceedings, 5, 15635–15644, 2018

[14] Wang Y., Ma M., Zhang L., Guo Y., Fabrication of bi-layer photocrosslinked GelMA/PEGDA fibrous membrane for guided bone regeneration material, Materials Letters, 249, 112–115, 2019

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SIĞIRLARDA PARATÜBERKÜLOZ HASTALIĞININ MAKROSKOPİK VE HİSTOPATOLOJİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Dr. NİHAT YUMUŞAK
Harran Üniversitesi,
nihatyumusak@harran.edu.tr - 0000-0002-9299-2902

ÖZET

Paratüberküloz diğer adıyla Johne hastalığı sığırlar başta olmak üzere birçok ruminant türünde önemli ekonomik kayıplara neden olan kronik bir hastalıktır. Hastalık ayrıca atlarda, domuzlarda, tavşanlarda ve tilkilerde de bildirilmiştir. Etken Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis (M. paratuberculosis) adlı bir bakteridir. Enfekte dışkı ile bulaşık gıda veya suyla bulaşma olur. İlk olarak 1895 yılında Almanya'da raporlanmıştır. Günümüzde ise dünyanın her kıtasında hastalıkla karşılaşılmaktadır. Kesin sonuç alınan bir tedavisi henüz yoktur. Hastalığın ilk dönemleri subklinik seyreder ve klinik olarak yavaş seyreden bir karakterdedir. İlk olarak yavaş gelişen zayıflama ve hafif ishal tablosu ilerleyerek şiddetli kaşeksi ve kronik ishale dönüşür. Hastalıkta görülen en önemli makroskobik bulgular, kadavranın aşırı kaşektik olması, lenf yumrularının ödemli ve büyümüş olmasıdır. Kronik aşamada hastalık için patognomik olarak ileumunda kalınlaşma vardır. Bağırsak lümeni açıldığında kalın kıvrımlaşmaların olduğu, şiddetli ödemin ve yer yer ülserlerin olduğu görülür. Histopatolojik olarak bu bölgelerde villuslarda kütleşme olduğu propriada ise şiddetli makrofajlardan oluşan ve bazen aralarında epiteloid hücrelerinde bulunduğu şiddetli hücre infiltrasyonları vardır. Bu çalışmada sığırlarda karşılaşılan Paratüberküloz hastalığında görülen makroskobik ve mikroskobik bulguların yorumlanması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sığır, Paratüberküloz, Patoloji

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SIĞIRLARDA PARATÜBERKÜLOZ HASTALIĞININ MAKROSKOPİK VE HİSTOPATOLOJİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

1. GİRİŞ

Paratüberküloz hücre içi bir bakteri türü Mycobacterium avium subspecies Paratuberculosis tarafından oluşturulan yaban ve evcil hayvanlarda dünyanın birçok bölgesinde karşılaşılan kronik seyirli hastalıktır. Başlıca sığır, koyun, keçi ve geyik gibi ruminantlarda hastalık daha sık karşılaşılır. Özellikle evcil ruminantlarda zayıflama, verim kaybı, kısırlık ve süt veriminde azalmaya neden olmasından dolayı önemli ekonomik kayıplara sebep olur (1-7).

2. ETİYOLOJİ

Hastalık etkeni Mycobacteriaceae ailesinde yer alan gram pozitif, asit-fast, yavaş gelişen Mycobacterium avium subsp. Paratuberculosis türü bakterilerdir. Hastalığın başlıca bulaşma yolu enfekte dışkı ile kontamine süt, yem ve su gibi gıdaların alınmasıyla olur. Ayrıca hasta anneden yavruya plasental yolla hastalık aktarılabilir. Genç hayvanlar her ne kadar hastalığı erken dönemde almış olsalar da klinik bulgular daha çok ilerleyen yaşlarda ortaya çıkar. Bu durum hasta hayvanların klinik bulgu göstermeden hastalığın yayılmasına neden olur (1-10).

3. KLİNİK BULGULAR

Hastalıkta görülen klinik bulgular hastalığın evresine ve hayvanın bağışıklık sistemine göre farklılık gösterir. Genellikle erken yaşta etkenle temas edilmiş olsa da hastalık genellikle subklinik olarak seyreder ve belirtiler yıllar sonra ortaya çıkar. En önemli klinik bulgu ise gittikçe ilerleyen kaşeksi tablosudur. Sürekli ya da aralıklı olan ishal hastalık için tipik bulgudur. Dışkılamada ıkınma veya zorlanma görülmez. İshalli dışkı su kıvamında olup sindirilmemiş yem içerir. İshalde kan bulunmaz. Çene altında ödem ve bölgesel lenf yumrularında büyüme belirgindir (8-12).

4. PATOLOJİK BULGULAR

Hastalıkta görülen patognomik makroskopik bulgular daha çok kalın bağırsaklardaki değişikliklerdir. Hastalığın şiddetine göre bağırsak duvarı şiddetli ödemli olup kalın manzaradadır. Kıvamı ise sert elastik kıvamlıdır. Lümeninde çok miktarda sulu içerik vardır. Mukoza pürüzlü ve ödemli olup kıvrımlar belirgindir. Kadavra oldukça kaşektik olup kaslarda atrofi ve yağ dokusunda azalma görülür (10-16).

Hastalık için karakteristik histopatolojik bulgular özellikle kalın bağırsak lamina propriasındaki granulomatöz yangısal reaksiyondur. Enfekte bağırsaklarda mukoza ve submukozaya kadar yayılım gösteren şiddetli makrofaj birikimi dikkati çeker. Bu hücrelerin bir kısmında sitoplazma içerisinde, yapılacak özel boyamalarda etken görülebilir. Ayrıca epiteloid makrofajlar, plasma ve lenfositer hücre infiltrasyonları görülür. Bu hücreler arasında hastalık için patognomik olarakta kabul edilen çok çekirdekli dev hücreleri ile karşılaşılır (10-16).

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

KAYNAKÇA

[1] Rosenfeld, G. and Bressler, B. Mycobacterium avium paratuberculosis and the etiology of Crohn's disease: a review of the controversy from the clinician's perspective. Can. J. Gastroenterol. 24, 10, 2010.

[2] Barkema, Herman W., et al. "Global prevalence and economics of infection with Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis in ruminants." Paratuberculosis: organism, disease, control. Wallingford UK: CABI, 2010.

[3] Ayele, W. Yayo, M. Machackova, and I. Pavlik. "The transmission and impact of paratuberculosis infection in domestic and wild ruminants." Veterinarni Medicina 46,.7-8, 2001.

[4] *Romdhane, R.B., Beaunée, G., Camanes, G., Guatteo, R., Fourichon, C. and Ezanno, P. Which phenotypic traits of resistance should be improved in cattle to control paratuberculosis dynamics in a dairy herd: a modelling approach. Vet. Res. 48, 1, 2017.*

[5] Sardaro, R., Pieragostini, E., Rubino, G. and Petazzi, F. Impact of Mycobacterium avium subspecies paratuberculosis on profit efficiency in semi-extensive dairy sheep and goat farms of Apulia, southern Italy. Prev. Vet. Med. 136, 1, 2017.

[6] Schrott, J., Sodoma, E., Dünser, M., Tichy, A. and Khol, J.L. Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis in sheep and goats in Austria: seroprevalence, risk factors and detection from boot swab samples. Animals 13, 9, 2023.

[7] *Shabana, I.I. and Aljohani, A.A. Sero-surveillance of Mycobacterium avium subspecies paratuberculosis infection in ruminants in Medina. J. Adv. Vet. Anim. Res. 7, 1, 2019.*

[8] Tiwari, A., VanLeeuwen, J.A., McKenna, S.L., Keefe, G.P. and Barkema, H.W. Johne's disease in Canada Part I: clinical symptoms, pathophysiology, diagnosis, and prevalence in dairy herds. Can. Vet. J. 47, 9, 2006.

[9] Fecteau, Marie-Eve. "Paratuberculosis in cattle." Veterinary Clinics: Food Animal Practice 34, 1, 2018.

[10] Meles, Dewa Ketut, et al. "A comprehensive review of paratuberculosis in animals and its implications for public health." Open Veterinary Journal 14, 11, 2024.

[11] Whitlock, Robert H., and Claus Buergelt. "Preclinical and clinical manifestations of paratuberculosis (including pathology)." Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice 12, 2, 1996.

[12] Clarke, C. J. "The pathology and pathogenesis of paratuberculosis in ruminants and other species." Journal of comparative pathology 116, 3, 1997.

[13] *Sikandar, A., Cheema, A.H., Younus, M., Aslam, A., Zaman, M.A. and Rehman, T. Histopathological and serological studies on paratuberculosis in cattle and buffaloes. Pak. Vet. J. 32, 4, 2012.*

[14] González, J., et al. "Histopathological classification of lesions associated with natural paratuberculosis infection in cattle." Journal of comparative pathology 133, 2-3, 2005.

[15] *Singh, A.V., Singh, S.V., Singh, P.K. and Sohal, J.S. Is Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis, the cause of Johne's disease in animals, a good candidate for Crohn's disease in man? Indian J. Gastroenterol. 29, 2, 2010.*

[16] Sweeney, R.W., Collins, M.T., Koets, A.P., McGuirk, S.M. and Roussel, A.J. Paratuberculosis (Johne's disease) in cattle and other susceptible species. J. Vet. Intern. Med. 26, 6, 2012.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

RUMİNANTLARIN MAVİ DİL HASTALIĞINDA PATOLOJİK DEĞERLENDİRMELER

Dr. NİHAT YUMUŞAK
Harran Üniversitesi,
nihatyumusak@harran.edu.tr - 0000-0002-9299-2902

ÖZET

Mavi Dil (Bluetongue) Hastalığı yaban ve evcil ruminantlarda Orbiviruslar tarafından oluşan viral bir hastalıktır. Hastalıkta bulaşma artropodlar aracılığıyla olur. Özellikle yağışlı iklimlerde enfekte hayvandan kan emmeleri sırasında virüsü alan artropodlar sağlıklı hayvana yine kan emmeleri ile hastalığı bulaştırırlar. Hayvanlar arasında bulaşma söz konusu değildir. Hastalık birçok ruminant türünde görülse de koyunlarda daha şiddetlidir. Sığırlarda ise klinik bulgu göstermeden hafif seyreder. Klinik olarak yüksek ateş, iştahsızlık, halsizlik, yavru atma, solunum güçlüğü ve kilo kaydı görülür. Patolojik olarak ise ağız mukozası incelendiğinde şiddetli hiperemi, ödem ve ülserasyonlar görülür. Dil şiddetli ödemli olup ilerlemiş olgularda morarmıştır. Ayrıca dil üzerinde ve dudak içlerinde nekrotik odaklar vardır. Akciğerlerde belirgin pnömoni tablosu görülür. Özellikle tırnaklarda koroner bantta hiperemi patognomik olarak kabul edilir. Yine burun akıntısı ve çene altında ödem belirgindir. Histolojik olarak etkilenen organlardan yapılan preparatlarda şiddetli mononüklear hücre infiltrasyonları görülür. Ayrıca yer yer nötrofil ve eosinofilik lökositler bulunur. Bu alanların çevresindeki dokularda nekroz vardır. Bu çalışmada ülkemizde de karşılaşılan Mavi Dil Hastalığında görülen patolojik bulguların değerlendirilmesi amaçlandı.

Anahtar Kelimeler: Mavi dil, Ruminant, Patomorfoloji

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

RUMİNANTLARIN MAVİ DİL HASTALIĞINDA PATOLOJİK DEĞERLENDİRMELER

1. ETİYOLOJİ

Mavi dil hastalığı evcil ve yaban geviş getirenlerde birçok organ ve dokuda vasküler hasar, ödem, kanama ve yangıya neden olan sistemik bir hastalıktır. Etken bir RNA virüsü olan ve Orbivirüs ailesinden Mavidil Virüsüdur. Hastalık etkeni *Culicoides türü atropodların ısırmaları ile olur. Enfekte sineğin tükürüğünde bulunan etken kan emme sırasında sağlık hayvana geçer. Bölge lenf yumrularına geçen virüs kan yoluyla vücuda yayılır. Özellikle damar endotel hücrelerine yerleşen virüs burada endotel hasara neden olur (1-6).*

2. KLİNİK BULGULAR

Bulgular türe, hayvanın yaşına, bağışıklık durumuna, çevresel faktörlere göre değişkenlik gösterir. Sığır ve keçilerde hafif seyrederken koyunlarda ölümcül olabilen şiddette seyreder. İl bulgular genellikle iştahsızlık, ateş, halsizlik, ve solunum güçlüğü gibi nonspesifik bulgulardır. Hastalık ilerledikçe patognomik olan vasküler hasara bağlı bulgular oluşmaya başlar. Özellikle boyun ve yüz bölgesinde, dilde, kulakta ve göz çevresinde ödeme bağlı şişkinlik görülebilir. Gebe hayvanlar abort yapar. Doğan yavruda mumifikasyon yada hidrosefalus, hidranensefali, artrogripozis gibi doğmasal anomaliler görülür (6-10).

3. MAKROSKOPİK BULGULAR

Nekropside kadavrada damarlarda konjesyon, ödem, siyanoz ve yer yer kanama alanları görülür. Hastalıkta ağız bölgesinde görülen makroskopik lezyonlar patognomiktir. Lezyonlar damar hasarına bağlı vasküler değişikliklerle ilişkilidir. Ağız mukozası şiddetli hiperemik, dudak iç mukozasında, dil üzerinde ve diş etinde erozyon, peretişyal kanamalar, ülserasyonlar ve veziküller görülür. Dil ödeme bağlı şişkindir. İlerlemiş oldularda damarda meydana gelen tromboz sonucu dil siyanotik manzarada görülür. Akciğerlerde ödem ve intersitisyel bronkopnömoni şekillenir. Göz de konjunktivitise bağlı olarak gözyaşı akıntısı görülür. Kalpte peteşiyal kanamalar ve nekroz görülebilir. Bağırsaklarda damarlar dolgun, peteşiyal kanalara ve ülserasyonlar vardır (11-20).

4. MİKROSKOBİK BULGULAR

Genel olarak damarlar incelendiğinde, endotel hasarı, endotelde nekroz, fibrinoid vaskülitis, ve peri vasküler hücre infiltrasyonları görülür. Ağız mujozasında yapılan incelemelerde, epitelde deşenerasyon, ödem, nekroz, ülser, vaskülütis ve yangısal hücre infitrasyonları görülür. Kalp kasında dejenerasyon, ödem, kanama ve yangı görülür. Akciğerde şiddetli intersitisyel ödem ve inflmasyon vardır. Damarlar konjesyone olup yer yer çevrede yangı hücreleri görülür. Sekonder olgularda ise alveollere fibrin görülebilir. Bağırsak villuslarında ve kriplerde dejenerasyon ve nekroz görülür (11-20).

