ISSN: 2687-3729



Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Year (Yıl): 2025, **Volume** (Cilt):8, **Number** (Sayı): **5**

Dergi Sahibi / Owner

Prof. Dr. Turgay UZUN

Rektör

Sorumlu Müdür / Director

Prof. Dr. Hasan DEMİR

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Tugay AYAŞAN

Yardımcı Editorler / Associate Editors

Doç. Dr. Muhammed ORDU
Doç. Dr. Özge SÜFER
Dr. Öğretim Üyesi Aybüke LEBA

ISSN: 2687-3729



Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Editorial Board

(Editör Kurulu)

Prof. Dr. Çağdaş AKPINAR	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	cagdasakpinar@osmaniye.edu.tr
Prof. Dr. Mehmet BİLGİLİ	Çukurova Üniversitesi, ADANA	mbilgili@cu.edu.tr
Prof. Dr. İsa COŞKUN	Kırşehir Ahievran Üniversitesi, KIRŞEHİR	isa.coskun@ahievran.edu.tr
Prof. Dr. Güray ERENER	Ondokuz Mayıs Üniversitesi, SAMSUN	gerener@omu.edu.tr
Prof. Dr. Hasan Basri İLA	Çukurova Üniversitesi, ADANA	ila@cu.edu.tr
Prof. Dr. Hakan İNCİ	Bingöl Üniversitesi, BİNGÖL	hakaninci2565@hotmail.com
Prof. Dr. Murat KÖKSAL	Cumhuriyet Üniversitesi, SİVAS	mkoksal@cumhuriyet.edu.tr
Prof. Dr. Başak DOĞRU MERT	Adana Alpaslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, ADANA	bdogrumert@atu.edu.tr
Prof. Dr. Hüsniye Aka SAĞLIKER	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	hasagliker@osmaniye.edu.tr
Prof. Dr. Aslıhan SEZGİN	Amasya Üniversitesi, AMASYA	aslihan.sezgin@amasya.edu.tr
Prof. Dr. Bahri Devrim ÖZCAN	Çukurova Üniversitesi, ADANA	dozcan@cu.edu.tr
Prof. Dr. Esra UÇAR SÖZMEN	Cumhuriyet Üniversitesi, SİVAS	eucar@cumhuriyet.edu.tr
Doç. Dr. Behçet DÜNDAR	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	behcetdundar@osmaniye.edu.tr
Doç. Dr. Betül GIDIK	Bayburt Üniversitesi, BAYBURT	betulgidik@bayburt.edu.tr
Doç. Dr. Esra GÜRSOY	Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, AĞRI	egursoy@agri.edu.tr
Doç. Dr. Pembe SABANCIGİL ÖZDER	Doğu Akdeniz Üniversitesi, KKTC	pembe.sabancigil@emu.edu.tr
Doç. Dr. Behlül SEVİM	Aksaray Üniversitesi, AKSARAY	behluls68@gmail.com
Doç. Dr. Mustafa SEVİNDİK	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	mustafasevindik@osmaniye.edu.tr
Doç. Dr. Dilek TEKDAL	Mersin Üniversitesi, MERSİN	dilektekdal@mersin.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Hediye Kirli AKIN	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	hediyeakin@osmaniye.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Hayriye Serra ALTINOLUK	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, MUĞLA	serraltinoluk@mu.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Sevda İNAN	Namık Kemal Üniversitesi, TEKİRDAĞ	sevdainan@nku.edu.tr
Dr. Mihaela SARACILA	National Research-Development Institute for Animal Biology and Nutrition, ROMANIA	mihaela.saracila@yahoo.com
Prof. Dr. Vincenzo TUFARELLİ	University of Bari Aldo Moro, ITALY	vincenzo.tufarelli@uniba.it

Alan Editörleri Konu Editörleri Subject Editors

Prof. Dr. Ertaç HÜRDOĞAN	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	ehurdogan@osmaniye.edu.tr
Prof. Dr. Sadrettin YÜKSEL	Atatürk Üniversitesi, ERZURUM	sadrettin71@hotmail.com
Doç. Dr. Hatun BARUT	Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, ADANA	baruthatun@yahoo.com
Doç. Dr. Ali BOLAT	Adıyaman Üniversitesi, ADIYAMAN	alibolat@adiyaman.edu.tr
Doç. Dr. Ceren KARAMAN	Akdeniz Üniversitesi, ANTALYA	cerenkaraman@akdeniz.edu.tr
Doç. Dr. Jülide ÖNER	Uşak Üniversitesi, UŞAK	julide.oner@usak.edu.tr
Doç. Dr. Özge ÖZTEKİN	Gaziantep Üniversitesi, GAZİANTEP	ozgedzozr@gmail.com
Doç. Dr. Mansur Seymen SEĞMENOĞLU	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	mansurseymen@gmail.com
Doç. Dr. Şeyda ŞAHİN	Cumhuriyet Üniversitesi, SİVAS	seydasahin@cumhuriyet.edu.tr
Doç. Dr. Nermin MERVE YALÇINKAYA	Çukurova Üniversitesi, ADANA	nbaykan@cu.edu.tr

Dil Editörleri Language Editors

Doç. Dr. Özlem DURNA	Unıversita Degli Studi Di Milano, ITALY	odurna36@gmail.com
Doç. Dr. Pınar USTA EVCİ	Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ISPARTA	pinarusta@isparta.edu.tr
Doç. Dr. Negar TEBRİZLİ	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	negartebrizli@osmaniye.edu.tr
Doç. Dr. Kushvar MAMEDOVA	Azerbaijan State Agricultural Unıversity, AZERBAİJAN	kgmammadova@gmail.com
Dr. Öğretim Üyesi Fatih ÜNAL BOZDAĞ	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	fatihbozdag@osmaniye.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Beste Gizem ÖZBEY	Ankara Üniversitesi, ANKARA	beste.ozbey@ankara.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Pırıl TEKİN	Adana Alpaslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, ADANA	ptekin@atu.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Somayyeh RAZZAGHİ	Erciyes Üniversitesi, KAYSERİ	srazzaghi@erciyes.edu.tr

Yazım Editörleri Spelling Editors

Prof. Dr. Demet ÖZKIR	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, NİĞDE	dozkir@ohu.edu.tr
Doç. Dr. Buse EMİRLER	Çukurova Üniversitesi, ADANA	bemirler@cu.edu.tr
Doç. Dr. Merve GÖRE	Ege Üniversitesi Ödemiş Meslek Yüksekokulu, İZMİR	merve.gore@ege.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Oğuzhan DER	Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, BANDIRMA	oder@bandirma.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Nursel ÇÖL KESKİN	Selçuk Üniversitesi, KONYA	nurselcol@selcuk.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Şimal KÜRÜMOĞLU	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, TEKİRDAĞ	skurumoglu@nku.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Emre YILDIRIM	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	emreyildirim@osmaniye.edu.tr
Dr. Ar. Gör. Tuğçe KAYA	Çukurova Üniversitesi, ADANA	tkaya8789@gmail.com
Dr. Öğretim Gör. Özge KOL	Beykent Üniversitesi, İSTANBUL	ozgekol@beykent.edu.tr

İstatistik Editörleri Statistics Editors

Prof. Dr. Şenol ÇELİK	Bingöl Üniversitesi, BİNGÖL	senolcelik@bingol.edu.tr
Doç. Dr. Hatice HIZLI	Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, ADANA	haticehizli@gmail.com

Mizanpaj Editörleri Layout Editors

Prof. Dr. Özen ÖZER	Kırklareli Üniversitesi, KIRKLARELİ	ozenozer@klu.edu.tr
Doç. Dr. Nehir TOKGÖZ	Sakarya Üniversitesi, SAKARYA	nehirtokgoz@sakarya.edu.tr
Doç. Dr. Hatice TÜRKTEN	Ondokuz Mayıs Üniversitesi, SAMSUN	hatice.turkten@omu.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Benian Pınar AKTEPE	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	benianaktepe@osmaniye.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Nuray İnan ÇANKIR	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	nurayinan@osmaniye.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Selçuk YEŞİLTEPE	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	selcukyesiltepe@osmaniye.edu.tr
Dr. Öğretim Gör. Burcu Sünbül AYHAN	Türk-Alman Üniversitesi, İSTANBUL	burcu.ayhan@tau.edu.tr
Dr. Öğretim Gör. Rabia ACEMİOĞLU	Iğdır Üniversitesi, IĞDIR	rabia.acemioglu@igdir.edu.tr

*Mizanpaj editörleri, çıkan sayılara göre değişiklik gösterebilecektir.

Son Okuyucu Editörleri Final Reader Editors

Prof. Dr. Hatice ÇITAKOĞLU	Erciyes Üniversitesi, KAYSERİ	hcitakoglu@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Aslı ABDULVAHİTOĞLU	Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi, ADANA	aabdulvahitoglu@atu.edu.tr
Doç. Dr. Burcu TAYLAN	Ege Üniversitesi, İZMİR	burcu.taylan@ege.edu.tr
Doç. Dr. Orhan ERMETİN	Yozgat Bozok Üniversitesi, YOZGAT	orhan.ermetin@yobu.edu.tr
Doç. Dr. Nesrin ADIGÜZEL	Atatürk Üniversitesi, ERZURUM	nesrin.adiguzel@atauni.edu.tr
Dr. Öğretim Üyesi Tuğçe GÖVER	Selçuk Üniversitesi, KONYA	tugcegover@gmail.com
Öğretim Gör. Tuba SAYGILI YILDIRIM	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	tubasaygiliyildirim@osmaniye.edu.tr
Dr. Ar. Gör. Kadriye KURŞUN	Çukurova Üniversitesi, ADANA	kadriyehatipoglu01@gmail.com
Dr. Ar. Gör. Ezgi EREN	Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi, ADANA	eeren@atu.edu.tr

*Birden fazla rolü olan editörler, tek bir kısımda yazılmıştır

ISSN: 2687-3729



Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (OKÜ Fen Bil. Enst. Dergisi) hakemli bir dergidir.

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi yılda **5 kez** yayınlanmaktadır (**Ocak, Mart, Haziran, Eylül ve Aralık**).

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology (OKU Journal of Institute of Sci and Tech) is a peer-reviewed journal.

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology is published **five times in a year (January, March, June, September and December).**

Dergi İçin Yazışma Adresi / Correspondence Address

Prof. Dr. Tugay AYASAN (Editor in Chief)

Osmaniye Korkut Ata University, Osmaniye-TÜRKİYE

e-mail: tugayayasan@osmaniye.edu.tr

Web link: https://dergipark.org.tr/tr/pub/okufbed

ISSN: 2687-3729



Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Year (Yıl): 2025, **Volume** (Cilt):8, **Number** (Sayı): **5**

CONTENTS (İçindekiler)

RESEARCH ARTICLES (ARAŞTIRMA MAKALELERİ)	**Sayfalar**
Bahar ACAY ÖZTÜRK **The Impact of Caputo Fractional Derivative on Mathematical Modeling of Tuberculosis Disease** *Tüberküloz Hastalığının Matematiksel Modellemesine Caputo Kesirli Türevinin Etkisi*	2039-2056
Tayfun UYGUNOĞLU, Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN **Çimento Esaslı Harçlarda Faz Değiştiren Malzeme Tipinin Harcın Reolojik, Fiziksel ve Mekanik Özeliklerine Etkisinin Araştırılması** *Investigation of the Effect of Phase Change Material Type on Rheological, Physical and Mechanical Properties of Cement Based Mortars*	2057-2078
Hakan SARIKAYA, Gülşah SUSURLUK **Jüt Lif Uzunluğu ve Katkı Oranının Sürdürülebilir Beton Tasarımında Mekanik ve Isı Yalıtım Özelliklerine Etkisi** *Effect of Jute Fiber Length and Content Ratio on Mechanical and Thermal Insulation Properties in Sustainable Concrete Design*	2079-2093
Yasin GÜRCAN, Arzum IŞITAN **Determination of The Optimum Surface Roughness of AISI D2 Cold Work Tool Steel for Industrial Boronizing Applications** *Endüstriyel Borlama Uygulamaları için AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Optimum Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi*	2094-2110
Demet HANÇER AYDEMİR **Exploring the Antibacterial Potential of *Laurus nobilis* Essential Oil and the Synergistic Interaction with 1,8-Cineole and Gentamicin Against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*** *Laurus nobilis Esansiyel Yağının Antibakteriyel Potansiyelinin ve 1,8-Sineol ile Gentamisin Arasındaki Sinerjik Etkileşimin Metisiline Dirençli Staphylococcus aureus'a Karşı İncelenmesi*	2111-2132
Celal MERDANE, Kamil ÇÖLBAY, Orhan ENGİN **Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Araştırılması: Bibliyometrik Analiz** *Investigation of the Hybrid Flowshop Scheduling Problems: Bibliometric Analysis*	2133-2150

Harun ÇİMENKAYA, Fatma Gül GÖZE ÖZDEMİR, Şerife Evrim ARICI **Domateste *Meloidogyne incognita* ve *Fusarium oxysporum f.sp. radicis lycopersici* Hastalık Kompleksinin Abamektin, *Bacillus thuringiensis ve Bacillus subtilis* Kullanılarak Mücadelesi** *Control of Meloidogyne incognita and Fusarium oxysporum f.sp. radicis lycopersici Disease Complex in Tomato Using Abamectin, Bacillus thuringiensis and Bacillus subtilis*	2151-2164
Fatmanur ATEŞ, Ramazan ŞENOL **Uçak Eğim Kontrolü için Gri Kurt Optimizasyonu ile Genetik Algoritma Tabanlı Hibrit Algoritmayla PID Denetleyici Tasarımı** *Design of PID Controller with Genetic Algorithm Based Hybrid Algorithm with Grey Wolf Optimization for Aircraft Pitch Control*	2165-2187
Seda KUL **Harmonic Evaluation of Electric Vehicle Charging Rectifier Circuits** *Elektrikli Araçlar için Şarj Doğrultucu Devrelerinin Harmonik Değerlendirmesi*	2188-2200
Metin ÖZLEKLİ **İnşaat Mühendisliğinde Yapay Zekâ Konusundaki Lisansüstü Tezlerin Bibliyometrik Analizi** *Bibliometric Analysis of Graduate Theses on Artificial Intelligence in Civil Engineering*	2201-2220
Tuğçe KAYA **The Impact of Barley, Wheat, Maize, Cotton and Olive Production in Türkiye on Climate Change** *Türkiye'de Arpa, Buğday, Mısır, Pamuk ve Zeytin Üretiminin İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi*	2221-2238
Zehra Tuğba MURATHAN, Hacer BOYRAZ, Nurcan ERBİL, Mehmet ARSLAN **Zeytinyağı Maserasyon Tekniğiyle Üretilmiş Bazı Tıbbi Bitki Yağlarının Biyolojik Özelliklerinin Belirlenmesi** *Determination of Biological Properties of Some Medicinal Plant Oils Produced by Olive Oil Maceration Technique*	2239-2251
Şerif KAHRAMAN **Determination of Agricultural Performances of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Under Diyarbakır Ecological Conditions** *Aspir (Carthamus tinctorius L.) Çeşitlerinin Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Tarımsal Performanslarının Belirlenmesi*	2252-2262
Yakup ÖNAL, Mitat ÖZTÜRK **Enhancement of Highway Subgrade Soil Strength Using Cement-Coated Textile Waste (CCTW) with Varying Inclusion Rates and Aspect Ratios** *Farklı Katılım Oranları ve En Boy Oranları ile Çimento Kaplanmış Tekstil Atığı (CCTW) Kullanılarak Karayolu Alt Taban Zemini Mukavemetinin Artırılması*	2263-2276
Kenan SAKA, Abdulkadir AYANOGLU **Elektrikli ve Konvansiyonel Otomobil Klimalarının Donanımsal Karşılaştırılması** *Hardware Comparison of Electric and Conventional Automobile Air Conditioners*	2277-2290
Buğra HATİPOĞLU, Hüseyin AYDİLEK, Mustafa Yasin ERTEN, Fikret YALÇINKAYA, Murat LÜY **Ensemble Learning Approach on MNIST/Fashion MNIST Dataset Using Weighted Majority Voting** *Ağırlıklı Çoğunluk Oylaması Kullanarak MNIST/Fashion MNIST Veri Setinde Topluluk Öğrenmesi Yaklaşımı*	2291-2310
Onur DOĞAN	2311-2326