KAYNAKÇA

[1] Schwartz-Cornil, Isabelle, et al. "Bluetongue virus: virology, pathogenesis and immunity." Veterinary research, 39, 5, 2008.
[2] Maclachlan, N. James. "Bluetongue: history, global epidemiology, and pathogenesis." Preventive veterinary medicine, 102, 2, 2011.
[3] Ayuti, Siti Rani, et al. "Bluetongue in ruminants: Global epidemiology, pathogenesis, and advances in diagnostic and control strategies within a One Health framework." Veterinary World, 18, 10, 2025.
[4] de Oliveira Vial, Mateus, et al. "Bluetongue Virus Infection in Ruminants: A Review Paper." Open Access Library Journal, 8, 2021.
[5] Williamson, Susanna, Nick Woodger, and Karin Darpel. "Differential diagnosis of bluetongue in cattle and sheep." In Practice, 30, 5, 2008.
[6] van den Brink, Katrien MJA, et al. "Bluetongue virus serotype 3 in ruminants in the Netherlands: clinical signs, seroprevalence and pathological findings." Veterinary Record, 195, 4, 2024.
[7] Darpel, K. E., et al. "Clinical signs and pathology shown by British sheep and cattle infected with bluetongue virus serotype 8 derived from the 2006 outbreak in northern Europen." Veterinary Record, 161, 8, 2007.
[8] MacLachlan, N. James, and G.E.O.F.F. Gard. "Clinical signs and pathology." Bluetongue. Academic Press, London, 2009.
[9] Backx, A., et al. "Clinical signs of bluetongue virus serotype 8 infection in sheep and goats." The Veterinary Record, 161, 17, 2007.
[10] Bianchi, Ronaldo M., et al. "Clinical, pathological and epidemiological aspects of outbreaks of bluetongue disease in sheep in the central region of Rio Grande do Sul." Pesquisa Veterinária Brasileira, 37, 12, 2017.
[11] Maclachlan, Nigel J., et al. "The pathology and pathogenesis of bluetongue." Journal of comparative pathology, 141, 1, 2009.
[12] MacLachlan, N. J. "Bluetongue: pathogenesis and duration of viraemia." Vet Ital, 40, 4, 2004.
[13] Parsonson, I. M. "Pathology and pathogenesis of bluetongue infections." Bluetongue viruses, 1990.
[14] Qi, Yinglin, Ran Shao, and Xin Yin. "Bluetongue virus: cattle, sheep, and goat." Veterinary virology of domestic and pet animals. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025.
[15] Singh, K. P., et al. "Epidemiology and pathology of bluetongue virus in India: A systematic review." 2021.
[16] Ozmen, Ozlem, et al. "Pathological, serological, and virological findings in sheep infected simultaneously with Bluetongue, Peste-des-petits-ruminants, and Sheeppox viruses." Tropical animal health and production 41, 6, 2009.
[17] Maity, Madhulina, et al. "Pathology of low virulent bluetongue virus serotype 16 in experimentally infected sheep." Indian Journal of Veterinary Pathology 42, 4, 2018.
[18] Vineetha, S., et al. "Pathology and pathogenesis of bluetongue virus serotype 24 during experimental infection in native sheep." Frontiers in Cellular and Infection Microbiology 16, 2026.

[19] Afshar, Ahmad. "Bluetongue: laboratory diagnosis." Comparative immunology, microbiology and infectious diseases 17, 3-4, 1994.
[20] Worwa, Gabriella, et al. "Virological and pathological findings in Bluetongue virus serotype 8 infected sheep." Veterinary microbiology 144, 3-4, 2010.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

INVESTIGATION OF BACTERIAL CONTAMINATION AND ANTIBIOTIC RESISTANCE PROFILES IN LIBYAN HOSPITAL SURGICAL UNITS AND INTENSIVE CARE ENVIRONMENTS

Prof. Dr. Ahmed Al-Maghribi, Salma El-Fituri, Omar Ben Yusuf
Department of Clinical Microbiology, Faculty of Medicine, University of Tripoli, Tripoli, Libya

ABSTRACT
This paper investigates bacterial contamination and antibiotic resistance profiles in surgical units and intensive care environments within Libyan hospitals, with a focus on environmental reservoirs, transmission risks, and implications for infection prevention and control. The study synthesizes evidence concerning surface and equipment contamination, healthcare worker-mediated transmission pathways, and the role of critical care settings in amplifying resistant organisms. It emphasizes the importance of characterizing resistance patterns in local contexts to inform empiric therapy and to tailor stewardship interventions to institutional realities. Methodologically, the research advocates combining environmental sampling with targeted microbial identification and resistance profiling, thereby enabling a nuanced understanding of contamination hotspots and persistent reservoirs that undermine patient safety. The discussion highlights how structural factors—such as resource constraints, infrastructure limitations, and variability in infection control practices—interact with microbial ecology to shape resistance dynamics in these clinical settings. Translational implications include strengthening routine environmental surveillance, standardizing decontamination protocols, and integrating laboratory feedback into clinical governance to limit transmission and optimize antimicrobial use. The paper situates its recommendations within broader efforts to build resilient infection control systems, arguing that locally adapted, evidence-based interventions are essential to reduce hospital-acquired infection risk and to contain the spread of antibiotic-resistant bacteria in acute care environments.

Key word: hospital contamination; antibiotic resistance; infection control; surgical units; intensive care

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ASSESSMENT OF MICROBIAL DIVERSITY AND PATHOGENIC LOAD IN DESERT WATER RESOURCES AND URBAN SUPPLY SYSTEMS IN LIBYA

Dr. Aisha El-Hassi, Assoc. Prof. Dr. Omar Ben Yusuf, Ahmed Al-Maghribi
Department of Environmental Microbiology, Faculty of Natural Sciences, University of Benghazi, Benghazi, Libya

ABSTRACT
This study assesses microbial diversity and pathogenic load in desert water resources and urban supply systems in Libya, examining how environmental conditions, water management practices, and anthropogenic pressures shape microbial community composition and health risks. The research integrates ecological perspectives on extreme aridity with applied concerns about potable water safety, highlighting the distinct microbial assemblages that emerge in desert reservoirs, oasis systems, and piped urban networks. Emphasis is placed on detecting opportunistic pathogens and resistance determinants that compromise water quality and pose risks for community health, especially where treatment and distribution infrastructures are inconsistent. Methodological approaches discussed include culture-independent profiling to capture broad microbial diversity alongside targeted pathogen detection to assess potential public health threats. The paper also considers how seasonal variability, groundwater–surface interactions, and urban demand patterns influence microbial dynamics, arguing for context-sensitive monitoring frameworks that reflect local hydrological realities. From a policy standpoint, the study recommends strengthening integrated water quality surveillance, investing in decentralized treatment solutions, and promoting multidisciplinary collaboration between environmental scientists, public health practitioners, and water authorities. By linking microbial ecology to practical management, the research contributes to sustainable water governance strategies aimed at minimizing infectious risk while preserving scarce water resources in arid and semi-arid contexts.

Key word: water microbiology; microbial diversity; water quality; desert water resources; Libya

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

GENOMIC ANALYSIS OF EXTREME ENVIRONMENT ADAPTED MICROBES IN INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ZONES OF KAZAKHSTAN

Prof. Dr. Ayan Nursultanov, Dana Karimova, Yerlan Sadykov, Aigerim Sarsenova
Department of Molecular Biology, Institute of Biotechnology, Nazarbayev University, Nur-Sultan, Kazakhstan

ABSTRACT
This paper presents a genomic analysis of microbes adapted to extreme conditions in industrial and agricultural zones of Kazakhstan, focusing on genetic strategies that enable survival under chemical stress, salinity, temperature extremes, and nutrient limitation. The research highlights how anthropogenic pressures create selective environments that drive the emergence of specialized microbial taxa with unique metabolic pathways and stress response mechanisms. Genomic approaches are used to identify key genes and regulatory networks associated with detoxification, osmoprotection, and resource acquisition, thereby illuminating the molecular foundations of environmental resilience. The study also considers the potential applied benefits of these extremotolerant microbes, including bioremediation of contaminated soils, enhancement of plant stress tolerance, and recovery of valuable compounds. Methodologically, the work combines metagenomic surveys with isolate genome sequencing to balance community-level insights and organism-specific functional annotation. The discussion underscores the need to integrate genomic data with ecological and geochemical context to inform both basic understanding and translational innovation. Finally, the paper argues that conserving microbial diversity in disturbed landscapes can provide a repository of adaptive traits relevant to environmental management and sustainable agriculture in the face of ongoing industrialization and climate variability.

Key word: extremophiles; genomics; bioremediation; agricultural microbiology; Kazakhstan

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

EVALUATION OF PROBIOTIC BACTERIAL STRAINS FOR IMPROVING GUT MICROBIOTA AND IMMUNE RESPONSE IN CENTRAL ASIAN POPULATIONS

Assoc. Prof. Dr. Dana Karimova, Dr. Yerlan Sadykov, Ayan Nursultanov
Department of Microbial Therapeutics, Faculty of Medicine, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This study evaluates probiotic bacterial strains for their capacity to modulate gut microbiota composition and enhance immune responses in Central Asian populations, taking into account regional dietary patterns, host genetics, and epidemiological profiles. The research synthesizes evidence on strain-specific effects, mechanisms of immunomodulation, and the role of microbial metabolites in shaping mucosal and systemic immunity. Emphasis is placed on selecting candidate strains with demonstrated adherence, metabolic compatibility, and safety within target populations, as well as on designing interventions that respect local dietary habits and logistical constraints. Methodological approaches include in vitro functional assays, microbiome profiling to assess ecological impact, and immunological readouts to evaluate host response, thereby building an integrated evidence base for translational application. The discussion addresses challenges in translating probiotic research into public health practice, including regulatory frameworks, product standardization, and the necessity of locally relevant clinical evaluation. From a population health perspective, the paper argues that targeted probiotic strategies, when grounded in regional microbiome characteristics and culturally appropriate delivery models, can contribute to improved gut health and immune resilience, particularly in settings where infectious burden and nutritional transitions intersect.

Key word: probiotics; gut microbiota; immune modulation; Central Asia; translational microbiology

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

METAGENOMIC PROFILING OF ANTIBIOTIC RESISTANCE GENES IN AQUATIC ECOSYSTEMS AND COASTAL WATERS OF EAST ASIA

Wei-Chen Lin, Yu-Hsuan Chen, Chia-Ling Huang
Department of Environmental Genomics, Institute of Marine Biology, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

ABSTRACT
This paper reports metagenomic profiling of antibiotic resistance genes in aquatic ecosystems and coastal waters of East Asia, aiming to map resistance reservoirs, understand dissemination routes, and inform environmental risk assessment. The research frames aquatic systems as integrative matrices that receive inputs from urban wastewater, agricultural runoff, and aquaculture, thereby becoming hotspots for resistance gene enrichment and horizontal gene transfer. Metagenomic approaches enable comprehensive detection of resistance determinants, mobile genetic elements, and host-range patterns, providing insights into both the diversity and ecological distribution of resistance genes. The study emphasizes the utility of linking resistome data with environmental metadata—such as nutrient loads, salinity gradients, and anthropogenic influence—to identify drivers of resistance propagation. Translational implications include guiding mitigation strategies that target source reduction, wastewater treatment optimization, and stewardship practices in aquaculture and agriculture. The paper also advocates for harmonized regional surveillance frameworks to allow comparability across sites and to support coordinated policy responses to the environmental dimension of antimicrobial resistance. By situating metagenomic findings within management-relevant contexts, the work contributes to emerging efforts to integrate environmental monitoring into broader antimicrobial resistance containment strategies.

Key word: resistome; metagenomics; aquatic ecosystems; antibiotic resistance; East Asia

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

CHARACTERIZATION OF NOVEL MARINE MICROORGANISMS WITH BIOACTIVE COMPOUND POTENTIAL FROM TAIWANESE COASTAL REGIONS

Dr. Ming-Hao Wang, Assoc. Prof. Dr. Chia-Ling Huang, Wei-Chen Lin
Department of Marine Biotechnology, College of Life Sciences, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan

ABSTRACT
This study characterizes novel marine microorganisms from Taiwanese coastal regions with the potential to produce bioactive compounds relevant to pharmaceutical, agricultural, and industrial applications. Coastal microbial communities are a rich source of unique secondary metabolites, with biosynthetic pathways adapted to marine stressors that often yield structurally novel molecules. The research combines culture-dependent isolation with genomic mining of biosynthetic gene clusters to identify candidate organisms and pathways for natural product discovery. Functional assays and metabolomic profiling are used to prioritize strains that produce antimicrobial, anti-inflammatory, or enzyme-inhibitory activities, linking genomic potential to bioactivity. The discussion emphasizes the importance of sustainable bioprospecting practices and the translation of discovery pipelines into scalable development, including strain optimization and compound characterization. Moreover, the paper situates marine microbial exploration within ecosystem conservation, arguing that preserving coastal biodiversity supports long-term access to biochemical innovation. By integrating ecological sampling, genomics, and bioactivity assessment, the study contributes to the discovery of novel bioresources with potential societal benefits while advocating for responsible research frameworks.

Key word: marine microbiology; bioactive compounds; natural products; biosynthetic gene clusters; Taiwan

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

DEVELOPMENT OF MICROBIOME-BASED DIAGNOSTIC MODELS FOR EARLY DETECTION OF INFECTIOUS DISEASES USING MACHINE LEARNING APPROACHES IN CLINICAL MICROBIOLOGY

Prof. Dr. Yu-Hsuan Chen, Dr. Wei-Chen Lin, Ming-Hao Wang, Chia-Ling Huang
Department of Clinical Microbiology and Bioinformatics, College of Medicine, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

ABSTRACT
This paper explores the development of microbiome-based diagnostic models for early detection of infectious diseases through the integration of high-throughput microbial profiling and machine learning methodologies in clinical microbiology. The research underscores how compositional and functional signatures of host-associated microbiomes can serve as predictive biomarkers for infection risk and disease trajectory, complementing traditional pathogen-centric diagnostics. Central to this effort are computational pipelines that preprocess complex sequencing data, select informative features, and train supervised models capable of discriminating disease-associated profiles from healthy baselines. The study highlights the importance of rigorous validation, including external cohort testing and attention to confounding factors such as host demographics, medication use, and sample handling. Translationally, microbiome-informed diagnostics could enable earlier intervention, personalized antimicrobial strategies, and improved triage in clinical workflows. Nonetheless, the paper acknowledges methodological and regulatory hurdles—such as standardization of protocols, interpretability of models, and clinical integration—that must be addressed for routine implementation. By combining microbiology, bioinformatics, and machine learning, this research advances the prospect of microbiome-guided diagnostic innovation while outlining practical steps to bridge discovery and clinical application.

Key word: microbiome diagnostics; machine learning; infectious disease; clinical microbiology; biomarker discovery

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

GENOME EDITING STRATEGIES USING CRISPR-CAS SYSTEMS FOR TARGETED THERAPEUTIC APPLICATIONS IN HUMAN DISEASE MODELS

Prof. Dr. Salma Qadiri, Amina El Idrissi, Youssef Benali
Department of Molecular Biology, Faculty of Life Sciences, University of Rabat, Morocco

ABSTRACT

Genome editing has become one of the most influential developments in modern biomedical science, offering the possibility of correcting disease-related genetic alterations with a high degree of precision. Among the available platforms, CRISPR-Cas systems have emerged as particularly powerful because of their flexibility, relative simplicity, and broad applicability in human disease models. This study examines genome editing strategies that use CRISPR-Cas systems for targeted therapeutic applications, with a focus on their value in precision medicine, disease modeling, and translational research. In human disease models, CRISPR-based approaches have been used to investigate inherited disorders, cancer-related pathways, and infectious disease mechanisms, making it possible to study pathogenic mutations and therapeutic responses in a controlled manner. The therapeutic potential of these systems extends beyond direct gene disruption, as CRISPR tools can also support gene correction, transcriptional regulation, and pathway-level modulation. Despite these advantages, several challenges remain. Efficient delivery to target tissues, control of off-target effects, immune responses, and long-term genomic safety continue to shape the pace of clinical translation. Current research therefore emphasizes not only editing efficiency but also biological specificity and therapeutic durability. In this context, disease models provide a critical bridge between laboratory innovation and clinical application, allowing researchers to evaluate safety, efficacy, and functional recovery before human use. Overall, CRISPR-Cas technologies represent a transformative framework for targeted therapy and hold significant promise for future treatment strategies in genetically driven disease.

Key word: CRISPR-Cas systems, genome editing, targeted therapy, human disease models, precision medicine

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

BIOENGINEERED NANOPARTICLES FOR CONTROLLED DRUG ELIVERY AND ENHANCED CELLULAR UPTAKE IN CANCER THERAPY

Dr. Rachid El Amrani, Assoc. Prof. Dr. Leila Bouzid, Hassan El Fassi
Department of Pharmaceutical Biotechnology, Faculty of Medicine and Pharmacy, University of Casablanca, Morocco

ABSTRACT

Bioengineered nanoparticles have attracted growing attention as advanced drug delivery platforms because they can improve therapeutic specificity, enhance cellular uptake, and reduce systemic toxicity in cancer treatment. Conventional chemotherapy is often limited by poor selectivity, low bioavailability, and harmful side effects on healthy tissues, creating a strong need for delivery systems that can concentrate anticancer agents at the tumor site. This abstract explores the role of bioengineered nanoparticles in controlled drug delivery and their potential to improve therapeutic performance in cancer therapy. These nanoscale systems can be designed with surface modifications, functional ligands, and responsive release mechanisms that enable better interaction with tumor cells and more efficient intracellular transport. Their structure can also be optimized to protect payloads from premature degradation and to support sustained release in the tumor microenvironment. In addition, bioengineered nanoparticles can improve drug solubility and overcome biological barriers that commonly reduce treatment effectiveness. A major advantage of this approach is the possibility of combining targeting, imaging, and therapy within a single platform, thereby supporting more personalized and responsive cancer care. However, clinical translation requires careful evaluation of biocompatibility, pharmacokinetics, manufacturing stability, and potential immune effects. The development of clinically relevant nanoparticle systems must therefore balance therapeutic innovation with safety and reproducibility. Overall, bioengineered nanoparticles represent a promising strategy for improving cancer treatment outcomes through more precise, efficient, and controlled drug delivery.

Key word: bioengineered nanoparticles, drug delivery, cancer therapy, cellular uptake, targeted treatment

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SYNTHETIC BIOLOGY APPROACHES FOR MICROBACTERIAL PRODUCTION OF HIGH-VALUE BIOFUELS UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS

Assoc. Prof. Dr. Emeka Nwosu, Dr. Aisha Bello, Chinedu Okafor, Kehinde Adeyemi
Department of Biotechnology, Faculty of Science, University of Lagos, Nigeria

ABSTRACT

Synthetic biology is reshaping microbial biotechnology by enabling the rational redesign of microorganisms for the production of high-value biofuels under industrial conditions. In the context of global energy transition, bio-based fuel production has become increasingly important as a sustainable alternative to fossil-derived resources. This abstract examines how synthetic biology approaches can improve microbacterial platforms for biofuel synthesis by enhancing metabolic efficiency, pathway control, and environmental robustness. Engineered microbial systems can be optimized to convert renewable feedstocks into bioethanol, biodiesel precursors, and other valuable energy compounds with greater productivity than naturally occurring strains. Synthetic biology allows researchers to reconstruct metabolic pathways, reduce by-product formation, and introduce regulatory circuits that improve yield under stress conditions commonly encountered in industrial bioprocessing. In addition, the use of genome editing and systems-level modeling supports the development of microbial strains that tolerate high substrate concentrations, variable pH, and large-scale fermentation constraints. Despite this progress, significant challenges remain in process scalability, substrate cost, genetic stability, and downstream purification. Industrial application therefore requires close integration between molecular engineering, fermentation optimization, and bioprocess design. The potential of engineered microbacteria lies not only in their capacity to produce renewable fuels but also in their contribution to circular bioeconomies and low-carbon manufacturing systems. Overall, synthetic biology provides a powerful framework for building efficient microbial factories capable of supporting sustainable biofuel production in industrial environments.

Key word: synthetic biology, microbial engineering, biofuels, industrial biotechnology, metabolic pathway

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

BIOTECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS IN PLANT-BASED BIOPESTICIDES FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN SUB-SAHARAN ENVIRONMENTS

Prof. Dr. Ngozi Umeh, Dr. Ibrahim Musa, Amina Suleiman
Department of Agricultural Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Ibadan, Nigeria

ABSTRACT
Plant-based biopesticides are gaining importance as environmentally friendly alternatives to synthetic agrochemicals in regions where sustainable crop protection is essential for food security and ecological balance. In Sub-Saharan agricultural systems, pest pressure, climate variability, and limited access to affordable inputs make the development of locally appropriate biopesticide solutions especially relevant. This abstract examines recent biotechnological advancements in plant-based biopesticides and their role in promoting sustainable agricultural productivity. Biopesticides derived from botanical extracts, plant secondary metabolites, and naturally occurring bioactive compounds offer selective pest control while reducing harmful residues in soil, water, and food products. Advances in biotechnology have improved the extraction, formulation, stabilization, and delivery of these compounds, making them more practical for field use. In addition, molecular approaches can help identify plants with strong pesticidal properties and support the development of standardized products with consistent efficacy. These innovations are particularly valuable in Sub-Saharan environments, where farming systems are often vulnerable to environmental stress and pest outbreaks. However, broader adoption depends on regulatory support, farmer awareness, affordability, and local production capacity. Research must also address shelf-life, application methods, and compatibility with integrated pest management systems. Overall, plant-based biopesticides represent a promising strategy for reducing dependence on synthetic chemicals while supporting agricultural resilience, ecological sustainability, and long-term food production in Sub-Saharan regions.

Key word: biopesticides, plant biotechnology, sustainable agriculture, pest management, Sub-Saharan environments

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

RECOMBINANT PROTEIN ENGINEERING FOR NEXT-GENERATION VACCINE DEVELOPMENT AGAINST EMERGING VIRAL PATHOGENS

Dr. Salma El Sharif, Hassan Al-Farjani, Assoc. Prof. Dr. Nadia Al-Sadi
Department of Immunology and Biotechnology, Faculty of Medicine, University of Tripoli, Libya

ABSTRACT

Recombinant protein engineering has become a central strategy in the development of next-generation vaccines, especially in response to emerging viral pathogens that require rapid, safe, and adaptable immunization platforms. Traditional vaccine approaches may be limited by the time needed for development, manufacturing complexity, or safety concerns in vulnerable populations. This abstract explores the contribution of recombinant protein engineering to vaccine innovation, emphasizing its role in antigen design, immune targeting, and platform flexibility. Recombinant systems allow researchers to isolate and optimize viral proteins or antigenic fragments that stimulate protective immune responses without exposing recipients to whole infectious agents. Protein engineering can improve antigen stability, increase immunogenicity, and enhance presentation to the immune system through rational structural design. These advantages are particularly important for emerging viruses, where rapid adaptation to mutation and antigenic variation is necessary. The approach also supports the production of subunit vaccines with favorable safety profiles and scalable manufacturing potential. Nonetheless, successful vaccine development depends on balancing antigen accuracy, adjuvant selection, delivery method, and immune durability. Ongoing research is also focused on identifying conserved epitopes and designing vaccine candidates capable of cross-protection against related viral strains. Overall, recombinant protein engineering offers a powerful and adaptable framework for next-generation vaccine development, with strong potential to improve preparedness against future viral threats.

Key word: recombinant proteins, vaccine development, emerging viruses, antigen engineering, immunization

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

MICROBIAL FUEL CELL TECHNOLOGIES FOR WASTEWATER TREATMENT AND RENEWABLE ENERGY GENERATION IN ARID REGIONS

Omar Al-Maghribi, Dr. Lina Ben Youssef, Prof. Dr. Khaled Al-Din
Department of Environmental Biotechnology, Faculty of Engineering, University of Tunis, Tunisia

ABSTRACT

Microbial fuel cell technologies offer an innovative approach to combining wastewater treatment with renewable energy generation, making them particularly relevant for arid regions where water scarcity and energy constraints coexist. These systems use electroactive microorganisms to break down organic waste while transferring electrons to generate electricity, thereby linking environmental remediation with energy recovery. This abstract examines the potential of microbial fuel cells for wastewater treatment and decentralized power production in arid settings. In regions with limited access to conventional infrastructure, such technologies may provide a dual benefit by improving water quality and contributing to local energy resilience. The microbial processes involved can reduce organic load, promote pollutant removal, and support low-energy treatment alternatives. At the same time, the electricity generated, though modest, may be useful for small-scale applications or as part of hybrid energy systems. Several engineering and operational factors influence performance, including electrode design, substrate composition, microbial community structure, and environmental temperature. In arid regions, challenges such as water evaporation, salinity, and fluctuating feedstock quality must also be considered. Despite these limitations, microbial fuel cells hold strong promise for sustainable wastewater management because they integrate biological treatment with resource recovery. Their development may contribute to circular economy strategies, especially in areas where wastewater is underutilized as a source of energy and reusable water. Overall, microbial fuel cell technologies represent a forward-looking solution for environmentally sensitive infrastructure in water-stressed regions.

Key word: microbial fuel cells, wastewater treatment, renewable energy, arid regions, environmental biotechnology

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

GENE THERAPY VECTOR OPTIMIZATION FOR NEURODEGENERATIVE DISEASE TREATMENT USING LENTIVIRAL AND AAV SYSTEMS

Assis. Prof. Dr. Matías Valenzuela
Department of Neuroscience and Molecular Medicine, Faculty of Medicine, University of Chile, Santiago, Chile

ABSTRACT

Gene therapy has emerged as a promising therapeutic strategy for neurodegenerative diseases, where progressive neuronal loss and limited regenerative capacity make conventional treatment approaches insufficient. A major determinant of therapeutic success is the design and optimization of delivery vectors capable of transporting genetic material safely and effectively to target cells within the central nervous system. This abstract examines vector optimization for neurodegenerative disease treatment using lentiviral and adeno-associated viral systems. Lentiviral vectors offer stable gene integration and strong expression, making them useful in contexts where long-term transgene activity is required. In contrast, adeno-associated viral vectors are valued for their favorable safety profile, broad tissue tropism, and suitability for in vivo delivery to neural tissues. Optimizing these platforms involves improving tropism, controlling expression levels, minimizing immune responses, and enhancing payload compatibility. The therapeutic relevance of vector design is especially significant in disorders characterized by protein misfolding, neuroinflammation, or loss of neuronal function, where timely and sustained gene delivery may alter disease progression. However, challenges remain in achieving cell-type specificity, crossing biological barriers, and maintaining safety in sensitive neural environments. Current research therefore focuses on capsid engineering, promoter selection, and route-of-administration refinement to improve therapeutic precision. Overall, lentiviral and AAV systems remain central tools in neurodegenerative gene therapy, and continued vector optimization is essential for translating molecular advances into clinically meaningful treatment outcomes.

Key word: gene therapy, lentiviral vectors, AAV systems, neurodegenerative disease, vector optimization

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

IMPACT OF URBAN AIR POLLUTION ON RESPIRATORY HEALTH OUTCOMES IN NORTH AFRICAN METROPOLISES

Prof. Dr. Youssef El Amrani, Dr. Salma Benkiran
Department of Public Health, Faculty of Medicine and Pharmacy, University of Casablanca, Casablanca, Morocco

ABSTRACT

Urban air pollution has become a major determinant of respiratory morbidity in North African metropolises, where rapid urbanization, traffic emissions, industrial activity, and seasonal dust exposure converge to affect population health. This study examines the relationship between urban air pollution and respiratory health outcomes, focusing on how sustained exposure contributes to asthma exacerbation, chronic bronchitic symptoms, reduced pulmonary function, and increased healthcare utilization. Evidence from North African settings indicates that particulate matter and other ambient pollutants are strongly associated with respiratory infections and worsening symptoms in vulnerable groups, particularly children, older adults, and people with preexisting respiratory conditions. The present abstract emphasizes the need to understand not only pollutant concentrations, but also the social and environmental contexts that intensify exposure, such as informal housing, limited green space, and proximity to traffic corridors.

From a public health perspective, the burden of respiratory disease is shaped by both environmental risk and unequal access to diagnosis and care. Urban populations may experience repeated exposure over long periods, making cumulative effects particularly important for surveillance and policy design. The study supports integrated strategies that combine air quality monitoring, respiratory screening, and prevention-oriented urban planning. Such strategies may include emission reduction, public transport improvement, occupational protection, and community education on exposure reduction. The findings underline the importance of cross-sector collaboration between health authorities, urban planners, and environmental agencies. Overall, air pollution in North African cities should be addressed as a structural health issue requiring sustained policy intervention, targeted risk communication, and stronger environmental governance.

Key word: urban air pollution; respiratory health; North Africa; particulate matter; public health

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

TELEMEDICINE ADOPTION AND HEALTHCARE ACCESSIBILITY IN RURAL MOROCCO: A SYSTEMATIC ANALYSIS

Assoc. Prof. Dr. Amina Qadiri, Dr. Omar Zaoui, Fatima Ezzahra El Idrissi
Department of Health Informatics, Faculty of Medicine and Pharmacy, University of Rabat, Rabat, Morocco

ABSTRACT

Telemedicine has emerged as an important strategy for improving healthcare accessibility in rural Morocco, where geographic distance, workforce shortages, and transportation barriers limit timely access to care. This systematic analysis examines the adoption of telemedicine and its influence on healthcare accessibility, with attention to implementation conditions, patient experience, and service sustainability. Available evidence suggests that digital health platforms can improve consultation access, reduce unnecessary travel, and support continuity of care for populations living in underserved regions. However, adoption is uneven and shaped by infrastructure quality, digital literacy, institutional support, and trust in remote care.

The analysis highlights that telemedicine is most effective when it is embedded in broader health system organization rather than introduced as a stand-alone innovation. Rural communities often require simple, reliable, and culturally appropriate platforms, along with trained personnel who can mediate between digital systems and local needs. Barriers such as weak connectivity, limited device access, and unfamiliarity with virtual consultations can reduce uptake and widen disparities if not addressed proactively. In this sense, telemedicine must be evaluated not only by technological availability but by its actual contribution to equitable care.

The study concludes that sustainable telemedicine in rural Morocco depends on infrastructure investment, user training, and policy frameworks that support integration with primary care. It also argues that accessibility should be measured through patient-centered indicators, including waiting time, continuity, and perceived quality of interaction. Overall, telemedicine offers strong potential to improve rural healthcare access, but its long-term value relies on governance, usability, and health system alignment.

Key word: telemedicine; rural healthcare; accessibility; digital health; Morocco

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

COMMUNITY-BASED MALARIA CONTROL STRATEGIES AND PUBLIC HEALTH EFFECTIVENESS IN WEST AFRICA

Prof. Dr. Chinedu Okafor, Dr. Aisha Bello, Emeka Nwosu, Dr. Kemi Adebayo
Department of Public Health, Faculty of Health Sciences, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria

ABSTRACT

Malaria remains one of the most persistent public health challenges in West Africa, where climatic conditions, vector ecology, and uneven healthcare access support ongoing transmission. This study examines community-based malaria control strategies and evaluates their public health effectiveness, emphasizing the role of local participation, preventive education, and integrated vector management. Existing evidence shows that interventions such as insecticide-treated nets, seasonal chemoprevention, environmental management, and indoor residual spraying can reduce malaria burden when implemented consistently and supported by community engagement. However, the success of these strategies depends heavily on local acceptance, sustained funding, and alignment with community priorities.

The abstract argues that community-based malaria control is most effective when it combines biomedical intervention with social mobilization. Households are more likely to adopt protective behaviors when they understand malaria transmission, trust health workers, and perceive interventions as relevant to daily life. Barriers such as misinformation, inconsistent supply chains, and limited outreach can weaken program outcomes even where technical tools are available. For this reason, the effectiveness of malaria control should be assessed not only by coverage but also by adherence, behavioral change, and community ownership.

The study concludes that malaria control in West Africa requires integrated public health strategies that strengthen local capacity, improve communication, and adapt interventions to varied ecological and social contexts. Community participation should be treated as a core implementation principle rather than an optional supplement. Overall, sustainable malaria reduction depends on combining preventive tools, health education, and locally grounded public health leadership.