Maden Endüstrisinde L Tipi Matris ve SWARA Yöntemlerine Dayalı Riskleri Değerlendirme ve Önceliklendirme Modeli: Örnek Bir Uygulama *A Risk Assessment and Prioritization Model Based on L-Type Matrix and SWARA Methods in the Mining Industry: A Case Study*	
Alpönder YILDIZ, Esra Tuğçe GÜL, Ahmet Engin TÜZÜN, Osman OLGUN **Biyotin ile Zenginleştirilmiş Rasyonların Damızlık Bıldırcınlarda Performansa, Yumurta Kalitesine ve Kuluçka Parametrelerine Etkisi** E*ffects of Biotin Enriched Diets on Performance, Egg Quality and Hatchability Parameters in Breeding Quails*	2327-2335
Yusuf ARSLAN, Sevda HASTAOĞLU ÖRGEN **Yenilebilir Böcekler Hakkında Sağlık Eğitimi Alan Öğrencilerin Tutum Analizi** *Attitude Analysis of Students Receiving Health Education Towards Edible Insects*	2336-2352
Ali Erkan KARAMAN, Barış ÖZKUL, G. Sakhi HAMID **Küçük ve Orta Ölçekli Şantiyelerde İş Ekipmanların Sağlık ve Güvenlik Şartlarının Araştırılması** *Investigation of Health and Safety Conditions of Work Equipment in Small and Medium-Scale Construction Sites*	2353-2366
Pınar SARIOĞLU ALTIN, Özlem YURTSEVER **Sürdürülebilir Kampüs Yönetiminde Risk Temelli Yaklaşım: Fine-Kinney Yöntemiyle Meslek Yüksekokulu Örneği** *A Risk-Based Approach to Sustainable Campus Management: A Case Study at a Vocational School Using the Fine-Kinney Method*	2367-2390
Demet ÖZKIR **Unveiling the Corrosion Inhibition Potential of *Orbea variegata* Extract: A Sustainable, Bio-Based Novel Inhibitor for Mild Steel in HCl** *Orbea variegata Ekstraktının Korozyon İnhibisyon Potansiyelinin Ortaya Konulması: HCl Çözeltisindeki Yumuşak Çelik İçin Sürdürülebilir ve Biyo-Kaynaklı Yeni Bir Yeşil İnhibitör*	2391-2404
Rabia ACEMİOĞLU, Tohit GÜNEŞ **Ortaokul Öğrencilerinin Beslenme Alışkanlıklarının Belirlenmesi: Geçerlik ve Güvenirlik Çalışması** *Determination of Nutritional Habits of Secondary School Students: Validity and Reliability Study*	2405-2419
İlknur YARDIMCI COŞKUN, Murat BASKAK, Mehmet TANYAŞ **Dijital Depo Yönetiminde Kritik Başarı Etmenlerinin DEMATEL Yöntemiyle Analizi** *An Analysis of Critical Success Factors in Digital Warehouse Management Using the DEMATEL Method*	2420-2448
Enes KAVUN, Ertaç HÜRDOĞAN **Bina Enerji Performansı Değerlendirmesinde Simülasyon Programlarının Kullanımı: TRNSYS Uygulamaları** *Use of Simulation Programs in Building Energy Performance Evaluation: The TRNSYS Applications*	2449-2463
Hakkı GÜNGÖR **A Robust Study on Atangana-Baleanu Fractional Coupled Burgers Equation** *Atangana-Baleanu Kesirli Coupled Burgers Denklemi Üzerine Güçlü Bir Çalışma*	2464-2482
İbrahim ÖZTÜRK, Furkan Sinan GÜRBAZ **Türkiye'de Konut Fiyat Endeksi için Hedonik Model Analizi: Osmaniye Örneği** *Hedonic Analysis for Residential Property Price Index in Turkey: A case study of Osmaniye*	2483-2515
Duygu KESER **Türkiye' de Yetiştirilen Havuçların Kimyasal ve Biyoaktif Bileşimlerinin Belirlenmesi** *Determination of Chemical and Bioactive Compositions of Carrots Grown in Türkiye*	2516-2528

İhsan KOCA, Yıldız BEKTAŞ BİRCAN, Serdar GÖKDEMİR **Havacılıkta Görev Ortaklığı Çağı: İnsanlı-İnsansız Uçuş Konsepti ve Uygulamaları** *The Era of Mission Partnership in Aerospace: Applications of Manned-Unmanned Teaming*	2529-2545
REVIEWS	
Güney AKINOĞLU, Songül RAKICIOĞLU, Salih DEMİRKAYA, Zerrin CİVELEK, Ayhan HORUZ, İlayda KULEYİN **Kimyasal ve Organik Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri** *Effects of Chemical and Organic Fertilizers on Soil Health*	2546-2573
Berra ÖZ, Ali Hakan IŞIK **Akciğer ve Meme Kanserinde Yapay Zekâ: LLM ve LVM ile Öneriler** *Artificial Intelligence in Lung and Breast Cancer: Recommendations with LLM and LVM*	2574-2593
Emel Ceyhun SABIR **Tekstil Bazlı ve Kompozit Yapıda Yara Örtücü Malzemeler: Bir Derleme Çalışması** *Textile-Based and Composite Wound Dressing Materials: A Review Study*	2594-2616
Derya ÇEVİK TAŞDEMİR **Teknolojinin İş Sağlığı ve Güvenliği Üzerindeki Yansımaları: Dijitalleşme ve Yenilikler** *Reflections of Technology on Occupational Health And Safety: Digitalization and Innovations*	2617-2634
Zehra AYBEK, Şeyda ŞAHİN **Gıda Etiket Okuryazarlığı ve Tüketici Bilinci** *Food Labeling Literacy and Consumer Consciousness*	2635-2648

ISSN: 2687-3729



The referees list (Hakem listesi)

Year 2025, Volume 8, Issue **5** list of referees is given below.
(2025 yılı, Cilt 8, Sayı **5***'deki hakemlerin listesi aşağıda verilmiştir).*

(in Degree and Alphabetical order /Unvan ve Alfabetik sıralı)

Hakemler	**Kurum**
Prof. Dr. Nefise AKÇELİK	Ankara Üniversitesi Biyoteknoloji Enstitüsü Biyoteknoloji Anabilim Dalı, ANKARA
Prof. Dr. Ebru GÜL ASLAN	Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Biyoloji Bölümü Genel Biyoloji Anabilim Dalı, ISPARTA
Prof. Dr. Ali ATEŞ	Sinop Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Teorisi Ve Dinamiği Anabilim Dalı, SİNOP
Prof. Dr. Nil BAĞRIAÇIK	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bor Sağlık Bilimleri Fakültesi Beslenme Ve Diyetetik Bölümü Beslenme Bilimleri Anabilim Dalı, NİĞDE
Prof. Dr. Hüseyin Naci BAYRAÇ	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi İktisat Bölümü İktisadi Gelişme, Uluslararası İktisat Anabilim Dalı, ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Arzu BERBER	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü Tarım Politikası Ve Yayım Anabilim Dalı, KIRŞEHİR
Prof. Dr. Muhammet ÇINAR	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı, KAHRAMANMARAŞ
Prof. Dr. Hasan DAĞ	Kadir Has Üniversitesi İktisadi, İdari Ve Sosyal Bilimler Fakültesi Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü Yönetim Bilişim Sistemleri Pr. İSTANBUL
Prof. Dr. Tayfun DEDE	Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapım Yönetimi Anabilim Dalı, TRABZON
Prof. Dr. Pınar DEMİRCİOĞLU	Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, AYDIN
Prof. Dr. Nazife DOĞAN	İzmir Demokrasi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı, İZMİR
Prof. Dr. Ahmet FERTELLİ	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı, SİVAS

Prof. Dr. Uğur GÖZEL	Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü Entomoloji Anabilim Dalı, ÇANAKKALE
Prof. Dr. Alpaslan FIĞLALI	Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı, KOCAELİ
Prof. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY	Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü Mimarlık Anabilim Dalı, ANKARA
Prof. Dr. İlhami İLHAN	Mersin Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Tekstil Ve Moda Tasarımı Bölümü Tekstil Ve Moda Tasarımı Anasanat Dalı, İÇEL
Prof. Dr. Necmi İŞLER	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Endüstri Bitkileri Anabilim Dalı, ANTAKYA
Prof. Dr. Haşim KELEBEK	Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Gıda Teknolojisi Anabilim Dalı, ADANA
Prof. Dr. Serap KIRMIZI	Bursa Uludağ Üniversitesi Gemlik Asım Kocabıyık Meslek Yüksekokulu Bitkisel Ve Hayvansal Üretim Bölümü Bahçe Tarımı Pr. BURSA
Prof. Dr. Hatice KUMCAĞIZ	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Eğitim Fakültesi Eğitim Bilimleri Bölümü Rehberlik Ve Psikolojik Danışmanlık Anabilim Dalı, SAMSUN
Prof. Dr. Ünal KURT	Amasya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makineleri Anabilim Dalı, AMASYA
Prof. Dr. Abdullah MART	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Biyoloji Bölümü Zooloji Anabilim Dalı, OSMANİYE
Prof. Dr. Nuh OCAK	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Zootekni Bölümü Yemler Ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, SAMSUN
Prof. Dr. Murat PEKTAŞ	Kastamonu Üniversitesi Eğitim Fakültesi Matematik Ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü Fen Bilgisi Eğitimi Anabilim Dalı, KASTAMONU
Prof. Dr. Serap ULUSAM SEÇKİNER	Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı, GAZİANTEP
Prof. Dr. Aşkım Hediye SEKMEN	Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Genel Biyoloji Anabilim Dalı, İZMİR
Prof. Dr. Hasan Ersin ŞAMLI	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Zootekni Bölümü Yemler Ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, TEKİRDAĞ
Prof. Dr. Nilüfer TOPSAKAL	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı, SİVAS
Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı, ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Ebru Şebnem YILMAZ	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü Genel Biyoloji Anabilim Dalı, ANTAKYA
Doç. Dr. Büşra AKTÜRK	İstanbul Bilgi Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü İnşaat Mühendisliği Pr. , İSTANBUL
Doç. Dr. Savaş BAYRAM	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı, KAYSERİ
Doç. Dr. Zeynep ÖZMEN BOL	Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu Mülkiyet Koruma Ve Güvenlik Bölümü İş Sağlığı Ve Güvenliği Pr. DÜZCE
Doç. Dr. Sevgi ŞENGÜL AYAN	Antalya Bilim Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Endüstri Mühendisliği Pr. ANTALYA
Doç. Dr. Emrullah CULPAN	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Endüstri Bitkileri Anabilim Dalı, TEKİRDAĞ
Doç. Dr. Melda ALKAN ÇAKIROĞLU	Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı, ISPARTA

Doç. Dr. Zeynep ELİBOL ÇAKMAK	İstanbul Medeniyet Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Biyomühendislik Bölümü Biyomühendislik Anabilim Dalı, İSTANBUL
Doç. Dr. Asya ÇETİNKAYA	Kafkas Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Gıda Bilimleri Anabilim Dalı, KARS
Doç. Dr. Pınar USTA EVCİ	Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı, ISPARTA
Doç. Dr. Gonca ŞİMŞEK GÜNDÜZ	Pamukkale Üniversitesi Denizli Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Tekstil, Giyim, Ayakkabı Ve Deri Bölümü Tekstil Teknolojisi Pr. DENİZLİ
Doç. Dr. Eda GÜNEŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi Turizm Fakültesi Gastronomi Ve Mutfak Sanatları Bölümü Gastronomi Ve Mutfak Sanatları Anabilim Dalı, KONYA
Doç. Dr. Turan GÜRGENÇ	Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Taşıt Tasarım Anabilim Dalı, ELAZIĞ
Doç. Dr. Mehmet KARAMAN	Muş Alparslan Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Bitkisel Üretim Ve Teknolojileri Bölümü Bitki Genetiği Ve Islahı Anabilim Dalı, MUŞ
Doç. Dr. Faruk KILIÇ	Milli Savunma Üniversitesi Kara Harp Okulu Makine Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL
Doç. Dr. Ceren KINA	Malatya Turgut Özal Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, MALATYA
Doç. Dr. Abdülkadir KOÇER	Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik Ve Enerji Bölümü Doğalgaz Ve Tesisatı Teknolojisi Pr., ANTALYA
Doç. Dr. Serkan KURT	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektronik Ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü Elektronik Ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, İSTANBUL
Doç. Dr. İlhan Volkan ÖNER	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı, ERZURUM
Doç. Dr. Fadime ÖZDEMİR	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Fakültesi Moleküler Biyoloji Ve Genetik Bölümü Biyoteknoloji Anabilim Dalı, BİLECİK
Doç. Dr. Ahmet Salih SÖNMEZDAĞ	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Beslenme Ve Diyetetik Bölümü Toplum Beslenmesi Anabilim Dalı, MUĞLA
Doç. Dr. Erdinç ŞAHİN	Giresun Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Bilgisayar Donanımı Anabilim Dalı, GİRESUN
Doç. Dr. Emine ŞİRİN	Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu Makine Ve Metal Teknolojileri Bölümü Makine Resim Ve Konstrüksiyonu Pr., DÜZCE
Doç. Dr. Hakan TAVŞANLI	Balıkesir Üniversitesi Veteriner Fakültesi Besin Hijyeni Ve Teknolojisi Bölümü Veteriner Halk Sağlığı Anabilim Dalı, BALIKESİR
Doç. Dr. Hasan TİRYAKİ	Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, KIRKLARELİ
Doç. Dr. Murat TÖREN	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makineleri Anabilim Dalı, RİZE
Doç. Dr. Ece BÖRTEÇİNE KASAPOĞLU ULUDAMAR	Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü Entomoloji Anabilim Dalı, ADANA
Doç. Dr. Metin UZUN	İskenderun Teknik Üniversitesi Havacılık Ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Bakım Ve Onarım Bölümü Uçak Bakım Ve Onarım Anabilim Dalı, İskenderun-ANTAKYA
Doç. Dr. Halil YALÇIN	Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Veteriner Fakültesi Gıda Hijyeni Ve Teknolojisi Bölümü Veterinerlik Gıda Hijyeni Ve

	Teknolojisi Anabilim Dalı, BURDUR
Dr. Öğretim Üyesi Özlem ALTUN	Doğu Akdeniz Üniversitesi Turizm Fakültesi Gastronomi Ve Mutfak Sanatları Bölümü Gastronomi Ve Mutfak Sanatları Pr. , KKTC
Dr. Öğretim Üyesi Filiz ARICAK	Trakya Üniversitesi Edirne Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Mülkiyet Koruma Ve Güvenlik Bölümü İş Sağlığı Ve Güvenliği Pr., EDİRNE
Dr. Öğretim Üyesi Gülhas SOLMAZ KAVAK	İzmir Tınaztepe Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Tıbbi Hizmetler Ve Teknikler Bölümü Tıbbi Laboratuvar Teknikleri Pr. İZMİR
Dr. Öğretim Üyesi Aybüke KAYA	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü Tarım Politikası Anabilim Dalı, ANTAKYA
Dr. Öğretim Üyesi Volkan KIZILOĞLU	Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektronik Anabilim Dalı, ERZURUM
Dr. Öğretim Üyesi Emrah KORHAN	Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık Ve Tasarım Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, KAHRAMANMARAŞ
Dr. Öğretim Üyesi Nagihan SEVEROĞLU KÜÇÜK	Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektronik Anabilim Dalı, ERZURUM
Dr. Öğretim Üyesi Beyza BUZOL MULAYİM	Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Tasarım Bölümü/Moda Tasarımı Pr. KIRKLARELİ
Dr. Öğretim Üyesi Derya ÇEVİK TAŞDEMİR	Gaziantep Üniversitesi Oğuzeli Meslek Yüksekokulu Yönetim Ve Organizasyon Bölümü İşletme Yönetimi Pr. GAZİANTEP
Ar. Gör. Elif DAMGACI	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, NEVŞEHİR

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2039-2056, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2039-2056, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Tüberküloz Hastalığının Matematiksel Modellemesine Caputo Kesirli Türevinin Etkisi

Bahar ACAY ÖZTÜRK[1*]

[1]Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı, Elazığ

[1]https://orcid.org/0000-0002-2350-4872
*Sorumlu yazar: bacay@firat.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 18.10.2024
Kabul tarihi:02.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Kesirli analiz
Caputo kesirli türevi
Tüberküloz modelleme
Kararlılık analizi
Matematiksel epidemioloji

ÖZ

Kesirli türev ve integral operatörlerinin en önemli avantajlarından biri olan hafıza etkisi, bir hastalığın belirgin bir özelliğidir. Mikobakteriyum tüberküloz, akciğerleri etkileyen hafızaya bağlı bu tür tehlikeli hastalıklardan biridir. Bu nedenle, bu ciddi halk sağlığı enfeksiyonu hafıza etkisine sahip Caputo operatörü aracılığıyla araştırılmıştır. İlk olarak, çözümlerin pozitifliği, hastalıksız denge ve endemik denge noktaları gibi önerilen modelin bazı temel özellikleri sunulmuştur. Daha sonra, söz konusu hastalık modelini karakterize etmek için temel üreme sayısı hesaplanmıştır. Ayrıca, bu temel hesaplamalar kullanılarak kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir ve tüberküloz enfeksiyonunun seyri hakkında yorumlar yapılmıştır. Öte yandan, tam sayı olmayan mertebenin mikobakteriyum tüberküloz yayılımı üzerindeki etkisini göstermek için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Son olarak, klasik ve kesirli matematiksel modeller arasındaki karşılaştırma analizi çeşitli grafiklerle desteklenmiştir. Sonuçlar, kesirli sıranın tüberküloz yayılmasını seyrini büyük ölçüde etkileyebileceğini ve bu küresel sağlık sorunu hakkında daha spesifik tahminlere izin verdiğini göstermektedir.

The Impact of Caputo Fractional Derivative on Mathematical Modeling of Tuberculosis Disease

Research Article

Article History:
Received: 18.10.2024
Accepted: 02.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Fractional calculus
Caputo fractional derivative
Tuberculosis modeling
Stability analysis
Mathematical epidemiology

ABSTRACT

Memory effect, one of the most important advantages of fractional derivative and integral operators, is a prominent characteristic of a disease. Mycobacterium tuberculosis is one of such memory-dependent precarious disease that affects the lungs. Therefore, we investigate this serious public health infection by means of the Caputo operator having memory. Firstly, some fundamental features of the proposed model such as the positiveness of solutions, the disease-free equilibrium, and endemic equilibrium points are presented. Then, the basic reproduction number to characterize the disease model under consideration is calculated. In addition, stability analysis is performed by using these basic calculations, and comments are made on the course of the tuberculosis infection. On the other hand, we numerical simulations in order to show the effect of non-integer order on the mycobacterium tuberculosis transmission are carried out. Lastly, comparison analysis between the classical and fractional mathematical models is supported by various graphs. The results show that fractional order can greatly affect the course of the tuberculosis transmission and allow for more specific predictions about this global health issue.

To Cite: Acay Öztürk B. The Impact of Caputo Fractional Derivative on Mathematical Modeling of Tuberculosis Disease. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2039-2056.

1. Introduction

Mycobacterium tuberculosis (MTB) is a dangerous and life-threatening disease causing infection in the lungs and damage to other organs. It is also a long-term bacterial and contagious infectious disease caused by the Mycobacterium tuberculosis. Although it is one of the oldest known diseases, its cause is known with certainty, it can be treated, and it is a preventable disease, it still remains one of the most common and fatal infectious diseases in the world, and more than 3 million people die from tuberculosis every year. Moreover, one in three people in the world has contracted tuberculosis, and currently, more than 10 million new MTB patients are diagnosed each year according to WHO. The MTB disease is transmitted from human to human through air. The bacillus is spread into the air by droplets in the saliva of an active tuberculosis patient through coughing, sneezing, or other means, and the infection spreads by ingesting particles suspended in the air. The most common symptoms of the MTB are fever, chills, night sweats, loss of appetite, weight loss, and fatigue (Murphy et al., 2003; Khajanchi et al., 2018; Ojo et al., 2023). In order to control and prevent the infectious diseases, one must be well-versed in the disease mechanism and transmission dynamics. This helps predict disease progression and develop eradication strategies. Since diseases change over time, investigating epidemic dynamics is a crucial theoretical avenue for gaining insight into transmission dynamics and control. Mathematical modeling enables us to analyze and comprehend the transmission process of various infectious diseases. Moreover, mathematical models make a major contribution to analyze and comprehend the transmission dynamics of various diseases. Also, disease models provide better policy to control or prevent the spread of future infections. Analysis of disease via mathematical tools enables crucial predictions about infection and estimates of future outcomes that are impossible to calculate by alternative means. Numerous system models have been developed to understand the biological process of tuberculosis. They can also be used to assess the impact of public health intervention strategies and to suggest the best course of action to combat tuberculosis (Qureshi et al., 2021). Moreover, there are many tuberculosis models in the literature based on real-data to predict the future spread and control of the disease (Ullah et al., 2018; Khan et al. 2019).

Fractional-order models offer more reliable and accurate results about the process of diseases compared to traditional models. In addition, the definition of hereditary characteristics and memory gives it an advantage over traditional models. Fractional mathematical models have the feature of representing the dynamics between two non-local points (Qureshi et al., 2021). Especially in recent years, various theories and ideas related to fractional operators have been put forward and developed. Fractional calculus is frequently used in modeling of real-world problems in engineering, physics, psychology, medicine, economics and many other areas. Therefore, we prefer to analyze theoretically and numerically the transmission dynamics of tuberculosis disease by presenting the effect of non-integer order. Additionally, several studies in the literature have explored the joint analyses of tuberculosis and fractional derivatives (Sweilam et al., 2016; Zafar et al., 2022; Farman et al., 2023; Olaniyi et al., 2023). Due to the importance of the combination of non-local fractional derivatives with disease models in the

literature, we analyze the MTB model with the help of the Caputo derivative, which stands out with its advantages in application. This useful fractional operator with singular kernel is defined as follows:

$$ {}_{c}D^{\omega}\phi(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\omega)} \int_{a}^{t} \frac{\phi^{(n)}(\xi)}{(t-\tau)^{\omega-n+1}} d\xi, \tag{1.1} $$

where $Re \geq 0$ and $n = \lfloor Re(\omega) \rfloor + 1$ (Miller et al., 1993). Thanks to the Caputo definition, the MTB system, which is considered in the usual classical form in the study (Mustapha et al., 2022), is redefined and analyzed in fractional terms, and more precise results are obtained. It is investigated both theoretically and numerically, and the effect of the fractional order on the results in both cases is shown by comparing it with the integer-order derivative. We refer the reader to (Jarad et al., 2017; Acay et al., 2020; Acay et al., 2021a; Acay et al., 2021b; Inc et al., 2021; Ucakan et al., 2021; Yusuf et al., 2021) for more application of fractional operators and disease models.

The current article is structured as: In Section 2, we present the compartmental disease model for transmission dynamics of tuberculosis infection with hospitalization and reinfection through Caputo fractional operator. Model diagram of fractional system and all biological parameter descriptions and values are given in this section. Then, in Section 3, we address some basic analysis of the fractional MTB model, that is, positivity of the system solutions, stability analysis. Also, such dynamical features as the basic reproduction number, disease-free steady-state and endemic steady-state are shown for the fractional model under consideration. On the other hand, in Section 4, we give a numerical scheme to visualize the fractional MTB model with Caputo operator. Lastly, some crucial conclusions and future recommendations of our research study are introduced for better understanding the dynamics of mycobacterium tuberculosis disease.

2. Description of the Fractional Tuberculosis Transmission Model

In this section, we investigate the mathematical model of mycobacterium tuberculosis (MTB) transmission in humans with hospitalization and reinfection given in (Mustapha et al., 2022). Due to the known advantages of fractional derivatives in examining disease models, the mentioned model is defined and analyzed with the Caputo derivative. We define the tuberculosis transmission model under Caputo operator as follows:

$$
\begin{aligned}
{}_cD^{\omega}S(t) &= \frac{1}{\Gamma(1-\omega)}\int_0^t \frac{S'(t)}{(t-\xi)^{\omega}}d\xi = \lambda^{\omega} - \beta^{\omega}S(t) + \gamma^{\omega}R(t) - \delta^{\omega}S(t),\\
{}_cD^{\omega}E(t) &= \frac{1}{\Gamma(1-\omega)}\int_0^t \frac{E'(t)}{(t-\xi)^{\omega}}d\xi = \beta^{\omega}S(t) - (\chi^{\omega} + \delta^{\omega})E(t),\\
{}_cD^{\omega}A(t) &= \frac{1}{\Gamma(1-\omega)}\int_0^t \frac{A'(t)}{(t-\xi)^{\omega}}d\xi = \eta^{\omega}\chi^{\omega}E(t) - (\theta_1^{\omega} + \kappa_1^{\omega} + \alpha_1^{\omega} + \delta^{\omega})A(t),\\
{}_cD^{\omega}I(t) &= \frac{1}{\Gamma(1-\omega)}\int_0^t \frac{I'(t)}{(t-\xi)^{\omega}}d\xi = (1-\eta^{\omega})\chi^{\omega}E(t) - (\theta_2^{\omega} + \kappa_2^{\omega} + \alpha_2^{\omega} + \delta^{\omega})I(t),\\
{}_cD^{\omega}H(t) &= \frac{1}{\Gamma(1-\omega)}\int_0^t \frac{H'(t)}{(t-\xi)^{\omega}}d\xi = \theta_1^{\omega}A(t) + \theta_2^{\omega}I(t) - (\alpha_3^{\omega} + \kappa_3^{\omega} + \delta^{\omega})H(t),\\
{}_cD^{\omega}R(t) &= \frac{1}{\Gamma(1-\omega)}\int_0^t \frac{R'(t)}{(t-\xi)^{\omega}} = \kappa_1^{\omega}A(t) + \kappa_2^{\omega}I(t) + \kappa_3^{\omega}H(t) - (\gamma^{\omega} + \delta^{\omega})R(t),
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

where

$$\beta^{\omega} = \frac{\rho^{\omega}(\sigma_1 E(t) + \sigma_2 H(t) + \sigma_3 A(t) + I(t))}{N}$$

and $0 < \omega \leq 1$. Here, the population is divided into 6 groups: susceptible individuals $\big(S(t)\big)$, exposed individuals $\big(E(t)\big)$, asymptomatic MTB infected individuals with no clinical symptoms of MTB $\big(A(t)\big)$, MTB infected individuals with clinical symptoms $\big(I(t)\big)$, hospitalized individuals $\big(H(t)\big)$, and recovered individuals $\big(R(t)\big)$. The total number of population is represented by $N(t)$, so that $N(t) = S(t) + E(t) + A(t) + I(t) + H(t) + R(t)$.

In deriving the analysis of the model under investigation, we assume the following conditions:

- A closed population where the total number of individuals remains constant, considering recruitment and mortality rates.
- Homogeneous mixing of individuals, meaning that each susceptible individual has an equal probability of encountering an infectious individual.
- No external interventions (such as vaccination or treatment campaigns) affecting the transmission dynamics during the study period.
- The fractional-order model maintains the same biological assumptions as integer-order models while incorporating memory effects.
- The transmission rate remains time-invariant over the study period.

These assumptions are consistent with those in classical epidemiological models, allowing a direct comparison between integer-order and fractional-order models while investigating the impact of memory effects on disease dynamics.

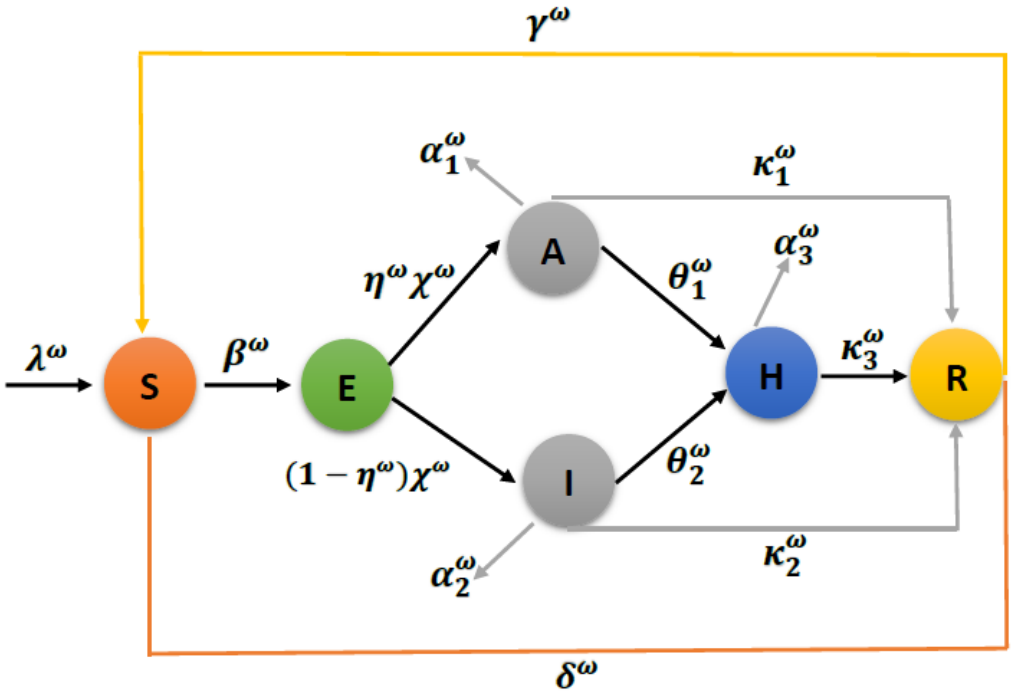


Figure 1: Diagram of the MTB model

Figure 1 shows the flow chart of the MTB mathematical model while Table 1 includes the description and values of the parameters. We use these all values in Section 4 to obtain the graphs of the system solutions. Fractional system (2.1) is constructed with care of dimensional analysis among the system parameters and derivatives. In other saying, the non-integer order ω does not invade dimensional analysis. Because, parameters of the MTB model includes the non-integer order ω except $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (dimensionless parameters).