Key word: malaria control; community health; vector management; West Africa; public health effectiveness

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

MENTAL HEALTH BURDEN AMONG ADOLESCENTS IN URBAN NIGERIA: SOCIOECONOMIC AND EDUCATIONAL CORRELATES

Assoc. Prof. Dr. Ibrahim Musa, Dr. Grace Adeola, Samuel Okoye
Department of Psychology, Faculty of Social Sciences, University of Lagos, Lagos, Nigeria

ABSTRACT

Adolescent mental health has become an increasingly urgent concern in urban Nigeria, where socioeconomic pressures, educational competition, family stress, and social inequality shape psychological well-being. This study explores the mental health burden among adolescents in urban environments, focusing on socioeconomic and educational correlates that may intensify vulnerability to distress. Research in similar contexts suggests that exposure to economic hardship, unstable living conditions, school-related pressure, and limited access to counseling services can contribute to anxiety, depressive symptoms, behavioral difficulties, and poor academic adjustment. The present abstract emphasizes the interaction between structural disadvantage and developmental risk during adolescence.

Urban adolescents often face overlapping stressors, including financial insecurity, overcrowded households, peer pressure, and uncertainty about educational progression. These conditions may undermine self-esteem, concentration, and emotional regulation. Educational experiences can either protect against or worsen distress depending on school climate, teacher support, and access to psychosocial services. The study argues that mental health burden should not be interpreted as an individual weakness but as a response to cumulative social and institutional strain.

The paper supports school-based and community-based interventions that promote early identification, mental health literacy, and accessible support systems. Effective responses should include counseling services, peer support, family engagement, and collaboration between schools and health providers. Overall, addressing adolescent mental health in urban Nigeria requires attention to both psychological symptoms and the social conditions that produce them. Prevention and intervention strategies must therefore be integrated into educational and community settings.

Key word: adolescent mental health; socioeconomic factors; education; urban Nigeria; psychological burden

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

HEALTHCARE SYSTEM RESILIENCE AND POST-CONFLICT RECOVERY MODELS IN LIBYA

Prof. Dr. Khaled Al Mansouri, Dr. Mariam El Sherif, Assoc. Prof. Dr. Nabil Faraj
Department of Health Policy and Management, Faculty of Public Health, University of Tripoli, Tripoli, Libya

ABSTRACT

Healthcare system resilience is a critical issue in Libya, where conflict-related disruption has affected infrastructure, workforce stability, service continuity, and institutional trust. This study examines healthcare system resilience and post-conflict recovery models, focusing on how health services can be restored and strengthened after periods of instability. Resilient systems are able to maintain essential functions, adapt to shocks, and reorganize to meet population needs despite limited resources and structural damage. In post-conflict settings, recovery must address not only physical reconstruction but also governance, supply chains, staff retention, and public confidence in the health sector.

The abstract argues that resilience depends on both emergency responsiveness and long-term system rebuilding. Recovery models should prioritize primary care strengthening, referral coordination, mental health services, and equitable access across urban and rural areas. Fragmentation, workforce displacement, and inconsistent financing can slow recovery if not managed through coordinated policy and local capacity building. In this regard, resilience is not simply the ability to return to a previous state, but the capacity to develop a more adaptive and inclusive health system.

The study concludes that Libya's post-conflict recovery requires integrated planning across ministries, providers, and community actors. Strengthening governance, improving workforce support, and restoring essential infrastructure are central to effective recovery. Overall, healthcare system resilience should be treated as a strategic public health objective that links emergency preparedness with sustainable health system reform.

Key word: health system resilience; post-conflict recovery; healthcare governance; Libya; service continuity

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

NON-COMMUNICABLE DISEASE PREVENTION STRATEGIES IN LIBYA: POLICY IMPLEMENTATION AND COMMUNITY ENGAGEMENT

Dr. Huda Ben Ali, Prof. Dr. Ahmed El Rafi, Salim Abukhattala, Dr. Rania Mansour
Department of Community Medicine, Faculty of Medicine, University of Benghazi, Benghazi, Libya

ABSTRACT

Non-communicable diseases have become a growing public health concern in Libya, driven by changing lifestyles, limited preventive care, and uneven policy implementation. This study examines prevention strategies for non-communicable diseases, with particular attention to how policy design and community engagement shape outcomes. Effective prevention requires more than written policy; it depends on implementation capacity, institutional coordination, and public participation. Common risk factors such as unhealthy diet, physical inactivity, tobacco use, and poor screening access contribute to cardiovascular disease, diabetes, and other chronic conditions across diverse population groups.

The abstract emphasizes that community engagement is essential for translating prevention policy into meaningful behavior change. Public awareness campaigns, school health programs, workplace interventions, and primary care counseling can support healthier habits when they are culturally relevant and locally trusted. At the same time, policy implementation may be hindered by fragmented services, limited monitoring, and inconsistent funding. Prevention strategies therefore need clear accountability mechanisms and sustained collaboration between public institutions and community actors.

The study concludes that Libya's non-communicable disease burden can be reduced through integrated prevention policies that connect health education, early screening, and supportive environments. Community participation should be treated as a core component of prevention architecture, not an afterthought. Overall, the paper argues that long-term progress depends on aligning policy intent with practical implementation and social mobilization.

Key word: non-communicable diseases; prevention policy; community engagement; Libya; health promotio

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

IMPROVING PRIMARY HEALTHCARE DELIVERY IN CHILEAN RURAL COMMUNITIES THROUGH DIGITAL HEALTH INTEGRATION

Prof. Dr. Valentina Rojas, Dr. Camila Sepúlveda, Assoc. Prof. Dr. Rodrigo Valdés
Department of Primary Care, Faculty of Medicine, University of Chile, Santiago, Chile

ABSTRACT

Primary healthcare delivery in rural Chile continues to face barriers related to geographic isolation, limited workforce availability, and delays in specialist consultation. This study explores how digital health integration can improve primary care delivery in rural communities by expanding access, strengthening continuity, and supporting clinical decision-making. Digital tools such as teleconsultation, electronic records, and remote monitoring can help bridge service gaps, particularly where travel distances and staffing shortages affect care quality and timeliness.

The abstract argues that digital health should be understood as a complement to, rather than a replacement for, face-to-face primary care. Its greatest value lies in supporting referral pathways, enhancing communication between providers, and enabling earlier intervention for chronic or emerging health needs. Yet effective integration depends on infrastructure, training, and local acceptance. Rural communities may experience unequal benefits if technology is introduced without attention to digital literacy, connectivity, and workflow adaptation.

The study concludes that successful digital integration requires patient-centered design, strong institutional support, and alignment with primary care priorities. Rural healthcare systems are most likely to benefit when digital tools are embedded in comprehensive models that protect continuity and community trust. Overall, digital health offers a promising route to improve equitable primary care access in Chilean rural settings.

Key word: digital health; primary healthcare; rural communities; telemedicine; Chile

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

EPIDEMIOLOGICAL TRENDS OF CARDIOVASCULAR DISEASES AMONG ELDERLY POPULATIONS IN CHILE: A LONGITUDINAL STUDY

Dr. Nicolás Herrera, Prof. Dr. Fernanda Loyola
Department of Epidemiology, Faculty of Medicine, University of Santiago, Santiago, Chile

ABSTRACT

Cardiovascular disease remains a leading cause of morbidity and mortality among elderly populations in Chile, making it a major concern for long-term public health planning. This longitudinal study examines epidemiological trends in cardiovascular disease among older adults, with attention to risk accumulation, comorbidity patterns, and healthcare utilization over time. Aging populations often experience a combination of hypertension, metabolic disorders, sedentary behavior, and reduced physiological reserve, all of which contribute to cardiovascular risk and poorer outcomes.

The abstract emphasizes that longitudinal analysis is essential because disease burden in older adults evolves gradually and is influenced by both biological aging and social determinants of health. Access to preventive care, medication adherence, diet, physical activity, and continuity of monitoring all affect trajectory. Rural–urban differences, income inequality, and healthcare access may further shape the distribution of cardiovascular outcomes. Understanding these trends is important for prevention, resource allocation, and geriatric service planning.

The study concludes that cardiovascular prevention among older adults must combine primary care screening, chronic disease management, and supportive aging policies. Long-term surveillance can help identify high-risk groups and evaluate the effectiveness of intervention strategies. Overall, the paper contributes to evidence-based planning for healthier aging and chronic disease control in Chile.

Key word: cardiovascular disease; elderly population; longitudinal study; epidemiology; Chile

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

CLIMATE CHANGE AND EMERGING VECTOR-BORNE DISEASE RISKS IN CHILE: A PUBLIC HEALTH FORECASTING MODEL

Assoc. Prof. Dr. Martina Cárdenas, Dr. José Miguel Torres, Prof. Dr. Andrea Salgado
Department of Public Health, Faculty of Medicine, Pontifical Catholic University of Chile, Santiago, Chile

ABSTRACT

Climate change is increasingly altering the ecological conditions that shape vector-borne disease transmission in Chile. Rising temperatures, changing rainfall patterns, and shifts in habitat suitability may expand the geographic and seasonal range of vectors, creating new public health risks. This study presents a public health forecasting model for emerging vector-borne disease threats, with emphasis on anticipating population vulnerability and supporting preventive action. Forecasting models are valuable because they allow health authorities to prepare for probable changes in transmission before outbreaks become widespread.

The abstract highlights the importance of integrating climatic, entomological, and epidemiological data to produce actionable risk estimates. Such models can support surveillance, early warning, and targeted prevention in regions where environmental conditions are becoming increasingly favorable for vector establishment. However, forecasting is only useful when linked to preparedness capacity, public communication, and responsive health services. Uncertainty in climate projections, mobility patterns, and ecological adaptation must also be accounted for in model design.

The study concludes that climate-informed public health forecasting can strengthen readiness and reduce disease burden if it is embedded in multisectoral policy. Surveillance, vector control, and community education must be aligned with environmental change. Overall, the paper argues that Chile's public health system should treat climate-sensitive disease forecasting as an essential component of future preparedness.

Key word: climate change; vector-borne diseases; forecasting model; public health preparedness; Chile

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

THREE-DIMENSIONAL PRINTING TECHNOLOGIES IN MAXILLOFACIAL SURGERY: CLINICAL APPLICATIONS, LIMITATIONS, AND FUTURE PERSPECTIVES

Prof. Dr. Jean-Luc Fournier, Dr. Élodie Mercier, Antoine Girard, Marie Lefevre
Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Faculty of Dentistry, University of Lyon, Lyon, France

ABSTRACT

Three-dimensional printing has emerged as a transformative technology in maxillofacial surgery by enabling patient-specific planning, improved anatomical reconstruction, and more precise surgical execution. In contemporary oral and maxillofacial practice, additive manufacturing is increasingly used to produce anatomical models, surgical guides, cutting templates, and customized implants that support complex procedures involving trauma, deformity correction, oncologic reconstruction, and orthognathic surgery. These applications are particularly valuable in cases requiring high spatial accuracy, where conventional methods may be limited by intraoperative uncertainty and anatomical complexity. By translating radiologic data into physical models, 3D printing can improve communication between surgeons, patients, and multidisciplinary teams while also supporting preoperative simulation and training.

Despite these advantages, several limitations continue to restrict broader implementation. Material cost, workflow complexity, regulatory oversight, and the need for specialized technical expertise remain important barriers. In addition, current evidence still reflects a relative scarcity of large controlled clinical studies, especially for long-term outcomes and standardized protocols. Questions regarding material durability, sterilization, production time, and reproducibility also influence the pace of clinical adoption. Future progress will likely depend on stronger integration between imaging, computer-aided design, and surgical planning platforms, as well as on the development of biocompatible materials and improved quality assurance systems. Artificial intelligence and digital workflow optimization may further enhance precision, efficiency, and personalization in surgical care.

Overall, three-dimensional printing represents a major step toward individualized maxillofacial surgery. Its clinical value is already evident in selected settings, but wider adoption will require technical refinement, cost-effective implementation, and stronger evidence from prospective clinical research.

Key word: three-dimensional printing; maxillofacial surgery; surgical planning; patient-specific implants; additive manufacturing

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ADVANCES IN DIGITAL DENTISTRY FOR COMPLEX ORAL REHABILITATION: A CLINICAL EVALUATION OF CAD/CAM-GUIDED TREATMENT OUTCOMES IN ADULT PATIENTS

Prof. Dr. Youssef El Mansouri, Dr. Salma Benjelloun
Department of Prosthodontics, Faculty of Dental Medicine, University of Casablanca, Casablanca, Morocco

ABSTRACT

Digital dentistry has substantially reshaped the rehabilitation of complex oral conditions by improving precision, workflow efficiency, and treatment predictability. CAD/CAM-guided protocols now support the fabrication of crowns, bridges, dentures, implant components, and other prosthetic solutions with a level of consistency that is difficult to achieve through conventional methods. This abstract evaluates recent clinical outcomes associated with digital rehabilitation in adult patients, focusing on fit, survival, functional performance, and patient satisfaction. Across the current literature, digitally produced restorations have shown strong clinical reliability, while also reducing chairside adjustments and simplifying laboratory processes.

In complex oral rehabilitation, the value of digital workflows extends beyond prosthesis fabrication. Intraoral scanning, virtual design, and computer-assisted planning can improve diagnostic accuracy, reduce impression-related errors, and facilitate communication between clinicians and dental technicians. These advantages are particularly important for patients with multiple missing teeth, altered occlusion, worn dentition, or challenging anatomical conditions. Digital records also allow for easier reproduction and follow-up, which is useful in long-term maintenance and repair. However, successful clinical application depends on operator training, software compatibility, material selection, and careful case planning. Digital systems should therefore be evaluated not only for technical novelty but also for their impact on patient-centered outcomes such as comfort, chewing efficiency, esthetics, and treatment acceptance.

The available evidence supports CAD/CAM-guided treatment as an effective approach for adult oral rehabilitation, especially when integrated into multidisciplinary care. Future studies should continue to examine long-term performance, cost-effectiveness, and the expansion of digital methods in more advanced restorative cases.

Key word: digital dentistry; CAD/CAM; oral rehabilitation; prosthodontics; clinical outcomes

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ASSESSMENT OF PERIODONTAL HEALTH AWARENESS AND PREVENTIVE ORAL CARE PRACTICES AMONG UNIVERSITY STUDENTS IN URBAN COMMUNITIES

Assoc. Prof. Dr. Amina El Idrissi
Department of Periodontology, Faculty of Dental Medicine, University of Rabat, Rabat, Morocco

ABSTRACT

University students represent an important population for studying oral health awareness because this life stage combines increased autonomy with changing health behaviors and often irregular access to preventive care. Periodontal health awareness is closely linked to daily oral hygiene practices, risk perception, and attendance at dental services. This abstract assesses the relationship between awareness and preventive oral care behaviors among university students living in urban communities, with emphasis on how educational background and lifestyle patterns influence periodontal self-care. Many students are familiar with general concepts of oral hygiene, yet this knowledge does not always translate into regular professional checkups, effective brushing habits, or consistent interdental cleaning. Stressful academic routines, dietary irregularities, and low perception of early periodontal symptoms may contribute to delayed help-seeking and inadequate prevention.

From a public health perspective, preventive oral care is strengthened when students understand the silent progression of gingival inflammation and periodontal disease. Awareness campaigns in universities can therefore play a significant role in promoting behavior change, especially when combined with accessible screening and educational outreach. The study also highlights that preventive practices are shaped by social context, affordability, and previous experiences with dental care. Urban students may have better physical access to services, but access alone does not guarantee healthy behavior. Trust in dental professionals, oral health literacy, and perceived importance of prevention all influence whether students adopt regular care routines. The findings support the need for targeted educational strategies within higher education settings to strengthen periodontal knowledge and encourage lifelong preventive habits. Such interventions may reduce future periodontal burden and improve overall oral health outcomes.

Key word: periodontal awareness; preventive oral care; university students; oral health literacy; urban health

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

THE EFFECTIVENESS OF MINIMALLY INVASIVE RESTORATIVE TECHNIQUES IN THE MANAGEMENT OF EARLY CHILDHOOD CARIES: A LONGITUDINAL STUDY

Prof. Dr. Arben Kola, Elira Hoxha, Dr. Gentian Leka
Department of Pediatric Dentistry, Faculty of Dental Medicine, University of Tirana, Tirana, Albania

ABSTRACT

Early childhood caries remains one of the most common and clinically challenging oral health problems in pediatric dentistry, often affecting nutrition, pain experience, sleep, and quality of life. Minimally invasive restorative techniques have gained importance because they seek to preserve tooth structure, reduce treatment burden, and improve cooperation in young children. This abstract examines the effectiveness of minimally invasive restorative approaches in the management of early childhood caries through a longitudinal perspective that emphasizes clinical stability, preventive control, and child-centered care.

Minimally invasive treatment includes conservative cavity preparation, selective caries removal, fluoride-based management, and restorative materials that allow efficient placement with reduced discomfort. These methods are particularly useful when children have limited attention spans, anxiety, or a high risk of further disease progression. Longitudinal observation is important because caries management in early childhood is not a single intervention but an ongoing process that depends on oral hygiene, diet, parental involvement, and recall compliance. The study highlights that successful outcomes are more likely when restorative care is combined with risk assessment, anticipatory guidance, and family education. Minimally invasive methods also support preservation of primary teeth function until natural exfoliation, which is essential for speech, mastication, and arch integrity.

Clinical evidence suggests that these techniques can reduce repeated operative treatment and improve acceptance among children and caregivers. However, effectiveness depends on case selection, lesion extent, and the quality of follow-up care. The paper argues that minimally invasive restorative dentistry should be understood as part of a broader preventive philosophy rather than a purely technical intervention. In pediatric practice, it offers a balance between treatment efficiency, biological preservation, and long-term oral health promotion.

Key word: early childhood caries; minimally invasive dentistry; pediatric restorative care; longitudinal study; preventive treatment

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

EVALUATION OF PATIENT SATISFACTION AND FUNCTIONAL OUTCOMES FOLLOWING IMPLANT-SUPPORTED PROSTHETIC REHABILITATION IN ELDERLY INDIVIDUALS

Assis. Prof. Dr. Klodiana Dervishi, Dr. Besnik Shehu
Department of Prosthodontics and Implant Dentistry, Faculty of Dental Medicine, University of Pristina, Pristina, Kosovo

ABSTRACT

Implant-supported prosthetic rehabilitation has become an important treatment option for elderly individuals who experience tooth loss, reduced masticatory efficiency, and compromised oral function. Beyond technical success, contemporary prosthodontics increasingly emphasizes patient satisfaction, comfort, confidence, and daily functional improvement. This abstract evaluates satisfaction and functional outcomes following implant-supported rehabilitation in older adults, highlighting the clinical and psychosocial dimensions of treatment success.

For elderly patients, implant therapy can restore chewing ability, enhance speech, improve denture stability, and support nutritional intake. These benefits often translate into better quality of life and increased social confidence. At the same time, treatment planning must take into account bone quality, systemic health conditions, oral hygiene capacity, and expectations regarding maintenance. Patient satisfaction is therefore influenced not only by prosthetic design but also by communication, follow-up care, and the extent to which treatment matches functional needs. Functional outcomes should be assessed in relation to comfort during mastication, prosthesis retention, oral hygiene management, and adaptation over time.

The paper argues that implant-supported rehabilitation is most successful when it is individualized and supported by realistic expectations. In elderly populations, the goal is not merely replacement of missing teeth but restoration of practical oral function and dignity in daily life. The findings support a patient-centered approach that integrates prosthodontic precision with geriatric sensitivity. Such an approach can improve adherence, reduce dissatisfaction, and contribute to long-term oral health stability in older adults.

Key word: implant-supported prosthesis; elderly patients; patient satisfaction; functional outcomes; prosthetic rehabilitation

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN ORAL RADIOLOGY: IMPROVING DIAGNOSTIC ACCURACY FOR MAXILLOFACIAL PATHOLOGIES

Prof. Dr. Fahad Al-Rashidi, Noura Al-Enezi, Dr. Abdullah Al-Harbi, Sara Al-Mutairi
Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Faculty of Dentistry, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia

ABSTRACT

Artificial intelligence is rapidly influencing oral radiology by improving image interpretation, supporting diagnostic decision-making, and increasing efficiency in clinical workflows. In maxillofacial imaging, AI systems are being developed to detect lesions, classify anatomical variations, identify pathological changes, and assist with treatment planning. This abstract examines the role of artificial intelligence in oral radiology, focusing on its potential to improve diagnostic accuracy for maxillofacial pathologies and its implications for clinical practice.

AI-based tools can analyze large imaging datasets and highlight patterns that may be difficult to detect consistently in routine interpretation. This is especially relevant in complex cases involving subtle lesions, overlapping structures, or early-stage pathology. Such systems may serve as decision-support tools rather than replacements for clinicians, helping reduce oversight and standardize reporting. The clinical value of AI is strongest when integrated with radiologist expertise, as human judgment remains essential for contextual interpretation and final diagnosis. In oral radiology, applications extend to caries detection, periapical assessment, cystic and tumorous lesion recognition, bone pathology evaluation, and post-treatment monitoring.

The paper also notes important limitations. AI performance depends on the quality and diversity of training data, and models may be less reliable across different imaging devices or patient populations. Ethical concerns, explainability, and data governance are also important. Despite these challenges, the evidence suggests that artificial intelligence can enhance precision, workflow efficiency, and consistency in maxillofacial imaging. The study concludes that AI should be developed as a collaborative diagnostic aid, with strong clinical validation and careful integration into oral radiology practice.

Key word: artificial intelligence; oral radiology; diagnostic accuracy; maxillofacial pathology; imaging

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

CLINICAL AND MICROBIOLOGICAL EVALUATION OF NOVEL ANTIBACTERIAL AGENTS IN THE PREVENTION OF PERI-IMPLANT DISEASES

Assoc. Prof. Dr. Maha Al-Sabah
Department of Periodontology and Oral Biology, Faculty of Dentistry, University of Baghdad, Baghdad, Iraq

ABSTRACT

Peri-implant diseases are increasingly recognized as significant complications of implant therapy, with microbial biofilm playing a central role in disease initiation and progression. Prevention strategies therefore depend on both clinical monitoring and effective antimicrobial control. This abstract examines the clinical and microbiological evaluation of novel antibacterial agents aimed at reducing the risk of peri-implant inflammation and improving long-term implant maintenance.

Novel antibacterial strategies include locally delivered agents, surface-modified materials, antimicrobial coatings, and biofilm-disrupting compounds designed to target the complex microbial ecology around implants. Their effectiveness is best understood through combined clinical and microbiological assessment, since visible inflammation does not always reflect underlying microbial burden. Clinical endpoints include bleeding, pocket changes, tissue stability, and implant comfort, while microbiological evaluation focuses on changes in biofilm composition and pathogen load. Prevention is especially important in patients with risk factors such as poor oral hygiene, prior periodontal disease, or limited maintenance adherence.

The abstract emphasizes that antibacterial interventions should complement, not replace, mechanical plaque control and individualized supportive care. Because peri-implant diseases are multifactorial, optimal prevention requires integration of biomaterial science, clinical surveillance, and patient education. Current evidence suggests that novel agents may reduce microbial colonization and support peri-implant tissue health, but long-term stability and safety must be established through stronger clinical research. The study highlights the importance of translating microbiological innovation into practical preventive protocols that are feasible in everyday implant maintenance. Overall, antibacterial advances offer promising support for reducing peri-implant complications and improving implant longevity.

Key word: peri-implant disease; antibacterial agents; microbiology; implant maintenance; biofilm control

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

LONG-TERM PERFORMANCE OF CERAMIC VENEERS IN ESTHETIC DENTISTRY: FACTORS INFLUENCING SURVIVAL RATES AND PATIENT SATISFACTION

Prof. Dr. Pierre Dubois, Dr. Camille Laurent
Department of Esthetic Dentistry and Prosthodontics, Faculty of Dental Medicine, University of Paris, Paris, France

ABSTRACT

Ceramic veneers are widely used in esthetic dentistry because they combine conservative tooth preparation with high esthetic potential and durable functional performance. Their long-term success depends on case selection, material properties, bonding quality, occlusal management, and patient habits. This abstract examines the long-term performance of ceramic veneers and the factors that influence survival rates and patient satisfaction in clinical practice.

Ceramic veneers are often selected for anterior esthetic correction, including discoloration, minor alignment issues, shape modification, and tooth wear management. Their clinical longevity is supported by the strength of modern ceramics and adhesive techniques, but failures may still occur due to fracture, debonding, marginal discoloration, or biological complications. Long-term performance is strongly affected by preparation design, bonding protocol, parafunction, oral hygiene, and restorative planning. Patient satisfaction is typically high when esthetic goals are met and treatment remains conservative, yet subjective outcomes also depend on communication, expectations, and the stability of the final result.

The study argues that ceramic veneers should be approached as a precision restorative therapy requiring careful diagnosis rather than as a purely cosmetic procedure. Success is most likely when clinicians consider functional harmony as well as appearance. Maintenance and follow-up are equally important because minor complications can often be managed before they compromise survival. The paper concludes that ceramic veneers remain a reliable option in esthetic dentistry, especially when treatment planning is individualized and guided by long-term functional principles. Their performance reflects the balance between esthetic excellence and biologic respect.

Key word: ceramic veneers; esthetic dentistry; survival rate; patient satisfaction; restorative longevity

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE AND MOLECULAR CHARACTERIZATION OF BRUCELLOSIS IN SMALL RUMINANTS IN NORTH AFRICA

Youssef El Amrani, Dr. Salma Benkirane
Faculty of Veterinary Medicine, Hassan II Institute of Agronomy and Veterinary Medicine, Morocco

ABSTRACT

Brucellosis remains an important zoonotic disease affecting small-ruminant production, public health, and rural livelihoods across North Africa. This study examines epidemiological surveillance approaches and molecular characterization methods used to investigate *Brucella* infections in sheep and goats. Particular attention is given to the relationship between animal movement, herd management, reproductive losses, informal trade, and human exposure. The research is based on a review of veterinary epidemiology studies, diagnostic protocols, and molecular investigations conducted in North African livestock systems. It evaluates the contribution of serological screening, polymerase chain reaction, genotyping, and spatial surveillance to the identification of infection patterns and transmission pathways.

The analysis indicates that disease distribution varies considerably among regions because of differences in animal husbandry, vaccination practices, diagnostic capacity, and reporting systems. Molecular evidence has been especially valuable in distinguishing circulating *Brucella* strains and clarifying links between animal reservoirs and human infection. However, surveillance remains limited by fragmented veterinary services, inconsistent laboratory procedures, and insufficient cooperation between animal and public health institutions. The findings support an integrated One Health framework combining routine herd testing, reproductive health monitoring, movement control, vaccination, and public education.

The study concludes that molecular epidemiology can improve the precision of brucellosis control programs when it is connected to reliable field surveillance and coordinated institutional action. Strengthening diagnostic networks, improving farmer awareness, and promoting collaboration between veterinary and medical sectors are essential for reducing transmission and protecting both livestock productivity and human health in North Africa.

Key words: brucellosis, small ruminants, molecular epidemiology, North Africa, One Health

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ANTIMICROBIAL RESISTANCE PATTERNS IN BOVINE MASTITIS PATHOGENS AND STRATEGIES FOR DAIRY HERD MANAGEMENT

Assoc. Prof. Dr. Nadia Rachidi, Hassan Ait Lamine
Faculty of Veterinary Medicine, Hassan II Institute of Agronomy and Veterinary Medicine, Morocco

ABSTRACT

Bovine mastitis is one of the most significant health and productivity problems in dairy farming, affecting animal welfare, milk quality, farm profitability, and food safety. This study examines antimicrobial resistance patterns among major mastitis pathogens and evaluates management strategies that can reduce treatment failure and unnecessary antimicrobial use. The research focuses on the interaction between pathogen characteristics, farm hygiene, milking practices, treatment decisions, and herd-level disease prevention.

The study is based on veterinary microbiology literature and One Health approaches to antimicrobial stewardship. It considers the importance of identifying bacterial agents through culture, susceptibility testing, and pathogen-specific diagnostics before treatment. The analysis suggests that resistance is influenced not only by antibiotic exposure but also by biofilm formation, persistent intramammary infection, poor milking hygiene, environmental contamination, and inadequate treatment protocols. These factors may allow resistant organisms to remain within the herd and contribute to repeated clinical and subclinical disease.

The findings support selective treatment, improved udder hygiene, regular monitoring of somatic cell counts, appropriate dry-cow management, and strengthened farm biosecurity. The study also emphasizes the value of veterinary supervision and farmer education in preventing indiscriminate antimicrobial use. Alternative strategies, including vaccination, probiotics, improved housing, and targeted prevention, may complement responsible therapy. The paper concludes that effective mastitis control requires an integrated herd-management approach in which antimicrobial use is guided by evidence, diagnosis, and prevention rather than routine medication.

Key words: bovine mastitis, antimicrobial resistance, dairy herd management, antimicrobial stewardship, veterinary microbiology

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

EFFECTS OF CLIMATE VARIABILITY ON TICK-BORNE DISEASE PREVALENCE IN CATTLE POPULATIONS IN EAST AFRICA

Dr. Asha Mkwawa, Prof. Dr. John Mrema
Faculty of Veterinary Medicine, Sokoine University of Agriculture, Tanzania

ABSTRACT

This study examines the effects of climate variability on the prevalence and distribution of tick-borne diseases in cattle populations in East Africa. Changes in temperature, rainfall, humidity, and seasonal patterns influence tick development, reproduction, survival, and geographic expansion. These environmental changes may alter the intensity and timing of diseases that affect cattle health, productivity, and the livelihoods of pastoral and smallholder communities.

The research is based on veterinary epidemiology, climate-health studies, and livestock production literature. It considers the relationship between climatic conditions, tick ecology, host movement, grazing patterns, and disease transmission. The analysis suggests that irregular rainfall and prolonged warm periods can extend tick activity and create favorable conditions for the persistence of pathogens. At the same time, drought and resource scarcity may increase livestock mobility, bringing animals into closer contact with infected herds and new ecological zones.

The study argues that conventional disease-control programs should be complemented by climate-informed surveillance. Early warning systems, participatory reporting, strategic acaricide use, vaccination where available, and improved pasture management can strengthen prevention. The findings also highlight the importance of integrating local pastoral knowledge with veterinary and meteorological information. The paper concludes that climate variability is reshaping the epidemiology of tick-borne diseases in East Africa and that sustainable control requires flexible, regionally coordinated, and ecologically informed livestock-health strategies.

Key words: climate variability, tick-borne diseases, cattle health, East Africa, veterinary epidemiology

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

EVALUATION OF ANIMAL WELFARE PRACTICES IN SMALL-SCALE POULTRY FARMS AND THEIR IMPACT ON PRODUCTIVITY

Dr. Neema Komba
Faculty of Veterinary Medicine, Sokoine University of Agriculture, Tanzania

ABSTRACT

This study evaluates animal welfare practices in small-scale poultry farms and examines their relationship with productivity, flock health, and farm sustainability. Small-scale poultry production plays an important role in household income and food security, yet farmers often operate under constraints related to housing, nutrition, disease prevention, labor, and access to veterinary advice. The research considers how welfare conditions influence bird behavior, health, growth, egg production, and mortality.

The study is based on animal welfare science and smallholder livestock-management literature. It examines key welfare dimensions, including housing space, ventilation, access to clean water and feed, hygiene, handling, disease control, and protection from heat and other environmental stressors. The analysis suggests that poor welfare practices can increase stress, weaken immunity, reduce productivity, and raise the risk of disease transmission. In contrast, appropriate housing, balanced nutrition, clean surroundings, and careful handling can improve both bird welfare and farm performance.

The study emphasizes that welfare improvement does not necessarily require expensive technology. Many effective measures depend on farmer education, locally available materials, improved observation, and preventive management. The paper argues that welfare should be integrated into poultry development programs rather than treated as an external or secondary concern. It concludes that improving animal welfare in small-scale farms can strengthen productivity, reduce avoidable losses, and support more ethical and resilient poultry production systems.