Table 1. Description of the parameters of MTB model

Parameter	Definition	Sample Value	Units	Source
λ	Recruitment rate	53	1/Day	Mustapha et al., 2022
δ	Naturel death rate	0.0047	1/Day	Mustapha et al., 2022
ρ	Transmission probability of MTB	0.000535	1/Day	Mustapha et al., 2022
χ	Progression of latent state of MTB	0.001	1/Day	Mustapha et al., 2022
η	Proportion of infected individuals	0.00071	1/Day	Mustapha et al., 2022
κ1, κ2, κ3	Recovery rates	0.000453,0.000543,0.000234	1/Day	Mustapha et al., 2022
γ	Loss of immunity	0.00271	1/Day	Mustapha et al., 2022
α1,α2,α3	Death rate	0.0002,0.0003,0.0004	1/Day	Mustapha et al., 2022
θ1,θ2	Hospitalization rate	0.2849,0.22806	1/Day	Mustapha et al., 2022
σ1,σ2,σ3	Modification for the decrease/increase of MTB	[0,1)	Dimensionless	Mustapha et al., 2022

The fractional system model given above is studied biologically and mathematically, and a comparative analysis is performed between the solutions obtained by classical derivative and those obtained by Caputo fractional derivative.

3. Mathematical Analysis of the Fractional MTB Infection Model

In this section, we show the fundamental properties of the fractional-type model under investigation. Firstly, positive invariant set for the fractional MTB model is given by Theorem 1 as below:

Theorem 1. The closed set $I = \{(S, E, A, I, H, R) \in R^6 : 0 \leq S + E + A + I + H + R \leq \frac{\lambda^\omega}{\delta^\omega}\}$ is a positive invariant set for the fractional model (2.1).

Proof. The following steps are utilized to prove the non-negativity of system (2.1) solution:

$$\begin{aligned}
&{}_CD^\omega S(t)|_{S(t)=0} = \lambda^\omega + \gamma^\omega \geq 0,\\
&{}_CD^\omega E(t)|_{E(t)=0} = \beta^\omega S(t) \geq 0,\\
&{}_CD^\omega A(t)|_{A(t)=0} = \eta^\omega \chi^\omega E(t) \geq 0,\\
&{}_CD^\omega I(t)|_{I(t)=0} = (1-\eta^\omega)\chi^\omega E(t) \geq 0,\\
&{}_CD^\omega H(t)|_{H(t)=0} = \theta_1^\omega A(t) + \theta_2^\omega I(t) \geq 0,\\
&{}_CD^\omega R(t)|_{R(t)=0} = \kappa_1^\omega A(t) + \kappa_2^\omega I(t) + \kappa_3^\omega H(t) \geq 0,
\end{aligned} \tag{3.1}$$

This means that the solutions of the model handled are non-negative. On the other hand, by adding the equations of the fractional system (2.1), we have

$$ {}_{C}D^{\omega}N(t) \le \lambda^{\omega} - \delta^{\omega}N(t) - \left(\alpha_1^{\omega}\, A(t) + \alpha_2^{\omega}\, I(t) + \alpha_3^{\omega}\, H(t)\right) \le \lambda^{\omega} - \delta^{\omega}N(t). \tag{3.2} $$

If we use the property of Caputo operator, we get

$$ N(t) \le \left(N(0) - \frac{\lambda^{\omega}}{\delta^{\omega}}\right) \times E_{\omega}(-\delta^{\omega}t^{\omega}) + \frac{\lambda^{\omega}}{\delta^{\omega}}. \tag{3.3} $$

Under the property of Mittag-Leffler function $E_{\omega}(.)$, we reach

$$ (S(t) + E(t) + A(t) + I(t) + H(t) + R(t)) \le \frac{\lambda^{\omega}}{\delta^{\omega}}, \tag{3.4} $$

and so the defined set I is positive invariant region for the fractional MTB infection model including Caputo operator.

The effective reproduction number is a critical threshold parameter for characterizing mathematical disease models. So let us calculate the reproduction number (R_0) for the proposed fractional model. But before that we show the existence of disease-free equilibrium point (DFE), E^0. In the absence of the MTB infection $(E^* = 0, A^* = 0, I^* = 0, H^* = 0)$, the system (2.1) reduces to $\lambda^{\omega} - \delta^{\omega}S = 0$. Solving, we obtain DFE as

$$ E^0 = (S^*, E^*, A^*, I^*, H^*, R^*) = \left(\frac{\lambda^{\omega}}{\delta^{\omega}}, 0,0,0,0\right). \tag{3.5} $$

Now, benefiting from the DFE, we calculate R_0 with the help of next generation matrix method as follows. Also, the stability of DFE is investigated by using this efficient method (Van den Driessche et al., 2002). The matrix F_i (the rate of appearance of new infections in compartment i) and the matrix V_i (substracting the transfer of indivuals out of the compartment i from the rate of transfer of individuals into compartment i) are given by

$$ \mathrm{F_i} = \begin{bmatrix} \dfrac{\rho^{\omega}(\sigma_1 E + \sigma_2 H + \sigma_3 A + I)}{N} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{V_i} = \begin{bmatrix} (\chi^{\omega} - \delta^{\omega})E \\ -\eta^{\omega}\chi^{\omega}E + (\theta_1^{\omega} + \kappa_1^{\omega} + \alpha_1^{\omega} + \delta^{\omega})A \\ (\eta^{\omega} - 1)\chi^{\omega}E + (\theta_2^{\omega} + \kappa_2^{\omega} + \alpha_2^{\omega} + \delta^{\omega})I \\ -\theta_1^{\omega}A - \theta_2^{\omega}I + (\alpha_3^{\omega} + \kappa_3^{\omega} + \delta^{\omega})H \\ -\lambda^{\omega} + \beta^{\omega}S - \gamma^{\omega}R + \delta^{\omega}S \\ -\kappa_1^{\omega}A - \kappa_2^{\omega}I - \kappa_3^{\omega}H + (\gamma^{\omega} + \delta^{\omega})R \end{bmatrix}, $$

By using matrices $\mathrm{F_i}$ and $\mathrm{V_i}$, we can get the matrices F (the rate of new infection cases) and V (the matrix including rest of the terms):

$$ F = \begin{bmatrix} \rho^{\omega}\sigma_1 & \rho^{\omega}\sigma_3 & \rho^{\omega} & \rho^{\omega}\sigma_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, $$

$$V = \begin{bmatrix} \chi^{\omega} - \delta^{\omega} & 0 & 0 & 0 \\ -\eta^{\omega}\chi^{\omega} & \theta_1^{\omega} + \kappa_1^{\omega} - \alpha_1^{\omega} + \delta^{\omega} & 0 & 0 \\ -\chi^{\omega}(1-\eta^{\omega}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\theta_1^{\omega} & -\theta_2^{\omega} & \alpha_3^{\omega} + \kappa_3^{\omega} + \delta^{\omega} \end{bmatrix}.$$

So the matrix V^{-1} can be written as

$$V^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{B_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\eta^{\omega}\chi^{\omega}}{B_1 B_2} & \frac{1}{B_2} & 0 & 0 \\ \frac{\chi^{\omega} B_5}{B_1 B_3} & 0 & \frac{1}{B_3} & 0 \\ \frac{\chi^{\omega}(\eta^{\omega} B_3 \theta_1^{\omega} + B_2 B_5 \theta_2^{\omega})}{B_1 B_2 B_3 B_4} & \frac{\theta_1^{\omega}}{B_2 B_4} & \frac{\theta_2^{\omega}}{B_3 B_4} & \frac{1}{B_4} \end{bmatrix}.$$

Here, $B_1 = \chi^{\omega}\delta^{\omega}$, $B_2 = \theta_1^{\omega} + \kappa_1^{\omega} + \alpha_1^{\omega} + \delta^{\omega}$, $B_3 = \theta_2^{\omega} + \kappa_2^{\omega} + \alpha_1^{\omega} + \delta^{\omega}$, $B_4 = \alpha_3^{\omega} + \kappa_3^{\omega} + \delta^{\omega}$, $B_5 = 1 - \eta^{\omega}$. On the other hand, the natrix FV^{-1} is

$$FV^{-1} = \begin{bmatrix} B_7 & \frac{\rho^{\omega}\sigma_3}{B_2} + \frac{\rho^{\omega}\sigma_2\theta_1^{\omega}}{B_2 B_4} & \frac{\rho^{\omega}}{B_3} + \frac{\rho^{\omega}\sigma_2\theta_2^{\omega}}{B_3 B_4} & \frac{\rho^{\omega}\sigma_2}{B_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

and $B_6 = \gamma^{\omega}\delta^{\omega}$, $B_7 = \frac{\rho^{\omega}\sigma_1}{B_1} + \frac{\rho^{\omega}\sigma_3\eta^{\omega}\chi^{\omega}}{B_1 B_2} + \frac{\rho^{\omega}\chi^{\omega} B_5}{B_1 B_3} + \frac{\rho^{\omega}\sigma_2\chi^{\omega}(\eta^{\omega} B_3\theta_1^{\omega} + B_2 B_5\theta_2^{\omega})}{B_1 B_2 B_3 B_4}$. As a result of all calculations performed the reproduction number is given by

$$R_0 = \frac{\rho^{\omega}(\eta^{\omega}\chi^{\omega} B_3 B_4\sigma_3 + \eta^{\omega}\chi^{\omega} B_3\sigma_2\theta_1^{\omega} + \chi^{\omega} B_2 B_5\sigma_2\theta_2^{\omega} + \chi^{\omega} B_2 B_4 B_5 + B_2 B_3 B_4\sigma_1)}{B_1 B_2 B_3 B_4}.$$

So the following theorem can be given:

Theorem 2. The DFE of the proposed fractional model (2.1) is locally asymptotically stable if $R_0 < 1$ and unstable when $R_0 > 1$.

Now we present the analysis of the endemic equilibrium of the fractional MTB model. It is well-known that if $E \neq 0, A \neq 0, I \neq 0, H \neq 0$, the infection persists and the disease model has en endemic equilibrium (EE) point indicated by $EE = (S^*, E^*, A^*, I^*, H^*, R^*)$. Also, it can be noted that when $R_0 < 1$, the infection may disappear and for $R_0 > 1$, the infection persists. In order to obtain EE, we solve the fractional model (2.1) in terms of the β^{ω} and obtain

$$S^* = \frac{B_1B_2B_3B_4B_5B_6\lambda^\omega}{B_2B_3B_4B_6(\beta^\omega+\delta^\omega)-\chi^\omega\gamma^\omega\beta^\omega B_2B_5(B_4\kappa_2^\omega+\theta_2^\omega\kappa_3^\omega)-\eta^\omega\chi^\omega\gamma^\omega\beta^\omega B_3(B_4\kappa_1^\omega+\theta_1^\omega\kappa_3^\omega)},$$

$$E^* = \frac{B_2B_3B_4B_6\beta^\omega\lambda^\omega}{B_1B_2B_3B_4B_6-\chi^\omega\gamma^\omega B_2B_5(B_4\kappa_2^\omega+\theta_2^\omega\kappa_3^\omega)-\eta^\omega\chi^\omega\gamma^\omega B_3(B_4\beta^\omega\kappa_1^\omega+\beta^\omega\theta_1^\omega\kappa_3^\omega)+B_1B_2B_3B_4B_6\delta^\omega},$$

$$A^* = \frac{B_3B_4B_6\eta^\omega\chi^\omega\beta^\omega\lambda^\omega}{B_1B_2B_3B_6-\chi^\omega\gamma^\omega B_2B_5(B_4\kappa_2^\omega+\theta_2^\omega\kappa_3^\omega)-\eta^\omega\chi^\omega\gamma^\omega\beta^\omega B_3(B_4\kappa_1^\omega+\theta_1^\omega\kappa_3^\omega)+B_1B_2B_3B_4B_6\delta^\omega},$$

$$I^* = \frac{B_2B_4B_5B_6\chi^\omega\beta^\omega\lambda^\omega}{B_1B_2B_3B_4B_6-\chi^\omega\gamma^\omega B_2B_5(B_4\kappa_2^\omega+\theta_2^\omega\kappa_3^\omega)-\eta^\omega\chi^\omega\gamma^\omega\beta^\omega(B_4\kappa_1^\omega+\theta_1^\omega\kappa_3^\omega)+B_1B_2B_3B_4B_6\delta^\omega},$$

$$H^* = \frac{\chi^\omega\beta^\omega\lambda^\omega B_6(B_2B_5\theta_2^\omega+B_3\theta_1^\omega\eta^\omega)}{B_1B_2B_3B_4B_6-\chi^\omega\gamma^\omega B_2B_5(B_4\kappa_2^\omega+\theta_2^\omega\kappa_3^\omega)-\eta^\omega\chi^\omega\gamma^\omega\beta^\omega B_3(B_4\kappa_1^\omega+\theta_1^\omega\kappa_3^\omega)+B_1B_2B_3B_4B_6\delta^\omega},$$

$$R^* = \frac{\chi^\omega\beta^\omega\lambda^\omega(B_2B_5(B_4\kappa_2^\omega+\theta_2^\omega\kappa_3^\omega)+\eta^\omega\chi^\omega\beta^\omega B_3(B_4\kappa_1^\omega+\theta_1^\omega\kappa_3^\omega))}{B_1B_3B_4B_6(\beta^\omega+\delta^\omega)-\chi^\omega\gamma^\omega\beta^\omega B_2B_5(B_4\kappa_2^\omega+\theta_2^\omega\kappa_3^\omega)-\eta^\omega\chi^\omega\gamma^\omega\beta^\omega B_3(B_4\kappa_1^\omega+\theta_1^\omega\kappa_3^\omega)}.$$

Theorem 3. The EE points of the fractional system (2.1) is globally asymptotically stable when $R_0 > 1$ and unstable for $R_0 < 1$.

After performing some basic mathematical calculations for the fractional MTB infection model above, numerical analysis is carried out and how the fractional-order affects the disease dynamics is clearly observed in the graphs as follows:

4. Visual Results and Discussions

In the current section, we carry out numerical analysis of the fractional MTB disease model with the help of the Caputo operator. For this objective, fractional predictor-corrector method (Diethelm et al., 2002, Diethelm et al., 2004, Qureshi et al., 2019) is employed and we show the effect of non-integer order ω on the solutions with various graphs. The predictor-corrector method is given as follows.