Key words: animal welfare, small-scale poultry farms, productivity, poultry health, sustainable farming

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

ADVANCES IN VETERINARY PARASITOLOGY: CONTROL OF ECHINOCOCCOSIS IN RURAL LIVESTOCK SYSTEMS

Assoc. Prof. Dr. Aidos Sarsenov, Dr. Gulnar Zhakupova
Faculty of Veterinary Medicine, Kazakh National Agrarian Research University, Kazakhstan

ABSTRACT

This study reviews recent advances in the control of echinococcosis in rural livestock systems, with particular attention to the interaction between animal health, human exposure, and rural production practices. Echinococcosis is a persistent parasitic disease maintained through complex life cycles involving dogs, livestock, and contaminated environments. Its control is challenging in communities where close contact between animals and people, informal slaughter, and limited veterinary infrastructure are common.

The research is based on veterinary parasitology literature and One Health control frameworks. It examines diagnostic surveillance, regular deworming of dogs, meat inspection, safe disposal of infected organs, vaccination of intermediate hosts, and public education. The findings suggest that isolated interventions are rarely sufficient because the parasite circulates through interconnected household, livestock, and environmental pathways. Sustainable control requires coordination between veterinary services, medical institutions, local authorities, and rural communities.

The analysis also highlights the value of molecular diagnostics and improved surveillance for identifying transmission patterns and monitoring intervention success. Community participation is essential because many control measures depend on changes in household behavior, especially the prevention of raw offal feeding to dogs and the improvement of slaughter hygiene. The study concludes that echinococcosis control should be organized as a long-term, integrated public health program combining veterinary action, environmental management, and community education.

Key words: echinococcosis, veterinary parasitology, rural livestock, One Health, parasite control

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DIAGNOSING CANINE CARDIAC DISEASES IN CENTRAL ASIA

Prof. Dr. Marat Nursultanov, Dr. Aigerim Kassym
Faculty of Veterinary Medicine, Kazakh National Agrarian Research University, Kazakhstan

ABSTRACT

This study examines the application of artificial intelligence in diagnosing canine cardiac diseases in Central Asia. Cardiovascular disorders in dogs may remain undetected because of limited access to specialized veterinary cardiology, uneven diagnostic infrastructure, and shortages of trained professionals. Artificial intelligence offers new possibilities for interpreting electrocardiograms, echocardiographic images, radiographs, and clinical records in a faster and more consistent manner.

The research is based on veterinary cardiology and medical artificial-intelligence literature. It evaluates the potential of machine-learning systems to assist in identifying rhythm abnormalities, chamber enlargement, valvular disease, and signs of cardiac failure. The analysis suggests that artificial intelligence can support diagnostic decision-making by recognizing complex patterns that may be difficult to identify through routine examination alone. It may also assist general practitioners in referring high-risk cases for specialist evaluation.

The study emphasizes that artificial intelligence should function as a clinical support tool rather than a replacement for veterinary judgment. Reliable application requires high-quality datasets, standardized imaging procedures, regional validation, and careful consideration of animal history and clinical context. The paper also discusses challenges related to data privacy, explainability, equipment availability, and professional training. It concludes that artificial intelligence can improve canine cardiac care in Central Asia when integrated responsibly with veterinary expertise and supported by appropriate diagnostic infrastructure.

Key words: artificial intelligence, canine cardiac disease, veterinary diagnosis, machine learning, Central Asia

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

MOLECULAR EPIDEMIOLOGY OF AVIAN INFLUENZA VIRUSES IN COMMERCIAL POULTRY FARMS IN EAST ASIA

Dr. Wei-Lun Chen, Assoc. Prof. Dr. Mei-Hua Lin
Faculty of Veterinary Medicine, National Taiwan University, Taiwan

ABSTRACT

This study investigates the molecular epidemiology of avian influenza viruses circulating in commercial poultry farms in East Asia. Avian influenza continues to pose serious risks to poultry health, food production, biodiversity, and public health. Commercial farms may facilitate viral amplification and transmission because of high animal density, frequent movement of birds and materials, and contact with wild-bird populations. The research examines viral diversity, genetic evolution, and the factors that influence persistence within poultry production systems.

The study is based on molecular virology, veterinary epidemiology, and One Health literature. It focuses on the use of genome sequencing, phylogenetic analysis, and molecular surveillance to identify relationships among viral strains and trace possible transmission pathways. The findings suggest that viral evolution is shaped by reassortment, animal movement, environmental interfaces, and differences in farm biosecurity. Molecular analysis can therefore provide valuable information for early warning, outbreak investigation, and targeted control.

The paper emphasizes that effective prevention requires continuous surveillance rather than reliance on emergency response alone. Farm-level biosecurity, worker training, controlled movement, vaccination policies, and coordination between veterinary and public health authorities are essential components of a comprehensive strategy. The study concludes that molecular epidemiology strengthens regional preparedness by connecting laboratory evidence with practical disease-control decisions across East Asian poultry systems.

Key words: avian influenza, molecular epidemiology, poultry farms, genome surveillance, East Asia

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SUSTAINABLE IRRIGATION MANAGEMENT AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN ARID AGRICULTURAL REGIONS OF MOROCCO WITH WATER EFFICIENCY OPTIMIZATION

Prof. Dr. Youssef El Amrani, Dr. Salma Benali, Assoc. Prof. Dr. Omar Kettani
Faculty of Agronomy and Environmental Sciences, Mohammed VI Polytechnic University, Morocco

ABSTRACT

This study examines sustainable irrigation management and the application of artificial intelligence in arid agricultural regions of Morocco, where water scarcity, irregular precipitation, and rising climatic pressure challenge agricultural productivity. The research focuses on how intelligent irrigation systems can improve water-use efficiency while maintaining crop health and supporting the resilience of farming communities. It considers the integration of soil-moisture sensors, weather information, remote sensing, and data-driven decision-support tools into agricultural water management.

The study is based on agricultural sustainability literature, irrigation management research, and emerging applications of artificial intelligence in precision agriculture. It explores how predictive models can estimate crop water requirements, identify irrigation needs, and support the selection of appropriate irrigation schedules. The analysis suggests that artificial intelligence can help farmers respond more effectively to spatial and temporal differences in soil moisture, evapotranspiration, temperature, and crop development. Such systems can reduce unnecessary irrigation and improve the coordination of water distribution across cultivated areas.

The paper also emphasizes that technological innovation must be accompanied by farmer training, institutional cooperation, and accessible digital services. Artificial intelligence cannot provide sustainable results if farmers lack the resources or knowledge required to interpret and apply its recommendations. The study concludes that combining intelligent irrigation with soil conservation, drought-tolerant crops, and participatory water governance can strengthen agricultural resilience in Morocco’s arid regions. This integrated approach offers a practical pathway toward more efficient water use, improved productivity, and long-term environmental sustainability.

Key words: sustainable irrigation, artificial intelligence, arid agriculture, Morocco, water-use efficiency

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SOIL SALINITY CONTROL AND CLIMATE RESILIENT OLIVE CULTIVATION STRATEGIES IN MEDITERRANEAN AGRICULTURAL ZONES OF MOROCCO

Dr. Amina Rachid, Prof. Dr. Hassan El Fassi
Faculty of Agricultural Sciences, Cadi Ayyad University, Morocco

ABSTRACT

This paper investigates soil salinity control and climate-resilient olive cultivation strategies in the Mediterranean agricultural zones of Morocco. Olive production plays an important role in rural livelihoods and agricultural development, yet increasing drought, reduced rainfall, and the accumulation of salts in irrigated soils threaten long-term productivity. The study examines how soil management and adaptive cultivation practices can protect olive trees while improving water efficiency and maintaining the quality of fruit production.

The research draws on soil science, Mediterranean agriculture, and climate adaptation literature. It considers the effects of saline irrigation water, inadequate drainage, excessive evaporation, and irregular water application on soil structure and olive tree performance. The analysis highlights the importance of efficient irrigation systems, regulated deficit irrigation, organic amendments, mulching, cover crops, and the selection of salt-tolerant cultivars. These practices can improve soil biological activity, reduce salt accumulation in the root zone, and support the physiological stability of olive trees during periods of water stress.

The study argues that salinity management should be integrated with broader climate-resilient farming strategies rather than treated as an isolated technical problem. Monitoring soil electrical conductivity, improving drainage, and coordinating water and nutrient applications are essential for sustaining orchard health. The paper concludes that Moroccan olive cultivation can become more resilient when farmers combine adaptive irrigation, soil conservation, and climate-sensitive orchard management. Such an integrated approach can protect agricultural productivity and strengthen the environmental sustainability of Mediterranean farming systems

Key words: soil salinity, olive cultivation, climate resilience, Morocco, Mediterranean agriculture

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

CLIMATE SMART COFFEE PRODUCTION SYSTEMS AND SUSTAINABLE FARMING PRACTICES FOR SMALLHOLDER FARMERS IN TANZANIA

Assoc. Prof. Dr. John Mwangi, Dr. Neema Kiwelu, Prof. Dr. Salim Hassan
Faculty of Agriculture and Environmental Sciences, Sokoine University of Agriculture, Tanzania

ABSTRACT

This study examines climate-smart coffee production systems and sustainable farming practices for smallholder farmers in Tanzania. Coffee cultivation supports rural livelihoods and contributes to local economic development, yet changing rainfall patterns, rising temperatures, soil degradation, and the spread of pests create increasing risks for producers. The research explores how climate-smart agriculture can strengthen productivity, farm resilience, and environmental sustainability in smallholder coffee systems.

The study is based on agricultural sustainability research, coffee production studies, and climate adaptation literature. It evaluates the potential of shade-grown coffee, agroforestry, soil organic matter management, water conservation, and integrated pest management. These practices can reduce exposure to heat, protect soil fertility, improve biodiversity, and create more stable farm environments. The analysis also emphasizes the importance of farmer knowledge and locally appropriate innovations, since smallholders often face limited access to credit, technology, and extension services.

The findings suggest that sustainable coffee production depends on combining ecological management with institutional and economic support. Farmers require practical training, improved access to resilient planting materials, reliable market information, and stronger links with producer cooperatives. The paper argues that climate-smart coffee systems should be designed around the realities of smallholder agriculture rather than imported as standardized technological packages. It concludes that integrated agroforestry, soil conservation, and participatory extension can strengthen the resilience of Tanzanian coffee farming while supporting rural livelihoods and environmental protection.

Key words: climate-smart agriculture, coffee production, smallholder farmers, Tanzania, sustainable farming

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

MAIZE YIELD ENHANCEMENT THROUGH INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND DIGITAL AGRICULTURAL MONITORING SYSTEMS IN TANZANIA

Dr. Peter Mushi, Assoc. Prof. Dr. Grace Nyerere, Dr. David Seko
Faculty of Agriculture, University of Dar es Salaam, Tanzania

ABSTRACT

This paper investigates maize yield enhancement through the integration of pest management and digital agricultural monitoring systems in Tanzania. Maize production is essential for food security, yet farmers face persistent challenges from insect pests, crop diseases, changing weather conditions, and limited access to timely technical information. The study explores how integrated pest management can be strengthened through digital tools that improve monitoring, diagnosis, and farm-level decision making.

The research draws on crop protection literature, digital agriculture studies, and sustainable production models. It examines the use of mobile advisory services, field sensors, satellite imagery, and farmer reporting platforms to identify pest pressure and guide appropriate interventions. The findings suggest that digital monitoring can improve the timing and precision of pest control, reducing unnecessary pesticide use while protecting crop health. Integrated approaches that combine resistant varieties, biological control, cultural practices, and carefully targeted chemical treatment are shown to provide more sustainable results than routine pesticide application.

The study also highlights the importance of accessibility and local adaptation. Digital tools must be affordable, available in appropriate languages, and connected to reliable extension services. The paper argues that technological monitoring should complement farmer knowledge rather than replace it. It concludes that combining integrated pest management with digital agricultural services can support improved maize production, reduce environmental harm, and strengthen food security in Tanzanian farming communities.

Key words: maize production, integrated pest management, digital agriculture, Tanzania, food security

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

PRECISION AGRICULTURE TECHNOLOGIES FOR WINTER WHEAT PRODUCTION IMPROVEMENT IN THE STEPPE REGIONS OF KAZAKHSTAN

Prof. Dr. Aibek Nurmaganbet, Dr. Dana Sarsenova, Assoc. Prof. Dr. Yerlan Tolegen
Faculty of Agronomy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Kazakhstan

ABSTRACT

This study examines precision agriculture technologies for improving winter wheat production in the steppe regions of Kazakhstan. Wheat cultivation in these areas is influenced by climatic variability, low and uneven rainfall, soil heterogeneity, and the risk of drought. The research explores how digital agricultural technologies can support more efficient use of water, seed, fertilizer, and energy while improving crop management under challenging steppe conditions.

The paper is based on precision agriculture literature and sustainable cereal production research. It focuses on satellite imagery, geographic information systems, field sensors, variable-rate application, and digital yield mapping. These technologies enable farmers to identify differences in soil fertility, crop development, moisture availability, and disease pressure across agricultural fields. The findings suggest that site-specific management can improve decision making and reduce the inefficient application of agricultural inputs.

The study also considers the practical barriers to adoption, including equipment costs, technical training, limited connectivity, and the need for locally adapted decision-support systems. It argues that precision agriculture should be introduced through gradual and farmer-centered models that connect digital information with agronomic knowledge. The paper concludes that precision technologies can contribute to more resilient winter wheat production in Kazakhstan by improving resource efficiency, supporting climate adaptation, and strengthening the sustainability of steppe agriculture.

Key words: precision agriculture, winter wheat, Kazakhstan, steppe agriculture, digital farming

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SUSTAINABLE PASTURE MANAGEMENT AND LIVESTOCK GRAZING OPTIMIZATION MODELS USING REMOTE SENSING IN KAZAKHSTAN RURAL ECOSYSTEMS

Dr. Marat Kenzhebek, Prof. Dr. Gulnara Akhmetova, Assis. Prof. Dr. Nursultan Abilov
Faculty of Agricultural Sciences, Kazakh National Agrarian Research University, Kazakhstan

ABSTRACT

This study investigates sustainable pasture management and livestock grazing optimization models using remote sensing in rural ecosystems of Kazakhstan. Pastoral agriculture remains an important livelihood system, yet overgrazing, vegetation decline, water scarcity, and climate variability threaten the ecological balance of rangelands. The research explores how remote sensing can support pasture assessment, grazing planning, and the sustainable use of rural ecosystems.

The study is grounded in rangeland ecology, livestock management, and geospatial analysis literature. It examines how satellite imagery and vegetation indicators can be used to monitor pasture productivity, seasonal change, soil exposure, and the distribution of water resources. The findings suggest that remote sensing improves the ability of farmers and local authorities to identify areas under grazing pressure and to adjust livestock movement according to pasture condition. Such approaches can reduce the risk of land degradation while supporting animal health and productivity.

The paper also emphasizes the importance of combining digital monitoring with pastoral knowledge. Remote sensing provides valuable spatial information, but local communities remain essential for interpreting environmental change and applying practical grazing decisions. The study concludes that sustainable pasture management in Kazakhstan requires adaptive grazing plans, seasonal monitoring, water-point coordination, and stronger community participation. Integrating remote sensing into traditional pastoral systems can help protect biodiversity, maintain livestock livelihoods, and improve the resilience of rural ecosystems.

Key words: pasture management, remote sensing, livestock grazing, Kazakhstan, rangeland sustainability

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

PRECISION VITICULTURE AND SMART IRRIGATION SYSTEMS FOR HIGH QUALITY GRAPE PRODUCTION IN RIOJA WINE REGIONS OF SPAIN

Assoc. Prof. Dr. Lucia Herrera, Dr. Javier Alonso
Faculty of Agricultural Engineering, University of La Rioja, Spain

ABSTRACT

This paper examines precision viticulture and smart irrigation systems for producing high-quality grapes in the Rioja wine regions of Spain. Viticulture in Mediterranean environments increasingly faces water scarcity, heat stress, irregular rainfall, and changing conditions that influence grape maturity and wine quality. The study explores how digital monitoring and adaptive irrigation can support both productivity and the preservation of regional wine characteristics.