Firstly, we write the fractional MTB infection model in the following form:

$$\begin{aligned}
{}_CD^\omega S(t) &= G_1(t,S,E,A,I,H,R),\\
{}_CD^\omega E(t) &= G_2(t,S,E,A,I,H,R),\\
{}_CD^\omega A(t) &= G_3(t,S,E,A,I,H,R),\\
{}_CD^\omega I(t) &= G_4(t,S,E,A,I,H,R),\\
{}_CD^\omega H(t) &= G_5(t,S,E,A,I,H,R),\\
{}_CD^\omega R(t) &= G_6(t,S,E,A,I,H,R).
\end{aligned} \tag{4.1}$$

For the time step interval Δt such that $t_i = i\Delta t, i = 0,1,\dots,N$ and T is the upper limit of the integration interval, let $\Delta t = \frac{T}{N}$. Accordingly, the algorithm of the predictor part required for the numerical method to be used is

$$S_{n+1}^r = S(0) + \sum_{i=1}^{n} a_{\omega,i,n+1} G_1(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$E_{n+1}^r = E(0) + \sum_{i=1}^{n} a_{\omega,i,n+1} G_2(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$A_{n+1}^r = A(0) + \sum_{i=1}^{n} a_{\omega,i,n+1} G_3(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$I_{n+1}^r = I(0) + \sum_{i=1}^{n} a_{\omega,i,n+1} G_4(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$H_{n+1}^r = H(0) + \sum_{i=1}^{n} a_{\omega,i,n+1} G_5(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$R_{n+1}^r = R(0) + \sum_{i=1}^{n} a_{\omega,i,n+1} G_6(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

and in a similar way, the algorithm of the corrector part for the numerical technique is given by

$$S_{n+1}^r = S(0) + b_{\omega,n+1,n+1} G_1(t_i, S_i^r, E_i^r, A_i^r, I_i^r, H_i^r, R_i^r) + \sum_{i=1}^{n} b_{\omega,i,n+1} G_1(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$E_{n+1}^r = E(0) + b_{\omega,n+1,n+1} G_2(t_i, S_i^r, E_i^r, A_i^r, I_i^r, H_i^r, R_i^r) + \sum_{i=1}^{n} b_{\omega,i,n+1} G_2(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$A_{n+1}^r = A(0) + b_{\omega,n+1,n+1} G_3(t_i, S_i^r, E_i^r, A_i^r, I_i^r, H_i^r, R_i^r) + \sum_{i=1}^{n} b_{\omega,i,n+1} G_3(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$I_{n+1}^r = I(0) + b_{\omega,n+1,n+1} G_4(t_i, S_i^r, E_i^r, A_i^r, I_i^r, H_i^r, R_i^r) + \sum_{i=1}^{n} b_{\omega,i,n+1} G_4(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$H_{n+1}^r = H(0) + b_{\omega,n+1,n+1} G_5(t_i, S_i^r, E_i^r, A_i^r, I_i^r, H_i^r, R_i^r) + \sum_{i=1}^{n} b_{\omega,i,n+1} G_5(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i),$$

$$R_{n+1}^r = R(0) + b_{\omega,n+1,n+1} G_6(t_i, S_i^r, E_i^r, A_i^r, I_i^r, H_i^r, R_i^r) + \sum_{i=1}^{n} b_{\omega,i,n+1} G_6(t_i, S_i, E_i, A_i, I_i, H_i, R_i).$$

On the other hand, the following equations are valid:

$$a_{\omega,i,n+1} = \frac{1}{\Gamma(\omega+1)}[(n-i+1)^{\omega} - (n-i)^{\omega}],$$

$$b_{\omega,i,n+1} = \frac{(\Delta t)^{\omega}}{\Gamma(\omega+2)},$$

and

$$\begin{cases} n^{\omega+1} - (n-\omega)(n+1)^{\omega}, & i = 0 \\ (n-i+2)^{\omega+1} - 2(n-i+1)^{\omega+1} + (n-i)^{\omega+1}, & 1 \leq i \leq n \\ 1, & i = n+1 \end{cases}$$

Also, $r = \min(1+\omega, 2)$ is the accuracy order of the fractional predictor-corrector method.

The graphs obtained for different values of ω and the biological parameter values in Table 1 are shown in Figure 2 and 3 by means of fractional-type predictor-corrector method. On these graphs, the MTB disease model containing the classical derivative and the model containing the Caputo derivative are compared. The time-dependent change of the state variables $S(t), E(t), A(t), I(t), H(t), R(t)$ belonging to the system (2.1) is first plotted in the classical case in Figure 2. Then, the comparison of the classical model (when $\omega = 1$) with the fractional model for $\omega = 0.9, 0.8, 0.7$ is given in Figure 3. The point to note here is how the fractional order ω changes the behavior of the solution curves. Moreover, the increase and decrease in number of susceptible individuals, exposed individuals, asymptomatic MTB infected individuals with no clinical symptoms of MTB, MTB infected individuals with clinical symptoms, hospitalized individuals, and recovered individuals can be easily observed on the graphs. For instance, in Figure 2, while the susceptible class increase more rapidly for the integer-order version ($\omega = 1$), in Figure 3, it increases more slowly for non-integer order values smaller than 1. Similarly, by looking at the increase and decrease rates of the other classes, we can see the effect of the non-integer order ω on the state variables.

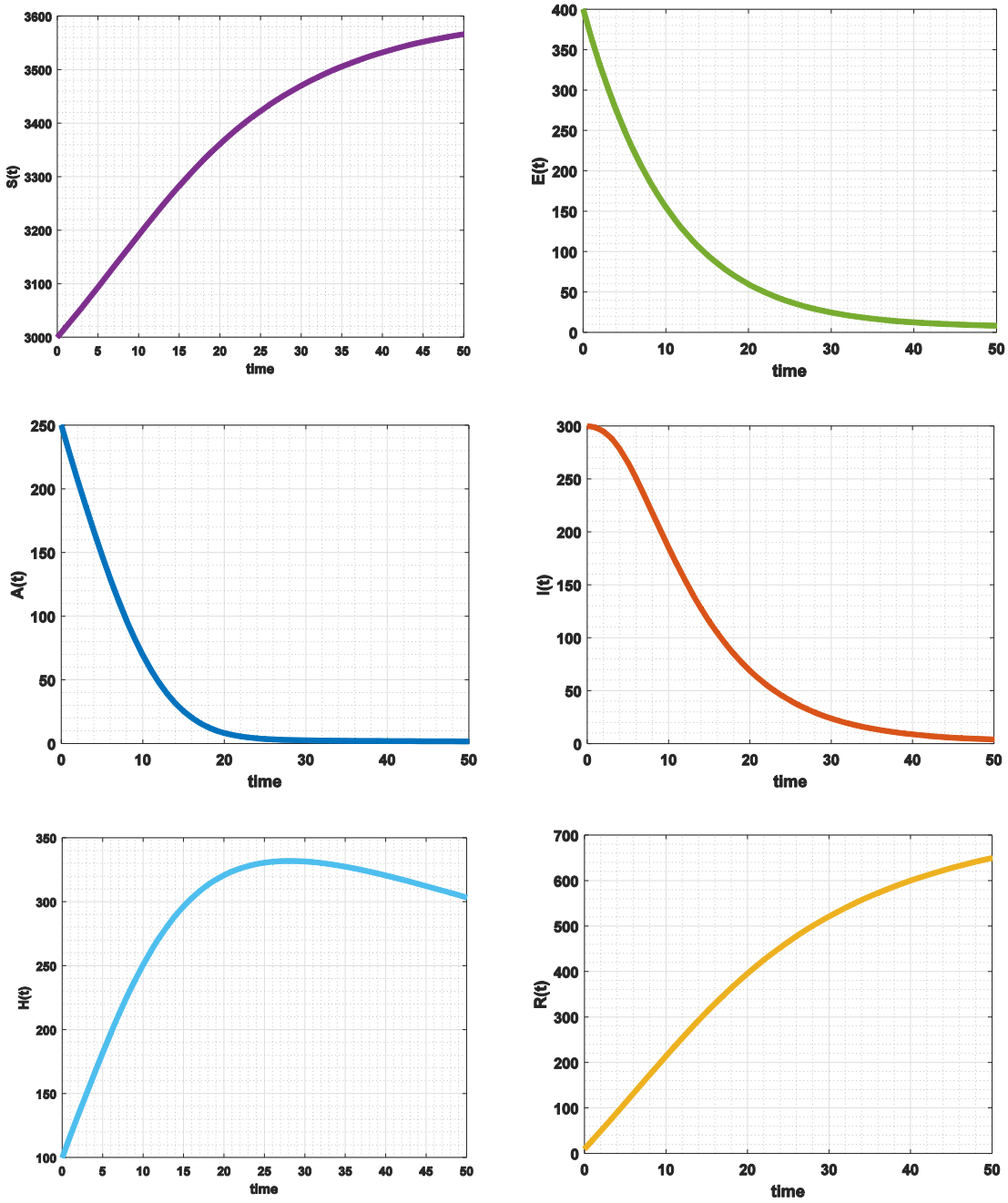
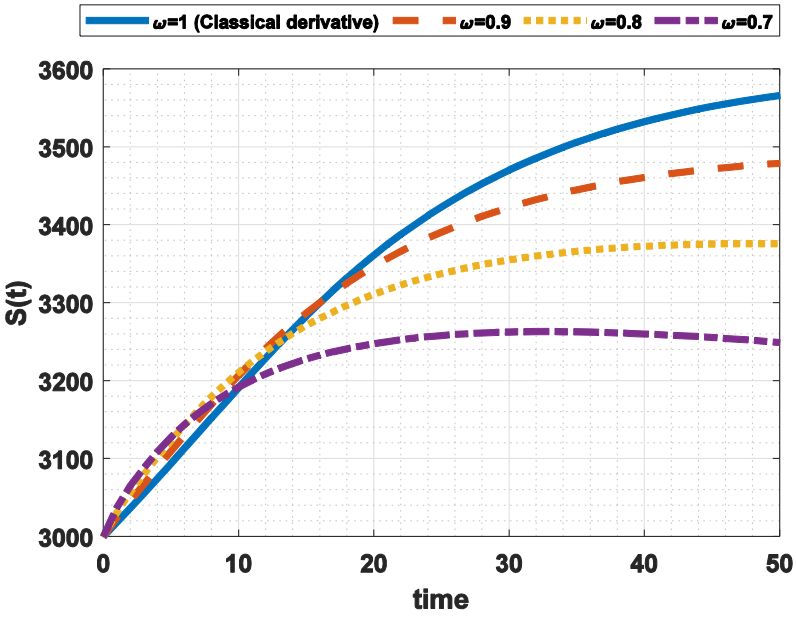
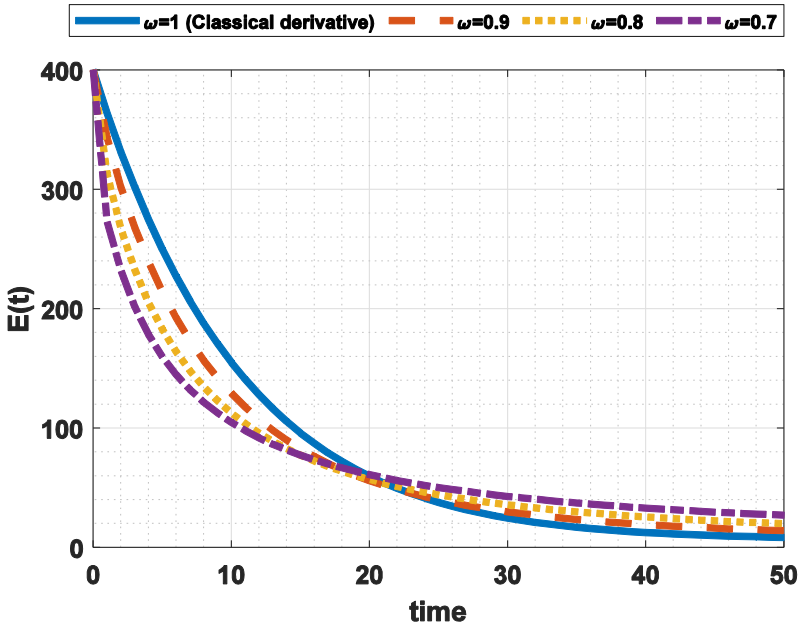


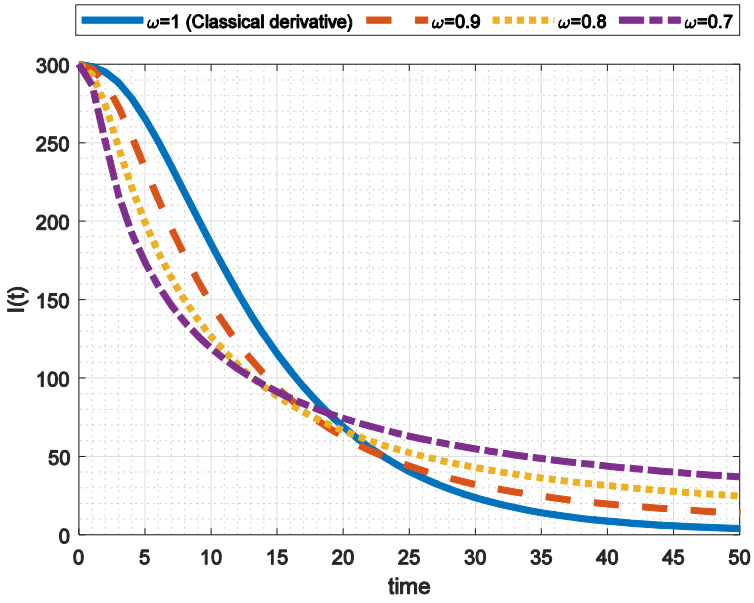
Figure 2: Profiles of solution functions of the classical-type MTB disease model (for $\omega = 1$ in the system (2.1)).


ω=1 (Classical derivative)
ω=0.9
ω=0.8
ω=0.7
S(t)
time
3600
3500
3400
3300
3200
3100
3000
0
10
20
30
40
50

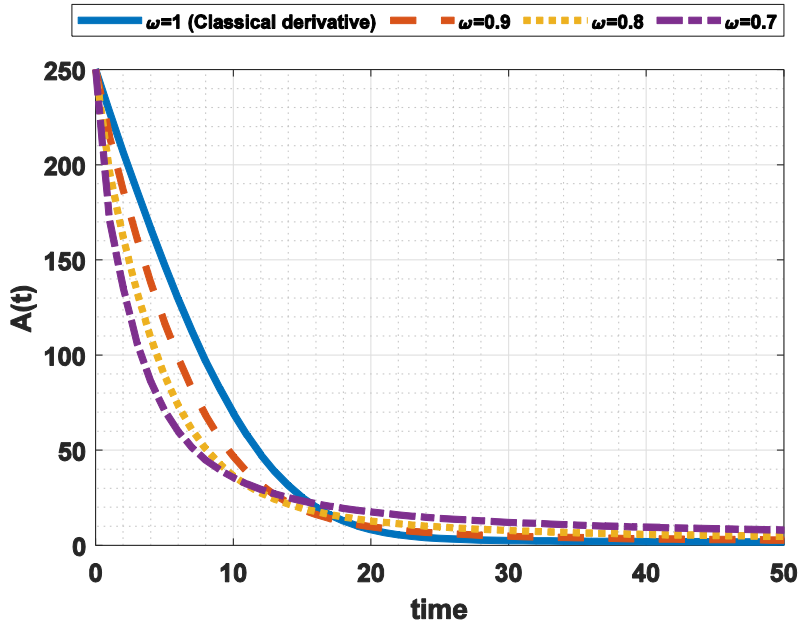
(A)


ω=1 (Classical derivative)
ω=0.9
ω=0.8
ω=0.7
E(t)
time
400
300
200
100
0
0
10
20
30
40
50

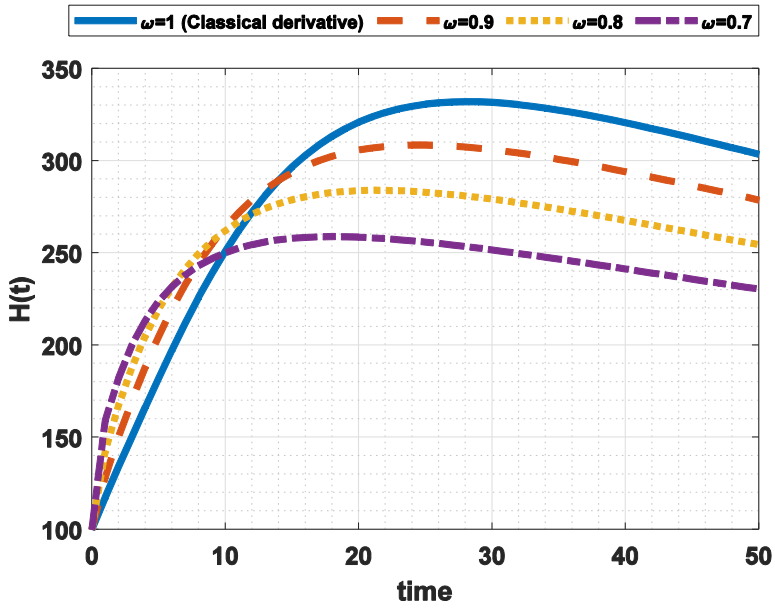
(B)


ω=1 (Classical derivative)
ω=0.9
ω=0.8
ω=0.7
I(t)
time

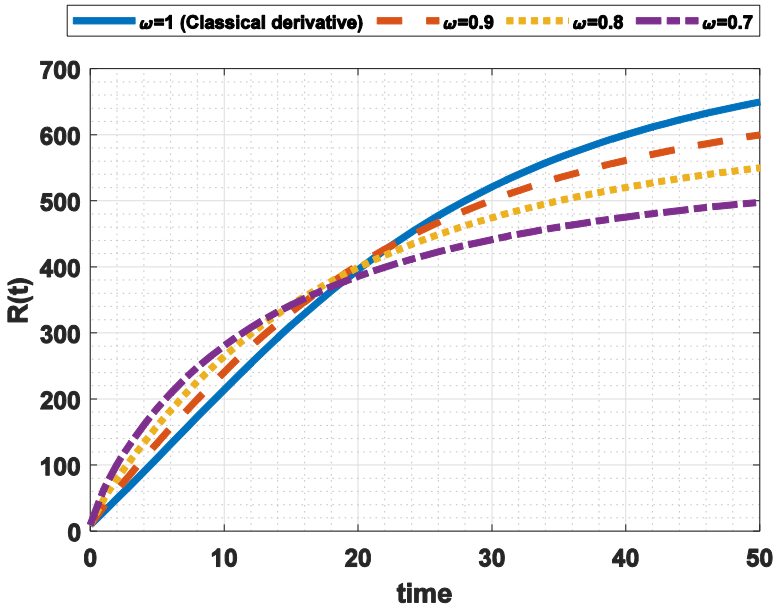
(C)


ω=1 (Classical derivative)
ω=0.9
ω=0.8
ω=0.7
A(t)
time

(D)



(E)



(F)

Figure 3: Comparison of solution functions between classical derivative ($\omega = 1$) and Caputo derivative (when $\omega = 0.9,0.8,0.7$) for the MTB disease model in (A), (B), (C), (D), (E), (F).

5. Concluding Remarks

Some crucial points and future directions of this study can be listed as follows:

1. It is well-known that non-integer order models have outperformed by their integer-order versions in many research area including biology, engineering, physics, epidemiology. For this reason, we preferred to employ an effective fractional derivative operator called Caputo for

investigating the mycobacterium tuberculosis disease model with reinfection and hospitalization. In this way, it is possible to reach more precise results regarding the course of the transmision dynamics of tuberculosis.

2. We perform an effective mathematical analysis belonging to the MTB model. Both theoretical and numerical results obtained with the fractional Caputo operator aim to contribute to disease eradication studies by shedding light on understanding the disease process.
3. In the numerical simulations, we considered fractional orders ω=0.7,0.8,0.9 alongside the classical case ($\omega = 1$). The choice of these specific values is motivated by both mathematical feasibility and biological relevance. Fractional-order derivatives inherently capture memory effects in disease progression, meaning that past states influence the current infection dynamics.
4. From an epidemiological perspective, the fractional-order parameter ω can be interpreted as a measure of disease persistence and immune memory. Lower ω values (ω < 1) represent scenarios where the disease exhibits stronger memory effects, potentially due to reinfection, prolonged latent periods, or variability in immune response. Higher ω values closer to 1 suggest that the disease follows dynamics similar to classical integer-order models, where recovery and transmission rates are more instantaneous.
5. The selected values (ω=0.7,0.8,0.9) align with existing studies in fractional epidemiological modeling and allow us to observe the progressive impact of memory effects on tuberculosis dynamics. This approach provides a systematic way to compare the fractional and classical models and offers insights into how different memory effects influence disease transmission and control strategies. Future studies can further explore the impact of ω\omegaω by fitting fractional models to real epidemiological data, optimizing ω\omegaω based on empirical observations.
6. The theoretical results of this study include positive invariant set of fractional MTB model, stability analysis, reproduction number, disease-free and endemic steady-states. In accordance with the results of our current study, the DFE of the fractional model addressed is locally asymptotically stable if $R_0 < 1$ and stable if $R_0 > 1$. Also, the EE point of the proposed system is globally asymptotically stable for $R_0 > 1$ and unstable for $R_0 < 1$. It is worth noting that the reproduction number can be controlled much better via non-integer order as done in many studies in the literature.
7. Numerical results have been introduced to provide a better understanding of the transmission dynamics of tuberculosis infection. We have shown the effect of the non-integer order ω on the system solutions of the fractional MTB model on graphs. We have mentioned that non-integer order systems can express the complex dynamics of tuberculosis disease more accurately rather than traditional models.
8. Future studies would contain real-data on the tuberculosis disease to determine the better derivative definition more precisely. On the other hand, optimal control can be carried out in

the MTB model via the Caputo derivative. Moreover, other types of fractional operator definitions can be tried for better results.

9. In this study, the tuberculosis transmission model is analyzed for the first time using the Caputo fractional derivative, providing a novel perspective on the impact of memory effects in epidemiological modeling. Future studies can extend this work by validating the proposed model with real-world epidemiological data, further enhancing its applicability and reliability in predicting tuberculosis dynamics.

Declaration of Competing Interest

The author of the article declares that there is no conflict of interest.

Summary of Researchers' Contribution Declaration

The author declares that 100% contribution has been made to the article.

Acknowledgement

The author thanks TUBİTAK for the support.

References

Acay B., Bas E., Abdeljawad T. Non-local fractional calculus from different viewpoint generated by truncated M-derivative. Journal of Computational and Applied Mathematics 2020; 366: 112410.

Acay B., Inc M., Chu YM., Almohsen B. Modeling of pressure–volume controlled artificial respiration with local derivatives. Advances in Difference Equations 2021a; 2021(1): 1-21.

Acay B., Inc M. Electrical circuits RC, LC, and RLC under generalized type non-local singular fractional operator. Fractal and Fractional 2021b; 5(1): 9.

Diethelm K., Ford NJ., Freed ADA. Predictor-corrector approach for the numerical solution of fractional differential equations. Nonlinear Dynamics 2002; 29: 3-22.

Diethelm K., Ford NJ., Freed AD. Detailed error analysis for a fractional Adams method. Numerical Algorithms 2004; 36: 31-52.

Farman M., Alfiniyah C., Shehzad A. Modelling and analysis tuberculosis (TB) model with hybrid fractional operator. Alexandria Engineering Journal 2023; 72: 463-478.

Inc M., Acay B., Berhe HW., Yusuf A., Khan A., Yao SW. Analysis of novel fractional COVID-19 model with real-life data application. Results in Physics 2021; 23: 103968.

Jarad F., Abdeljawad T., Alzabut J. Generalized fractional derivatives generated by a class of local proportional derivatives. The European Physical Journal Special Topics 2017; 226: 3457-3471.

Khan MA., Gómez-Aguilar F. Tuberculosis model with relapse via fractional conformable derivative with power law. Mathematical Methods in the Applied Sciences 2019; 42(18): 7113-7125.

Khajanchi S., Das DK., Kar TK. Dynamics of tuberculosis transmission with exogenous reinfections and endogenous reactivation. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 2018; 497: 52-71.

Miller KS., Ross B. An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations. New York: John Wiley and Sons 1993.

Mustapha UT., Idris B., Musa SS., Yusuf A. Mathematical modeling and analysis of mycobacterium tuberculosis transmission in humans with hospitalization and reinfection. Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics 2022; 21(1).

Murphy BM., Singer BH., Kirschner D. On treatment of tuberculosis in heterogeneous populations. Journal of Theoretical Biology 2003; 223(4): 391-404.

Ojo MM., Peter OJ., Goufo EFD., Panigoro HS., Oguntolu FA. Mathematical model for control of tuberculosis epidemiology. Journal of Applied Mathematics and Computing 2023; 69(1): 69-87.

Olaniyi S., Abimbade SF., Chuma FM., Adepoju OA., Falowo ODA. Fractional-order tuberculosis model with efficient and cost-effective optimal control interventions. Decision Analytics Journal 2023; 8: 100324.

Qureshi S., Jan R. Modeling of measles epidemic with optimized fractional order under Caputo differential operator. Chaos, Solitons & Fractals 2021; 145: 110766.

Qureshi S., Yusuf A. Mathematical modeling for the impacts of deforestation on wildlife species using Caputo differential operator. Chaos, Solitons & Fractals 2019; 126: 32-40.

Sweilam NH., Al-Mekhlafi SM. Numerical study for multi-strain tuberculosis (TB) model of variable-order fractional derivatives. Journal of Advanced Research 2016; 7(2): 271-283.

Ucakan Y., Gulen S., Koklu K. Analysing of tuberculosis in Turkey through SIR, SEIR and BSEIR mathematical models. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems 2021; *27*(1): 179-202.

Ullah S., Khan MA., Farooq MA. Fractional model for the dynamics of TB virus. Chaos, Solitons & Fractals 2018; 116: 63-71.

Van den Driessche P., Watmough J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. Mathematical Biosciences 2002; 180(1-2): 29-48.

Yusuf A., Acay B., Mustapha UT., Inc M., Baleanu D. Mathematical modeling of pine wilt disease with Caputo fractional operator. Chaos, Solitons & Fractals 2021; 143: 110569.

Zafar ZUA., Zaib S., Hussain MT., Tunç C., Javeed S. Analysis and numerical simulation of tuberculosis model using different fractional derivatives. Chaos, Solitons & Fractals 2022; 160: 112202.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2057-2078, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2057-2078, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Çimento Esaslı Harçlarda Faz Değiştiren Malzeme Tipinin Harcın Reolojik, Fiziksel ve Mekanik Özeliklerine Etkisinin Araştırılması

Tayfun UYGUNOĞLU[1], Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN[2*]

[1,2]Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 03030, Afyonkarahisar

[1]https://orcid.org/0000-0003-4382-8257
[2]https://orcid.org/0000-0002-1242-5642
*Sorumlu yazar: svcnbrls@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 17.01.2025
Kabul tarihi:11.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Faz değiştiren malzeme tipleri
Nano-kapsül
Çimento esaslı harç

ÖZ

Yaşadığımız evrende iklim değişikliğine sebep olan sera gazlarının çevresel etkilerinin azaltılması için enerji verimli yapıların üretilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu teşkil eden yapıların üretiminde kullanılan yapı malzemelerinde, binaların ısıtma ve soğutma yükünün azaltarak termal enerji depolamak için faz değiştiren malzeme kullanımı öne çıkmaktadır. Faz değiştiren malzemeler kapsüllenmiş ya da kapsülsüz olarak yapı malzemelerinin yalıtım ve ısı aktarım özelliklerini geliştirmek için kullanılabilmektedir. Bu çalışmada farklı tip faz değiştiren malzeme kullanım etkisini gözlemleyebilmek için belirli oranlarda (%0, %2,5, %5) nano-kapsüllenmiş ve kapsülsüz olmak üzere faz değiştiren malzemenin (FDM) iki farklı tipi çimento esaslı harca dahil edilerek etkisi araştırılmıştır. FDM katkılı harçların taze halde çökme-yayılması ve viskoziteleri belirlenirken, sertleşmiş harçlarda ultrases geçiş hızı, elektriksel özdirenç, basınç ve eğilme dayanımı değişimleri araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, faz değiştiren malzemenin harçlarda kullanılmasıyla fiziksel ve mekanik özeliklerde azalma görülmüş olup, bu azalma kapsüllü FDM kullanılan harçlarda daha fazladır.

Investigation of the Effect of Phase Change Material Type on Rheological, Physical and Mechanical Properties of Cement Based Mortars

Research Article

Article History:
Received: 17.01.2025
Accepted: 11.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Types of phase change materials
Nanocapsules
Cementitious mortar

ABSTRACT

In order to reduce the environmental effects of greenhouse gases that cause climate change in the universe we live in, it is inevitable to produce energy-efficient structures. In the construction materials used in the production of structures that constitute the vast majority of energy consumption, the use of phase-changing materials to store thermal energy by reducing the heating and cooling load of buildings stands out. Phase-changing materials can be used to improve the insulation and heat transfer properties of construction materials, either encapsulated or unencapsulated. In this study, in order to observe the effect of using different types of phase-changing materials, two different types of phase-changing materials (PCM) were added to cement-based mortars at certain rates (%0, %2.5, %5), nano-encapsulated and unencapsulated, and their effects were investigated. While the slump-spreading and viscosities of PCM-added mortars were determined in the fresh state, changes in ultrasound transmission speed, electrical resistivity, pressure and bending strength were investigated in hardened mortars. According to the findings, a decrease in physical and mechanical properties was observed with the use of phase-changing materials in mortars, and this decrease was greater in mortars using encapsulated PCM.

To Cite: Uygunoğlu T., Barlas Özgüven S. Çimento Esaslı Harçlarda Faz Değiştiren Malzeme Tipinin Harcın Reolojik, Fiziksel ve Mekanik Özeliklerine Etkisinin Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2057-2078.