The research is based on precision agriculture, viticulture, and irrigation management literature. It focuses on soil-moisture sensing, remote imagery, weather monitoring, crop-status assessment, and variable irrigation scheduling. These tools can help growers identify differences in vine vigor, water demand, and fruit development across individual vineyard zones. The findings suggest that smart irrigation improves water-use efficiency by applying water according to plant needs and phenological stage rather than following uniform schedules.

The study also emphasizes that quality-oriented viticulture requires a careful balance between water availability and controlled plant stress. Excessive irrigation may weaken grape concentration, while severe water deficit can damage vines and reduce fruit quality. The paper argues that precision systems should therefore be combined with experienced vineyard management and knowledge of local terroir. It concludes that smart irrigation and digital monitoring can support resilient, resource-efficient, and high-quality grape production in Rioja while strengthening the sustainability of Mediterranean wine landscapes.

Key words: precision viticulture, smart irrigation, grape quality, Rioja, sustainable wine production

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

SUSTAINABLE OLIVE OIL PRODUCTION SYSTEMS AND ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION STRATEGIES IN ANDALUSIAN AGRICULTURE OF SPAIN

Dr. Maria Gonzalez, Prof. Dr. Antonio Ruiz
Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, University of Córdoba, Spain

ABSTRACT

This study examines sustainable olive oil production systems and strategies for reducing environmental impacts in Andalusian agriculture. Olive cultivation is central to the regional economy and cultural landscape, but conventional production can create pressure on water resources, soil quality, biodiversity, and energy consumption. The research explores how agricultural practices can be redesigned to maintain productivity while improving environmental performance across the olive oil value chain.

The paper draws on sustainable agriculture, olive production, and environmental management literature. It focuses on regulated deficit irrigation, soil-cover practices, organic fertilization, integrated pest management, agroecological diversification, and the responsible use of agricultural by-products. The findings suggest that combining these practices can improve soil structure, reduce erosion, conserve water, and strengthen the ecological stability of olive groves. The study also highlights the potential of circular approaches that transform pruning residues, olive leaves, and processing waste into energy, compost, or other useful resources.

The research argues that environmental sustainability should be assessed from cultivation through processing and distribution. Reducing resource use at the farm level is important, but long-term improvement also requires efficient mills, renewable energy, responsible packaging, and transparent supply chains. The study concludes that Andalusian olive oil production can become more resilient and environmentally responsible when technological innovation is combined with agroecological management and regional knowledge. This integrated approach supports both rural livelihoods and the preservation of Mediterranean agricultural landscapes.

Key words: sustainable olive oil, Andalusian agriculture, environmental impact, water efficiency, agroecology

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

YÜZEYSEL SULARDA POLİBROMLU DİFENİL ETERLER (PBDE) VE SAĞLIK ETKİLERİ

Doç. Dr. Arzu ULVİ

Necmettin Erbakan Üniversitesi, atekinay@erbakan.edu.tr - 0000-0001-7303-1869

Prof. Dr. Senar AYDIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, sozcan@erbakan.edu.tr - 0000-0002-0960-480X

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, meaydin@erbakan.edu.tr - 0000-0001-6665-198X

ÖZET

Polibromlu difenil eterler (PBDE) alev geciktirici olarak elektrikli ekipmanlarda, tekstilde, otomobillerde, plastiklerde yaygın olarak kullanılmaktadır. PBDE'lerin 1970 ile 2005 yılları arasında 1.3-1.5 milyon ton üretildiği tahmin edilmektedir. Halen kullanımda olan PBDE içeren ürünlerden ve atıklardan kaynaklı PBDE emisyonlarının 2050 yılına kadar devam etmesi beklenmektedir. Özellikle kentsel ve evsel atıksular, katı atık depolama sahası sızıntı suları, atmosferik çökelme yerüstü su kaynaklarına PBDE giriş yolları olarak değerlendirilebilir. Ayrıca atık arıtma tesisleri ve yakma fırınları da rezervuar ve emisyon kaynakları arasındadır. PBDE'ler havada, suda, toprakta, sedimentlerde hatta canlılarda bile tespit edilmektedirler. Bazı çalışmalarda yüzeysel sularda PBDE konjenerlerinin varlığı araştırılmıştır. Örneğin; 13 konjenerin toplam konsantrasyonu yüzeysel sularda Çin'de 0.002-0.127 ng/L aralığında, ABD'de 0.0001-0.010 ng/L aralığında tespit edilmiştir. Türkiye'nin en uzun nehri olan Kızılırmak nehrinde 6 PBDE (17, 47, 66, 100, 153, 183) konjeneri araştırılmış ve hepsi dedeksiyon limitinin altında tespit edilmiştir. Konya Kapalı Havzasında yapılan çalışmada ise 38 yüzeysel suda PBDE (PBDE47, PBDE100, PBDE99, PBDE154, PBDE153) konjenerleri araştırılmış ve toplam PBDE konsantrasyonları 0.96-74.5 ng/L aralığında tespit edilmiştir. Kirlenmiş gıdaların ve suyun tüketilmesi, hava içerisinde partiküllerin solunması insanların PBDE'lere başlıca maruz kalma yollarıdır. İnsanlar yaşamlarının büyük çoğunluğunu kapalı ortamlarda geçirmektedir. Havalandırma koşulları, temizlik alışkanlıkları, elektronik cihaz yoğunluğu ve ısıtıcı kullanımı ile bina yaşı gibi faktörlere bağlı maruziyet düzeyleri değişebilir. PBDE'ler ile kirlenmiş yüzeysel suları da bu kirleticilerin insanlara taşınmasında önemli rol oynamaktadır. Organik madde ve yağ dokusuna yüksek afinite gösteren bu kirleticiler sucul canlılarda birikip besin zincirine karışabilirler. Endokrin bozucu etkileri olan PBDE'ler tiroid ve hormonal dengeyi bozabilmektedirler.

Anahtar Kelimeler: Polibromlu difenil eter, PBDE, yüzeysel su.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

1. GİRİŞ

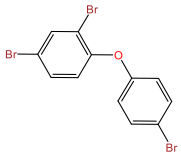
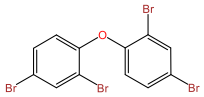
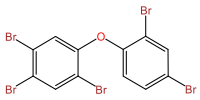
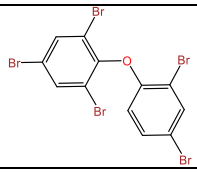
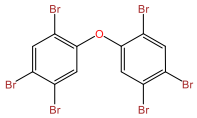
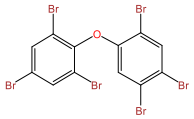
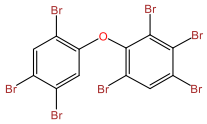
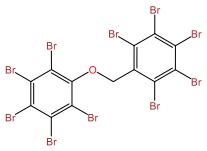
Polibromlanmış difenil eterler (PBDE'ler), plastikler, elektrikli ve elektronik ekipmanlar, tekstil, mobilya gibi ürünlere yaygın olarak eklenen ticari bir alev geciktiricidir. Uygun maliyetli ve verimli olmalarından dolayı en yaygın kullanılan alev geciktiricilerdendirler (Yao ve diğ., 2021; Jiang ve diğ., 2024). PBDE'ler iki fenil halkasına bağlı 2 ila 10 brom atomu içerir. İnsanlar tarafından üretilen PBDE'ler 10 yıla kadar uzun yarı ömürlere sahiptir ve hidrofobik özellik gösterir (Ohoro ve diğ., 2021). 209 PBDE konjeneri mevcuttur, bunlar brom atomlarının sayısı ve yerleşimleri ile ayırt edilir (Yue ve Li, 2013). Bu konjenerlerin karışımlarından oluşan üç tane ticari olarak formüle edilmiş karışım türü vardır. PentaBDE PBDE 47, 99, 100, 153 karışımında oluşup mobilya ve döşemelerde, OctaBDE PBDE 153,183, 197, 207, 196 karışımından oluşup elektronik ürünler ve plastiklerde, Deca PBDE ise 209 konjenerinden oluşup tekstilde kullanımı tercih edilir (Yao ve diğ., 2021; Ohoro ve diğ., 2021). Birleşmiş Milletler Çevre Programı 2012 raporuna göre, PBDE kullanımı mobilya ürünlerinde yaklaşık %60, araçlarda %36 ve diğer ürünlerde ise %4'dür (Paliya ve diğ. 2021).1970'ten beri PBDE (deka-BDE'ler, okta-BDE'ler ve penta-PBDE) üretiminin küresel olarak yaklaşık 1,5 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir (Motamedi ve diğ., 2022). Stockholm Sözleşmesi ile kalıcı organik kirletici sınıfına alınan bu üç ticari PBDE karışımı birçok ülkede 2000'li yıllarda aşamalı bir şekilde kullanımdan kaldırılmıştır (Yao ve diğ., 2021; Ohoro ve diğ., 2021). PentaBDE ve octaBDE karışımlarının üretimi 2004 yılında sona ererken, bazı ülkelerde decaBDE daha uzun süre üretilmiş ve kullanılmaya devam etmiştir. 2017 yılında Stockholm Sözleşmesinin ortadan kaldırılması gereken kimyasallar listesine dahil edilmiştir (Zhang ve diğ., 2017). Çin'de 1993-2018 yılları arasında DekaBDE üretimi 465 kiloton olup, bunun %13'ü ihraç edilmiş, yaklaşık %70'i elektrikli ve elektronik ekipmanlarda kullanılmıştır (Wang ve diğ., 2023). Uluslararası kısıtlamalar ve düzenleyici faaliyetler PBDE'lerin çevreye salınımını azaltmıştır. Ancak mevcut kullanılan ürünler, PBDE içeren atıklar, geri dönüşüm süreçleri çevresel ortamlardaki PBDE kalıntılarının devam etmesine sebep olmaktadır (Abbas ve diğ., 2026). Ticari penta, okta ve decaBDE karışımlarının kümülatif üretimlerinin sırasıyla 175, 130 ve 1600 kiloton olduğu tahmin edilmektedir (Abbasi ve diğ., 2019). Türkiye PBDE üretimi yapılmamıştır ancak imalatta kullanılmıştır (Demirtepe ve Imamoglu, 2019).

Çizelge 1'de ticari PBDE karışımlarında bulunan ve çevresel ortamlarda en sık tespit edilen 8 PBDE konjenerinin fizikokimyasal özellikleri verilmiştir. Mikrokirleticilerin çevresel akıbeti fizikokimyasal özellikleri ile ilgilidir. PBDE28 ve PBDE47 gibi düşük bromlanmış PBDE konjenerleri yüksek uçuculuk ve suda çözünürlük gösterirken, bromlanma derecesinin artmasıyla birlikte hidrofobiklik ve organik maddeye bağlanma isteği de artar. Böylece düşük bromluların atmosfer ve su ortamlarında yüksek bromluların ise askıda katı maddeler, toprak ve sedimentlerde bulunması beklenebilir. PBDE'ler kararlı, lipofilik yapıda, bozunmaya karşı dirençli, kalıcı, canlı organizmalarda biyobirikim ve belirgin biyobüyütme yapabilen kirleticilerdir.

Bu çalışmada PBDE'lerin özelliklerinden, yüzeysel sulardaki konsantrasyonlarından ve olası sağlık etkilerinden bahsedilmiştir.

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

Çizelge 1. PBDE'lerin fiziko kimyasal özellikleri (Wang ve diğ., 2023)

Bileşik	Kimyasal yapı	Molekül formülü	Molekül ağırlığı	Çözünürlük (mg/L) 25°C'de	Erime noktası (°C)	log K_{ow}	log K_{oc}
PBDE28		$C_{12}H_7Br_3O$	406.90	0.02642	139.9	5.88	3.91
PBDE47		$C_{12}H_6Br_4O$	485.79	0.001461	161.7	6.77	4.12
PBDE99		$C_{12}H_5Br_5O$	564.69	9×10^{-7}	182.8	6.84	4.34
PBDE100		$C_{12}H_5Br_5O$	564.69	0.04	102.0	6.51, 6.53	-
PBDE153		$C_{12}H_4Br_6$	627.59	4.08×10^{-6}	161.5	7.13, 7.08	-
PBDE154		$C_{12}H_4Br_6O$	643.59	4.08×10^{-6}	131.0-132.5	7.39	-
PBDE183		$C_{12}H_3Br_7O$	722.48	1.50×10^{-6}	171.0-173.0	7.14	-
PBDE209		$C_{12}Br_{10}O$	971.08	1.00×10^{-4}	254.5	12.1	5.44

2. POLİBROMLU DİFENİL ETERLER'İN YÜZEYSEL SULARDA VARLIĞI

PBDE'ler yasaklanma ve kısıtlanma çalışmalarına rağmen kalıcılık ve birikim özelliklerinden dolayı halen çevrede bulunmaktadır. PBDE'ler, farklı yollarla çevresel ortamlara karışırlar. Uçucu maddelerin doğrudan çevreye salınması, ürünlerin fiziksel aşınma ve yıpranma yoluyla çevreye salınması ve ürünlerin çevresel ortamlarla doğrudan temas etmesi yoluyla PBDE'ler çevresel ortamlara giriş yapabilirler (Wang ve diğ., 2023). Elektronik atıkların sökülmesi, çöp depolama alanlarından sızan sıvılar, atıksu deşarjı, endüstriyel

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1

faaliyetler başlıca yollardır (Abas ve diğ., 2026). PBDE'ler, atmosferik çökelme ve kontrolsüz deşarjlar yoluyla su ortamlarına giriş yapabilir (Wang ve diğ., 2023).

PBDE'lerin kullanıldıkları ürünler içinde kimyasal bağlarının olmaması, üretimlerinden bertaraf veya geri dönüşümlerine kadarki süreçlerde çevresel ortamlara karışmalarını kolaylaştırır. PBDE'ler sahip olduğu özelikler arasında düşük oktanol-hava dağılım katsayısı ve brom atomlarının artışıyla azalan uçuculuk özellikleri vardır. Böylece hava partiküllerinde daha fazla bulunabilir ve partiküller aracılığıyla uzun mesafelere taşınabilir. Böylece PBDE'ler birçok çevresel ortamda (hava, su, toprak, sediment) tespit edilebilen kirleticiler haline gelmiştir (Abas ve diğ., 2026; Paliya ve diğ., 2021). PBDE'ler, Antarktika ve Arktik bölgelerde bile tespit edilmiştir, bu da uzun mesafeler boyunca taşınabildiklerini doğrulamıştır (Aznar-Alemany ve diğ., 2019). PBDE'ler uçucu ve suda çözünürlükleri düşüktür ancak kimyasal olarak kararlıdır. Bu nedenle yaygın olarak su, toprak, sediment, biyolojik atıklar ve canlı organizmalarda tespit edilirler (Yue ve Li, 2013). Çevredeki PBDE'lerin mevcut ölçümlerine dayalı hesaplamalar, aerosoller tarafından ve hava-su gaz değişimi yoluyla okyanusa yıllık olarak sırasıyla 3.5 ve 135 ton PBDE'nin biriktiğini, nehirlerin ise yaklaşık 40 ton daha katkıda bulunduğunu göstermektedir (Turner, 2022). Çizelge 2'de yüzeysel sularda tespit edilen PBDE konjenerlerinin konsantrasyonları verilmiştir (Ma ve diğ., 2026).