1. Giriş

Barınma ihtiyacının ortaya çıkması ile şekillenmeye başlayan yapı sektörünün temel taşı yapı malzemelerinin gelişme süreci, her geçen gün bilimsel çalışmalarla desteklenmekte ve son teknolojilerle birlikte hız kazanmaktadır. Bu gelişme sürecine ise iklim krizinin etkilerinin gittikçe artması sonucu yenilebilir enerji kaynakları için gerekli enerji depolama sistemlerini geliştirme çalışmaları yön vermektedir (Anisur ve ark., 2013; Lin ve ark., 2018). Enerji depolama sistemleri sadece arz üzerindeki iklim değişikliğini etkilemekle kalmayıp aynı zamanda performans arttırıcı etki eder (Albdour ve ark., 2022; Kumar ve ark., 2023; Marani ve ark., 2023).

Yapı sektörünün enerji tüketimi iç mekanlardaki yüksek kullanım nedeniyle %30'luk bir paya karşılık gelmektedir (Cui ve ark., 2015; Muraleedharan ve Nadir, 2021; Rebelo ve ark., 2022). Bu nedenle, binanın termal performansını iyileştirmek için termal enerji depolama (TES) en iyi yöntemlerden biridir (Zastawna-Ruminand ve Nowak, 2015; Das ve ark., 2022; Guardia ve ark., 2022; Baccega ve ark., 2023). Yapı ve yapı malzemelerinde termal enerji depolama sistemi için teknolojik tasarımlar ile oluşturulan akıllı yenilikçi malzemelerden biri de faz değiştiren malzemelerdir (Waqas ve Ud Din, 2013; Dutil ve ark., 2014). Akıllı yenilikçi malzemelerden olan faz değiştiren malzemeler (FDM), katıdan sıvıya ya da sıvıdan katıya faz değişimi yaparken çok fazla miktarda termal enerjinin gizli ısı olarak depolanmasına imkan sağlamaktadır (Kumar ve ark., 2011; Hattan ve ark., 2021; Frahat ve ark., 2023; Peng ve ark., 2023). FDM'ler ısı için kullanıldığında kullanım amacına göre döngü stabilitesi değişeceği için faz ayrımı ana sorunlardan biri olmaktadır. FDM birkaç bileşenden oluştuğunda, döngü sonrası farklı bileşimlere sahip fazlar meydana gelebilmektedir (Zhu ve ark., 2009; Shahzad ve ark., 2021). Faz ayrımı sonrası oluşan farklı bileşime sahip fazlar ısı depolama için optimize edilmezlerse, daha sonra önemli ölçüde düşük ısı depolama kapasitesi gösterebilmektedir (Goia ve ark., 2014; Yuan ve Zhang, 2014). FDM olarak tercih edilecek malzemede dikkate alınması gereken en önemli özellik, ısıl enerji depolama kapasitesinin yüksek olması ve genel olarak inorganiklerin organiklerden daha yüksek olmasıdır (Yahay ve Ahmad, 2011; Vicente ve Silva, 2014; Hao ve ark., 2022; Yu ve ark., 2023). Ancak faz değiştiren malzemelerin yapı malzemelerinde kullanılmasında nano-FDM'lerin yapı malzemeleri ile etkileşime girmesi sonucu yapısı ve özelliklerinin değişebileceği (Agyenim ve ark., 2010; Biwan ve ark., 2015; Ramakrishnan ve ark., 2015; Yu ve ark., 2022), yapı servis ömrü boyunca sızıntı olabileceği göz ardı edilmeyerek bu sorunları çözmek için mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler, konveksiyonel yapı malzemelerine entegre edilmektedir (Tyagi ve ark., 2016; Alsaadawi ve ark., 2022; Bondareva ve Sheremet, 2022; Marani ve ark., 2023; Yan ve ark., 2023; Zhu ve ark., 2023).

Kapsüllemeler genellikle boyutlarına göre makro (Yu ve Tao, 2023) ve mikrokapsülleme olarak sınıflandırılmaktadır (Illampas ve ark., 2021; Cheng ve ark., 2023). Mikrokapsülleme, mikronize malzemelerin (hem sıvı hem de katı) boyutları 1 μm'den büyük 300 μm'den küçük değerler arasında

değişen kapsüller şeklinde paketlenme işlemidir (Tseng ve ark., 2005; Rao ve ark., 2007; Sarcinella ve ark., 2023). Mikrokapsülleme de çekirdek malzeme, kaplanacak spesifik malzeme olarak tanımlanır ve sıcaklığa bağlı olarak sıvı veya katı halde olabilmektedir (Schossig ve ark., 2005; Boh ve Simuga, 2008; Cabeza ve ark., 2011; Whang ve ark., 2013; Ma ve ark., 2014). Kapsülün içindeki öz malzemenin kütlece oranı genellikle %20 ile %95 değerleri arasındadır. Mikrokapsüller, tek bir partikül veya partikül kümelerinden meydana gelebilmektedir (Tan ve ark., 2009; Zhang ve ark., 2012; Qiu ve ark., 2014; Jacob ve Bruno, 2015). Mikrokapsülleme verimliliği, çekirdek-kaplama oranı, emülsifiye etme süresi ve çapraz bağlama maddesi miktarı gibi işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Kapsüllemenin yüzeyi, ısı transfer yüzeyi olarak işlev görmekte ayrıca bazı durumlarda, kapsülleme malzemeye bir yapı elemanı olarak mekanik stabilite katmaktadır (Zhang ve ark., 2004; Hunger ve ark., 2010; Zhang ve ark., 2010; You ve ark., 2011). Zhao ve Zhang (2011) yaptıkları çalışmada termal enerji depolamada mikrokapsüllenmiş FDM kullandıkları bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemenin FDM'ye göre artan bir ısı transfer alanına sahip olduğu ve FDM'lerin reaktivitesini azaltarak dış ortam ve depolama malzeme hacmindeki değişiklikleri kontrol altında tutabildiği belirlenmiştir (Zhao ve Zhang, 2011). FDM'ler, dar bir sıcaklık aralığında yüksek enerji depolama yoğunluğundan yararlanan fonksiyonel bir malzeme olduğu için uygulamanın yapılacağı ana iklim bölgeleri ve enlem aralıkları da dikkate alınmalıdır. FDM'lerin uygulama etkileri olarak binalarda termal performansı iyileştirme, enerji tasarrufu ve karbondioksit emisyonunun azaltılması için farklı iklim bölgelerinde incelenmesi gerekmektedir (Baetens ve ark., 2010; Raj ve Velaj, 2010; Kylili ve ark., 2016). Cui vd. (2017), FDM'lerin uygulama türlerini ve FDM termal-fiziksel özelliklerini baz alarak farklı iklimsel bölgelerde malzeme üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırma alanları için ağırlıklı olarak 25°-60° kuzey enlemi ve 25°-40° güney enlemi üzerine yoğunlaşmışlardır. Çalışma sonuçları incelendiğinde tüm bölgelerde en yaygın kullanıma sahip olan parafinin maksimum kullanım sıklığı %87,5'e kadar çıkmaktadır. Organik faz değiştiren malzeme için, erime sıcaklığı ve füzyon ısısı sırasıyla 19°C-29°C ve 120 kJ/kg-280 kJ/kg arasında değişmektedir. Bulunan en iyi faz değiştiren malzeme uygulaması etkisi ile odadaki hava sıcaklığında 4,2°C'lik bir azalma meydana geldiği görülmüştür (Cui ve ark., 2017).

FDM'lerin duvarlara, tavana ve zemine dahil edilmesi binaların doğrudan güneş enerjisini yakalamasına ve önemli miktarda depolamasına imkan sağlamaktadır (Mandilaras ve ark., 2013; Soares ve ark., 2013). Büyük yapısal kütleye ihtiyaç duyulmadan iç ortamdaki hava sıcaklığı dalgalanma sıklığını azaltması ve sıcaklığı daha uzun bir süre boyunca istenen değere yakın tutması nedeniyle yapı ve yapı malzemelerinde organik, inorganik ve ötektik FDM kullanımı gittikçe artmaktadır (Weinlader ve ark., 2005; Barreneche, 2013; Evola ve ark., 2013; Kong ve ark., 2014). Lee vd. (2000), sıradan beton blokların termal depolama performansını karşılaştırmak için iki farklı malzeme olan Butil Stearat (Emerest 2326) ve Parafin (Unicere 55) ile emprenye edilmiş FDM'leri yalın FDM'yle karşılaştırarak makro ölçekli test sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca, ısı depolama ve tahliye oranlarının kontrolü açısından hava hızının etkisi incelemişlerdir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde iki farklı malzeme

ile emprenye edilmiş FDM'nin gizli ısıların yanı sıra betonun hissedilir ısısını depolayabilen bloklar üretmek için uygun olduğu ve depolamanın daha pratik olarak yapılabildiği sonucuna varılmıştır (Lee ve ark., 2000).

Dora ve Mini (2023), nano silika ve hindistan cevizi lifi kombinasyonları içeren organik bir FDM'yi çimento harçlı karışımlara dahil ederek bir çalışma yapmışlardır. Başlangıçta, geliştirilen FDM'nin birincil özellikleri olan mekanik davranış, mikro yapı gözlemleri ve termal etkileri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Uygulama sahasında kapasitesini tahmin etmek için, FDM kompozit harç levhaları geliştirilmiş ve fiziksel ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Bu testlerin sonuçlarına dayanarak, FDM varlığının harç levhaların termal özelliklerini iyileştirdiği ve nano silika ve lif ilavesinin harç levhaların fiziksel ve mekanik mukavemetini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Harcın karakterizasyonu ile ilgili olarak da eğilme mukavemetinde % 8,06 artış elde edilirken, klorür difüzyonunda % 10,24, su emmede % 17, kılcal su emme katsayısında % 8,56 ve ultrasonik darbe hızında azalma olduğu gözlenmiştir. SEM ve EDS test sonuçlarına göre, nano silika ve hindistan cevizi lifine ek olarak %5 FDM ile değiştirilen ince agrega, gözeneklerden etkili bir şekilde nüfuz ederek harçla daha iyi uyum sağladığı belirlenmiştir. TGA değerlendirmesi, önerilen FDM kompozit çimento harç levhasının mükemmel termal dayanıklılığa sahip olduğunu ortaya koymuştur (Dora ve Mini, 2023).

Moustapha vd. (2023), yüksek fırın cürufu ve metakaolin kombinasyonuna dayalı jeopolimer harçların ve portland çimento bazlı harçların sodyum klorür iyonu taşıma özelliklerine MFDM ilavesinin etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda on iki farklı harç (üç çimento bazlı ve dokuz jeopolimer bazlı), MFDM içeriği sırasıyla %0, %5 ve %10 olarak değiştirilerek iki harç tipinde incelenmiştir. Çalışma sonucunda MFDM ilavesinin toplam gözenekliliği arttırdığını, bunun da kılcal su emilimini arttırdığını ve elektrik direncini azalttığını belirlemişlerdir. Buna ek olarak MFDM ilavesi, aglomerasyon etkisinden dolayı kritik çapı ve gözenek bağlantısını da azaltmıştır. Ayrıca MFDM'lerin klorür iyonu bağlama kapasitesini de arttırdığı gözlenmiştir. Her iki etki de durağan durum geçiş katsayısının düşmesine neden olmuştur (Moustapha ve ark., 2023). Gbekou vd. (2022) ise %100 biyo-bazlı ince çekirdek-kabuk parçacıklarının sulu bir dağılımından oluşan mikrokapsüllü faz değişim malzemeleri (MFDM'ler) içeren çimento harçlarının mekanik ve termofiziksel performansını araştırmışlardır. Homojen bir partikül dağılımı sağlayan ve mikrokapsül sızıntısını önleyen harç numuneleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Harca MFDM'lerin eklenmesi hem yoğunluğun azalmasına, gözenekliliğin artmasına hem de önemli ölçüde mekanik dayanım kaybına neden olmuştur. Bununla birlikte sıcak disk karakterizasyonu, termal performansta büyük bir gelişme göstermiştir. Ağırlıkça %8 MFDM içeren harç harışımların, mekanik ve termal özellikleri arasında iyi bir denge sergilediği sonucuna varmışlardır (Gbekou ve ark., 2022).

Yukarıda bahsedilen çalışmalar incelendiğinde, faz değiştiren malzemelerin özellikle çimento hamuru içerisindeki etkilerinin genellikle termal performans açısından gerçekleştirildiği görülmektedir. Çimentolu kompozitlerde farklı tipte FDM kullanımının reolojik, fiziksel ve mekanik özeliklere etkisi üzerine çok az sayıda araştırmalar yapılmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada kapsüllü ve kapsülsüz olarak

faz değiştiren malzemelerin çimentolu kompozitlerde kullanıldıklarında reolojik, fiziksel ve mekanik özeliklere etkisi araştırılarak karşılaştırılmıştır.

2.Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalar çimento esaslı harç karışımlar ile yapılmış olup, çimento olarak Afyon Çimento Sanayi Fabrikasının üretimi olan CEM I 42,5N Portland çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3,1 ve özgül yüzey alanı 3320 cm^2/g'dır. Portland çimentonun kimyasal ve fiziksel özelikleri Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Çimento esaslı harç üretiminde özgül ağırlığı 2,64 olan 0,5-400 mikron aralığında silis kumu ve kimyasal katkı olarak da yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı Sika-Master Glenium 51 kullanılmıştır. Çimento esaslı harç karışımların üretiminde özel bir standart olmadığı için şehir şebeke suyu tercih edilmiştir.

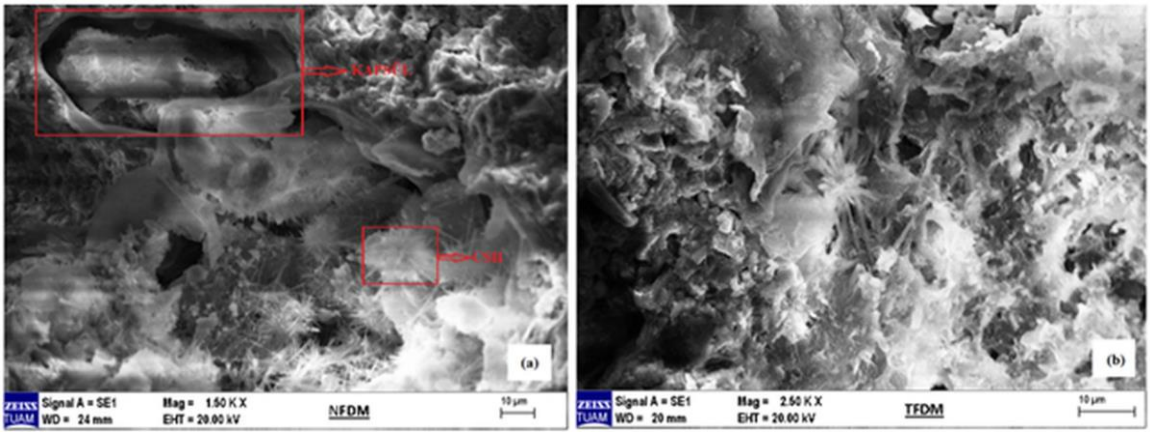
Tablo 1. Portland çimentonun kimyasal özelikleri

Kimyasal Analiz	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
CEM I 42.5(%)	63,56	19,3	5,57	3,46	0.86	2,96	0,80	0,13

Tablo 2. Portland çimentonun fiziksel özelikleri

Çimento Tipi	**Özgül Ağırlık**	**İncelik (cm^2/g)**
CEM I 42.5N	3,10	3320

Deneysel çalışmalarda kullanılan FDM'ler 10 μm boyutu büyüklüğünde nano kapsüllenmiş halde olup, FDM'ler poliüretanla nano kapsüllenmiştir. Nano-kapsüller, arayüzey polimerizasyonu ile sentezlenerek oluşturulmuştur. Deneylerde kulanılan numunelerin isimleri faz değiştiren malzeme tipine göre belirlenmiş olup kapsülsüz faz değiştiren malzemeler KPSLZ ile; nano-kapsüllü faz değiştiren malzemeler ise Nano-KPSL ile ifade edilmiştir. Nano-KPSL ve KPSLZ katkılı çimento esaslı harçların SEM analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde LEO 1430 VP model SEM cihazında yapılmış olup, SEM görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. (a): Nano-KPSL ve (b): KPSLZ katkılı çimento esaslı harçların SEM görüntüleri

2.2. Harç Üretimleri

FDM'lerin çimentolu kompozitlerde kullanımına ilişkin yapılan çalışmalarda genellikle dayanım kayıpları da dikkate alındığında en fazla %5 oranında kullanılmıştır (Hunger ve ark., 2009; Ramakrishnan ve ark., 2015). Bu nedenle, deneysel çalışmalar çimento ağırlığının %0, %2,5 ve %5 oranında Nano-KPSL ve KPSLZ FDM katkılı harçlar üzerinde yapılmıştır. Harç karışım oranları ve bileşen miktarları Tablo 3'te gösterilmiştir. FDM katkı karışımlarda silis kumu yerine ikame edilmiştir. Harç karışımları %0,5 oranında yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılarak, 0,5 su/çimento oranında hazırlanmıştır.