Çizelge 2. Farklı ülkelerde yüzey sularında tespit edilen konsantrasyonlar (ng/L)

Ülke	PBDE 28/33	PBDE 47	PBDE 99	PBDE 100	PBDE 153	PBDE 154	PBDE 183	PBDE 209	Kaynak
Brezilya	<0.010-0.030	<0.010 2-6	<0.010-0.072	0.023-0.23	<0.022-0.040	<0.022-0.033	0.068-1.3	<0.11-0.45	Ma ve diğ., 2026
İsveç	-	nd-0.10	nd-0.12	nd-0.050	nd-0.15	-	nd-0.20	-	Gustavsson ve diğ., 2018
ABD	0.00049-0.0021	0.0056-0.0344	nd-0.070	0.00113-0.0106	0.0012-0.0064	0.00033-0.0042	0.00079-0.0033	0.0068-0.0168	Venier ve diğ., 2014
Meksika	220	260	240	210	200	210	210	-	Oregel-Zamudio ve diğ., 2021
Güney Afrika	-	4.27-190	-	4.25-178	4.97-8.00	-	5.13-8.80	-	Ohoro ve diğ., 2022
Güney Afrika	-	nd-84	-	nd-329	nd-131	-	nd-60	-	Olaniyan ve diğ., 2024
Çin	nd-28	nd-10	nd-16	nd-0.22	nd-15	nd-0.35	nd	nd-2.2	Ling ve diğ., 2021
Çin	0.18-2.16	nd-0.96	nd-2.20	nd-2.33	nd-1.24	nd-1.00	10.17-96.62	112.70-286.67	Luo ve diğ., 2021
Çin	nd-1.76	nd-0.36	nd-0.62	nd-0.94	nd-0.49	nd-0.41	nd	-	Wang ve diğ., 2023
Çin	nd-0.89	nd-1.23	nd-0.87	nd-0.71	nd-1.24	nd-1.43	nd-1.26	nd-10.5	Hou ve diğ., 2019
Güney Kore	nd-0.13	nd-6.15	nd-2.46	nd	nd-10.4	nd-0.21	nd-0.26	nd-1.15	Lee ve diğ., 2020

Türkiye	-	0.13-73.1	0.09-0.40	0.07-0.92	0.13-1.46	0.16-1.17	-	-	Ulvi ve diğ., 2025

Brezilya, İsveç, ABD ülkelerinde yapılan çalışmalarda tespit edilen konsantrasyonlar düşük, Meksika, Güney Kore, Güney Afrika'da gerçekleştirilen çalışmalarda ise yüksek konsantrasyonlarda tespit edilmiştir. Çin de gerçekleştirilen çalışmalar da ise PBDE 183 ve 209 konjeneri yüksek, diğer konjenerler düşük konsantrasyonda tespit edilmiştir. Abbass ve diğ., (2026) hava, toprak, sediment, su, iç mekan tozu, çökeltilerde yapılan 17 çalışmayı incelemişler ve PBDE209, 99 ve 47 konjenerlerinin baskın konjenerler olduğunu bildirmişleridir.

2025 yılında Türkiye'de gerçekleştirilen çalışmada Konya Kapalı Havzasından 38 yüzeysel su örneği alınmıştır. Alınan örneklerde PBDE (PBDE47, PBDE100, PBDE99, PBDE154, PBDE153) kirliliği araştırılmıştır. Su numunelerinde toplam PBDE konsantrasyonları 0.96-74.5 ng/L aralığında tespit edilmiştir. Su numunelerinde PBDE47 kongeneri baskın tespit edilmiştir. RQ (Risk Quotient, Risk Katsayısı) yöntemi ile yapılan risk değerlendirmesinde PBDE47 kongeneri balık, *Daphnia magna* ve alg için iki yüzeysel su kaynağında yüksek dereceli risk, PBDE154 ve PBDE153 balık için üç yüzeysel su kaynağında yüksek dereceli risk, PBDE154 *Daphnia magna* için iki, PBDE153 *Daphnia magna* için üç yüzeysel su kaynağında yüksek dereceli risk oluşturduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar diğer ülkelerde bulunan sonuçlar ile karşılaştırıldığında PBDE47 Brezilya, İsveç, ABD, Çin, Güney Kore'de yüzeysel sularda tespit edilen konsantrasyonlardan oldukça yüksek, Güney Afrika'daki konsantrasyonlar ile benzer, Meksika'daki konsantrasyonlardan düşük tespit edilmiştir. PBDE99, PBDE100, PBDE153, PBDE154 konjenerleri Meksika ve Güney Afrika'daki konsantrasyonlardan düşük, diğer ülkeler ile benzer konsantrasyonlarda tespit edilmiştir.

3. POLİBROMLU DİFENİL ETERLER'İN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNE ETKİLERİ

İnsanlar solunum, yutma ve deri yoluyla temas ile PBDE'lere maruz kalmaktadırlar. Başlıca maruz kalma yolu ise PBDE'ler ile kirlenmiş iç mekan havasının solunması ve kirlenmiş gıdaların tüketilmesidir (Abass ve diğ., 2026; Gomes ve diğ., 2024). PBDE'ler elektronik atıklar, ev tozu ve besin zincirinde biyobirikim yoluyla insan vücuduna girebilmektedir. Besin zincirinde trofik seviyelerde üst sıralara çıkıldıkça PBDE birikimi de artmaktadır. Tarım ürünleri ve bitkiler, kirlenmiş toprak, su ve hava yoluyla kirlenebilirken, çiftlik hayvanları kontamine yemleri ve suları tüketerek PBDE'leri bünyelerine alabilirler (Gao ve diğ., 2024). Annelerin beslenme yolu ve ev tozu ile maruz kaldığı PBDE kirliliği anne sütünün yağlı yapısı sebebiyle anne sütünde birikebilmekte ve bebeklere ulaşabilmektedir (Gomes ve diğ., 2024). Yapılan bazı çalışmalarda anne sütünde PBDE bileşikleri tespit edilmiştir. Örneğin Konya'da 45 anne sütü örneği incelenmiş ve ΣPBDE ortalama konsantrasyonu 67.34 ng/g lipid olarak bildirilmiş (Özcan ve diğ., 2011). ABD'de yapılan bir çalışmada ise anne sütlerinde ΣPBDE 1.46–1170 ng/g lipid aralığında tespit edilmiş (Schreder ve diğ, 2023). Bu tespitler PBDE'lerin insan vücuduna girdikten sonra birikebildiğini de göstermektedir.

PBDE'lerin insanlar üzerindeki birçok olumsuz etkisi giderek artan bir endişeyle sebep olmaktadır. PBDE'ler karaciğer hasarı, tiroid hormonu bozukluğu, nörotoksisite, genotoksisite

ve bağışıklık sistemi bozuklukları, üreme bozuklukları ve insanlarda olası kanserojenite ile birlikte çeşitli istenmeyen etkilere neden olabilmektedirler. Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC), PBDE'leri 3. grup kanserojen olarak sınıflandırmıştır (Ohoro ve diğ., 2021). İnsanlarda doğrudan kanserojenliğe dair kanıtlar sınırlı olsa da, hayvan çalışmaları bazı PBDE konjenerlerinin karaciğer tümörlerine neden olabileceğini göstermiştir.
Bazı çalışmalarda genotoksisite, oksidatif stres indüksiyonu ve endokrin bozulması dahil olmak üzere potansiyel kanserojen etki mekanizmaları olduğunu bildirmiştir (Doming ve diğ., 2025).

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

PBDE'ler fizikokimyasal özelliklerinden dolayı toksik, kalıcı ve biyolojik yapılarda birikim gösterebilen kirleticilerdir. Farklı yollarla insanlara ulaşabilirler ve yüzeysel su kaynakları bu süreçte önemli bir basamaktır. Çalışmalar yüzeysel sularda PBDE'lerin varlığını ve hava, toprak, sediment ve sular arasında taşınarak bir döngü içerisinde olduğunu göstermektedir. İnsan sağlını olumsuz etkileyen, 3. sınıf kanserojen olarak sınıflandırılan bu kirleticiler artık dünyanın birçok ülkesinde üretilmemektedir. Ömrünü tamamlamış PBDE içeren eşya ve ekipmanların atılması, bertarafı ve geri dönüşümü en önemli kaynaklarıdır. Bu yüzden öncelikle uygun atık bertaraf ve geri dönüşüm yöntemleri geliştirilmesi çevresel konsantrasyonlarını kontrol altında tutmak için önemlidir.

KAYNAKÇA

Abass, K., Stamenovic, J., Masood, M. A., Kumari, M., Shanableh, A., & Semerjian, L. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) contaminations across environmental compartments in the Middle East and North Africa. Environmental Research, 298, 124264. (2026). https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.124264

Abbasi, G., Li, L., & Breivik, K. Global Historical Stocks and Emissions of PBDEs. Environmental Science & Technology, 53(11), 6330–6340. 2019. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07032

Aznar-Alemany, O., Yang, X., Alonso, M.B., Costa, E.S., Torres, J.P.M., Malm, O., et al., Preliminary study of long-range transport of halogenated flame retardants using Antarctic marine mammals. Sci. Total Environ. 650, 1889–1897. 2019.

Cristale, J., Katsoyiannis, A., Sweetman, A. J., Jones, K. C., & Lacorte, S. Occurrence and risk assessment of organophosphorus and brominated flame retardants in the River Aire (UK). Environmental Pollution, 179, 194–200. 2013. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.001

Demirtepe, H., & Imamoglu, I. Levels of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in treatment plant sludge: Implications on sludge management. Chemosphere, 221, 606–615. 2019. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.060

Domingo, J. L., Souza, M. C. O., Nadal, M., & Barbosa, F. A One Health approach to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): Integrating human, animal, and environmental

health perspectives. Chemosphere, 386, 144644. 2025. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144644

Gao, J., Xie, Z., Wang, Z., Yu, Y., Qi, Z., Yu, X., Zhong, T., Wang, L., Feng, K., Peng, Y., & Xiao, Y. Human Toxicity of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) and Their Derivatives: A Comprehensive Review. Current Research in Food Science, 100918. 2024. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100918

Gomes, J., Kumarathasan, P., & Begum, M. Exposure to PBDEs and maternal and infant health outcomes: Systematic review. Chemosphere, 140367. 2023. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140367

Gustavsson, J., Wiberg, K., Ribeli, E., Nguyen, M. A., Josefsson, S., & Ahrens, L. Screening of organic flame retardants in Swedish river water. Science of The Total Environment, 625, 1046–1055. 2018. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.281

Hou, L., Jiang, J., Gan, Z., Dai, Y., Yang, P., Yan, Y., Ding, S., Su, S., & Bao, X. Spatial Distribution of Organophosphorus and Brominated Flame Retardants in Surface Water, Sediment, Groundwater, and Wild Fish in Chengdu, China. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 77(2), 279–290. 2019. https://doi.org/10.1007/s00244-019-00624-x

Jiang, L., Yang, J., Yang, H., Kong, L., Ma, H., Zhu, Y., Zhao, X., Yang, T., & Liu, W. Advanced Understanding of the Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs): Insights from Total Environment to Intoxication. Toxicology, 153959. 2024. https://doi.org/10.1016/j.tox.2024.153959

Lee, H.-K., Lee, S., Lim, J.-E., & Moon, H.-B. Legacy and novel flame retardants in water and sediment from highly industrialized bays of Korea: Occurrence, source tracking, decadal time trend, and ecological risks. Marine Pollution Bulletin, 160, 111639. 2020. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111639

Ling, S., Lu, C., Peng, C., Zhang, W., Lin, K., & Zhou, B. Characteristics of legacy and novel brominated flame retardants in water and sediment surrounding two e-waste dismantling regions in Taizhou, eastern China. Science of The Total Environment, 794, 148744. 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148744

Luo, Y., Shi, W., You, M., Zhang, R., Li, S., Xu, N., & Sun, W. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the Danjiangkou Reservoir, China: identification of priority PBDE congeners. Environmental Science and Pollution Research. 2020. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11254-5

Ma, Y., Santacruz Salas, A. P., Burgos Melo, H. D., Wang, S., Jin, J., Júnior, E. S., Rosa, A. H., & Harrad, S. Distribution characteristics and ecotoxicological risks of typical organic flame retardants and plasticisers in the Amazon River basin around Manaus, Brazil. Environmental Research, 297, 124125. 2026. https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.124125

Moon, H.-B., Choi, M., Yu, J., Jung, R.-H., & Choi, H.-G. Contamination and potential sources of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in water and sediment from the artificial Lake Shihwa, Korea. Chemosphere, 88(7), 837–843. 2012. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.03.091

Ohoro, C. R., Adeniji, A. O., Okoh, A. I., & Okoh, O. O. Polybrominated diphenyl ethers in the environmental systems: a review. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 19(1), 1229–1247. 2021. https://doi.org/10.1007/s40201-021-00656-3

Ohoro, C. R., Adeniji, A. O., Semerjian, L., Okoh, A. I., & Okoh, O. O. Occurrence and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Water and Sediment of Nahoon River Estuary, South Africa. Molecules, 27(3), 832. 2022. https://doi.org/10.3390/molecules27030832

Olaniyan, O. O., Adeniji, A. O., Okoh, A. I., & Okoh, O. O. Occurrence and risk assessment of polybrominated diphenyl ethers in surficial water and sediment from Buffalo River estuary, South Africa. Marine Pollution Bulletin, 209, 117176. 2024. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117176

Oregel-Zamudio, E., Alvarez-Bernal, D., Franco-Hernandez, M. O., Buelna-Osben, H. R., & Mora, M. Bioaccumulation of PCBs and PBDEs in Fish from a Tropical Lake Chapala, Mexico. Toxics, 9(10), 241. 2021. https://doi.org/10.3390/toxics9100241

Ozcan, S., Tor, A., & Aydin, M. E. Levels of Organohalogenated Pollutants in Human Milk Samples from Konya City, Turkey. CLEAN- Soil, Air, Water, 39(10), 978–983. 2011. https://doi.org/10.1002/clen.201100068

Paliya, S., Mandpe, A., Bombaywala, S., Kumar, M. S., Kumar, S., & Morya, V. K. Polybrominated diphenyl ethers in the environment: a wake-up call for concerted action in India. Environmental Science and Pollution Research, 28(33), 44693–44715. 2021. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15204-7

Schreder, E., Zheng, G., Sathyanarayana, S., Gunaje, N., Hu, M., & Salamova, A. Brominated flame retardants in breast milk from the United States: First detection of bromophenols in U.S. breast milk. Environmental Pollution, 122028. 2023. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122028

Turner, A. PBDEs in the marine environment: Sources, pathways and the role of microplastics. Environmental Pollution, 301, 118943. 2022. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118943

Ulvi, A., Aydın, S., Aydın M.E., Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Water Sources and Sediments of the Konya Closed Basin and Environmental Risk Assessment. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences. 31(7), 1307-1320, 2025. https://doi.org/10.5505/pajes.2025.68639

Venier, M., Dove, A., Romanak, K., Backus, S., & Hites, R. Flame Retardants and Legacy Chemicals in Great Lakes' Water. Environmental Science & Technology, 48(16), 9563–9572. 2014. https://doi.org/10.1021/es501509r

Wang, N., Lai, C., Xu, F., Huang, D., Zhang, M., Zhou, X., Xu, M., Li, Y., Li, L., Liu, S., Huang, X., Nie, J., & Li, H. A review of polybrominated diphenyl ethers and novel brominated flame retardants in Chinese aquatic environment: Source, occurrence, distribution, and ecological risk assessment. Science of The Total Environment, 166180. 2023. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166180

Wang, Y., Feng, Y., Chen, Y., Li, T., Tan, Y., Ma, Y., & Zhang, Z. Annual flux estimation and source apportionment of PCBs and PBDEs in the middle reach of Yangtze River, China. Science of The Total Environment, 163772. 2023. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163772

Yao, B., Luo, Z., Zhi, D., Hou, D., Luo, L., Du, S., & Zhou, Y. Current progress in degradation and removal methods of polybrominated diphenyl ethers from water and soil: A review. Journal of Hazardous Materials, 403, 123674. 2021. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123674

Zhang, B., Zhao, B., Yu, M., & Zhang, J. Emission inventory and environmental distribution of decabromodiphenyl ether in China. Science of The Total Environment, 599-600, 1073–1081. 2017. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.060

ISBN NR. : 978-625-8795-43-1