Tablo 3. Harç karışım oranları ve bileşen miktarları

Karışım	Katkı oranı (%)	Çimento (gr)	Silis kumu (gr)	FDM (gr)	Su (gr)	Kimyasal katkı (gr)
Kontrol	0	750	450	----	375	3,75
KPSLZ2.5	2,5	750	431,25	18,75	375	3,75
KPSLZ5	5	750	412,50	37,50	375	3,75
Nano-KPSL2.5	2,5	750	431,25	18,75	375	3,75
Nano-KPSL5	5	750	412,50	37,50	375	3,75

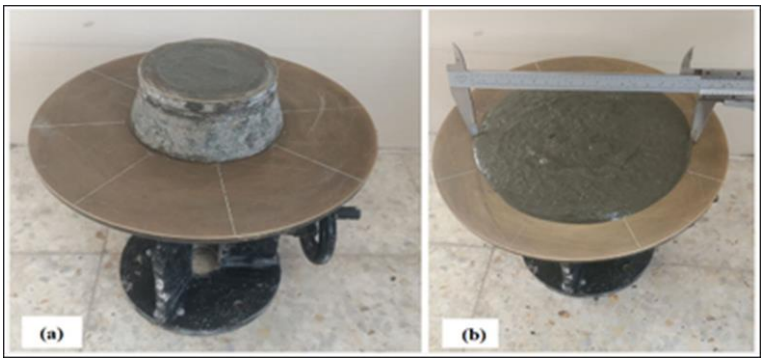
Karışımda yer alan tüm bileşenler laboratuvar tipi mekanik mikserde öncelikle kuru olarak karıştırılmıştır. Sonrasında kimyasal katkı karışım suyu içinde çözdürülerek kuru karışıma eklenmiş ve homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Deneysel çalışmalar için çimento esaslı FDM katkılı harç karışımların hazırlanması

2.3. Deneyler

Çalışma kapsamında harçların reolojik ve fiziksel özeliklerinin belirlenmesi için yayılma, viskozite, ultrases geçiş hızı ve elektriksel özdirenç deneyi; mekanik özelikleri belirlemek için de basınç ve eğilme deneyi yapılmıştır. İlk olarak taze harç karışımların yayılma deneyi TS EN-12350-6 (2010) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Harç karışımlar, yayılma tablası üzerine yerleştirilen koniye doldurulduktan sonra koninin yukarıya doğru çekilmesiyle harç tabla üzerine bırakılmıştır. Harç yayılma tablası üzerinde iken tabla kolu çevrilerek 15 vuruş yaptırılmıştır. Darbe sonrası yayılan harçların yayılma çapları ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 3).



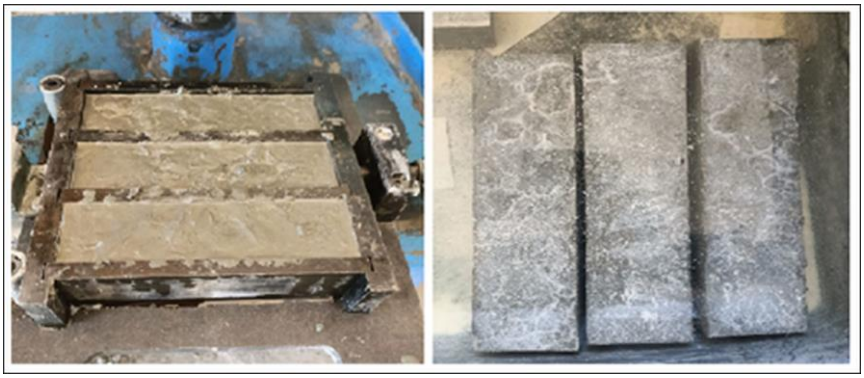
Şekil 3. (a): Mini koni içerisine harç yerleştirilmesi. (b): Harcın yayılma çapının ölçülmesi

Çimento esaslı, %0, %2,5 ve %5 oranında faz değiştiren malzeme katkılı harç karışımların viskozite ölçümleri Brookfield RV-II Pro marka viskozite cihazı ile yapılmış olup, V-73 nolu kanat şeklindeki uç kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çimento esaslı FDM katkılı harçların viskozitelerinin belirlenmesi

Çalışma kapsamında yapılacak her bir deney için üçer adet numune hazırlamak amacıyla 40x40x160 mm boyutundaki prizmatik kalıpların iç yüzeylerinin yağlanması işlemi yapılmıştır. Harçların masa tipi vibrasyon makinesi ile prizmatik kalıplar içerisine yerleştirilmesi sağlandıktan sonra 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saat sonunda numuneler kalıplarından çıkartılıp dayanım kazanması için sıcaklığın 20±2 ^{o}C olduğu ortamdaki su havuzunda (3,7, 28 gün) boyunca standart kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 5). İlgili deney günlerinde sertleşmiş harçlar üzerinde deneyler gerçekleştirilmiş olup, deneylerden elde edilen verilerin ortalaması sonuç olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5. Harç karışımların kalıplanması ve kür edilmesi

Ultrases geçiş hızı deneyinde kullanılacak prizmatik numunelerin yüzeyleri temizlendikten sonra problar ile numune yüzeyi arasında boşluk oluşmasını engellemek için jel sürülmüştür. Numunelerde ultrases deneyi direkt ölçüm yöntemiyle yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Ultrases cihazı ile ölçümlerin yapılması

Deney numunelerinin ASTM C 1760 (2012) standardına göre elektriksel özdirenç değeri (R), 0.1,1,10 ve 100 kHz frekans değerleri için iki plaka yöntemine göre ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 7). Harç numunelerinin elde edilen direnç değerleri ile

$$\delta = (R * A)/L \tag{1}$$

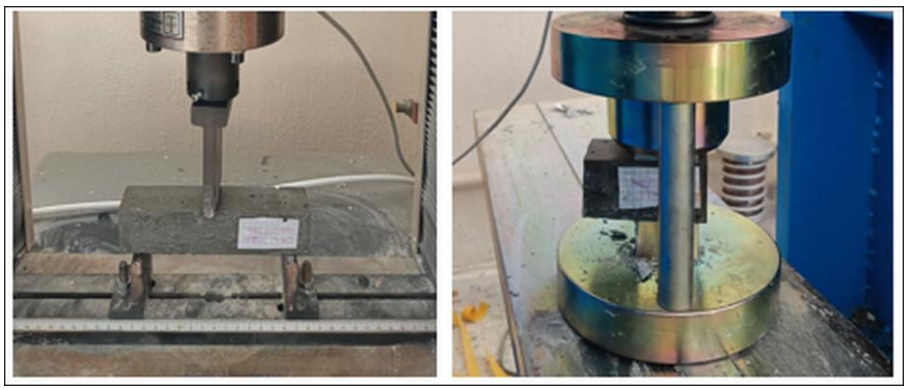
Elektriksel özdirenç değerleri hesaplanırken bağıntı (1) kullanılmıştır. Bağıntıda, δ, elektriksel özdirenç (kohm.m); R,direnç (kohm); ve L, plakalar arası mesafeyi (m) ve A, numune yüzey alanı (m^2) ile gösterilmektedir.



Şekil 7. Elektriksel direnç ölçümü

Deney numunelerinin eğilmede çekme dayanımları TS EN 12390-5 (2010) standardına uygun olarak Mitech marka cihazda, mesnet açıklığı 120 mm'ye ayarlanarak 40x40x160 mm boyutlu numunelerde orta noktadan yükleme yöntemi ile belirlenmiştir. TS EN 12390-3 (2010) standardına göre

gerçekleştirilen basınç deneyleri için eğilmede çekme dayanımı deneyi sonrası ortadan ikiye bölünen numuneler kullanılmıştır (Şekil 8).



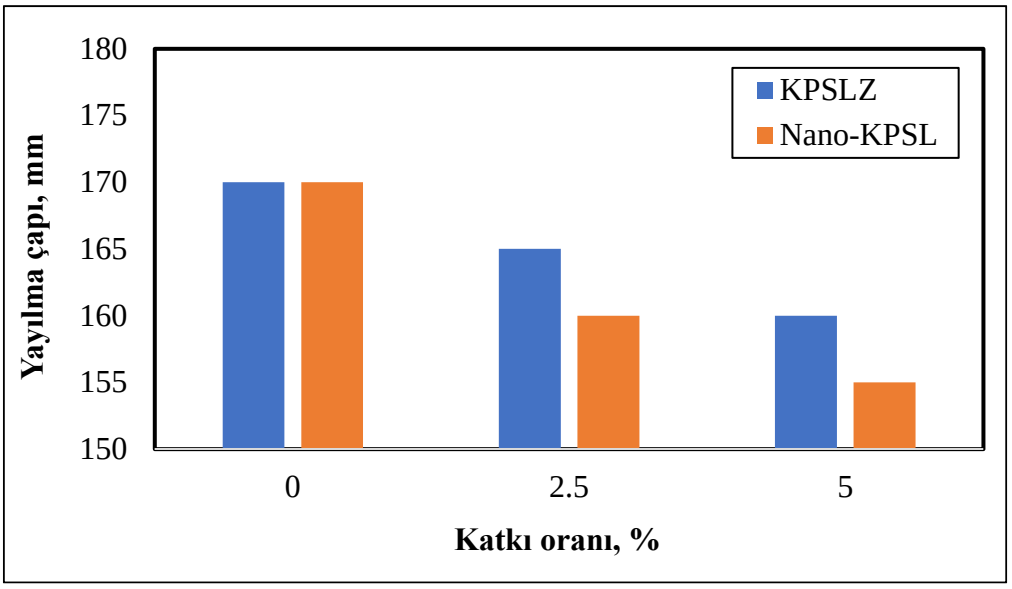
Şekil 8. Deney numunelerinde eğilme ve basınç dayanımı

3. Bulgular ve Tartışma

Çimento harçlarının içerisine nano-kapsüllü FDM (Nano-KPSL) ve kapsülsüz FDM (KPSLZ) ilave edilmesiyle elde edilen numuneler ile kontrol numunesi üzerinde yapılan deneysel çalışmaların verileri toplandıktan sonra gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

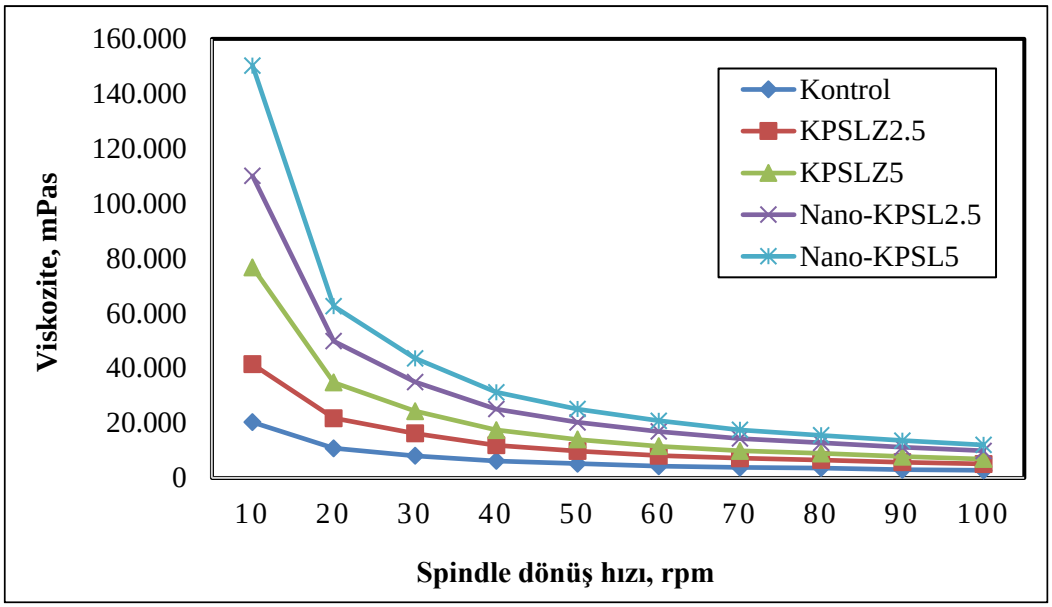
3.1.Taze Harç Üretimleri

Çimento esaslı harçlarının içerisine %0, %2,5 ve %5 Nano-KPSL ve KPSLZ katkıların eklenmesiyle hazırlanan numunelerin yayılma çaplarındaki değişimler Şekil 9'da verilmektedir. Çimento esaslı faz değiştiren malzeme katkılı harçlarda, her iki FDM tipi için kullanım oranı arttıkça yayılma çapı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Cabeza vd. (2007) bu sonucu faz değiştiren malzemenin harçlarda katkı olarak kullanılması ile karışımdaki granüler dağılımın değişmesine bağlamışlardır (Cabeza ve ark., 2007). Kontol harcına göre %2,5 ve %5 oranında KPSLZ harç için yayılma çapındaki azalma oranı %3 ve %6; Nano-KPSL harç için ise %6 ve %9'dur. KPSLZ katkılı çimento esaslı harçlarda Nano-KPSL katkı içeren harçlara göre %3 oranında daha yüksek yayılma çapı değerleri elde edilmiştir. Kapsülsüz kullanılan faz değiştiren malzemenin çimento esaslı karışıma ilave edilirken doğrudan sıvı halde kullanılması, harcın işlenebilirliğinin kapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkı kullanımına göre kısmen arttırmasına neden olmuştur. Pires vd. (2013) kapsüllenmiş FDM'lerin hidrofilik akrilik kabuğu tarafından suyun emilmesi nedeniyle yayılma çapının azalabileceğini belirterek bu sonuçları desteklemişlerdir (Pires ve ark.,2013).



Şekil 9. Harçların FDM katkısına bağlı yayılma çaplarındaki değişim

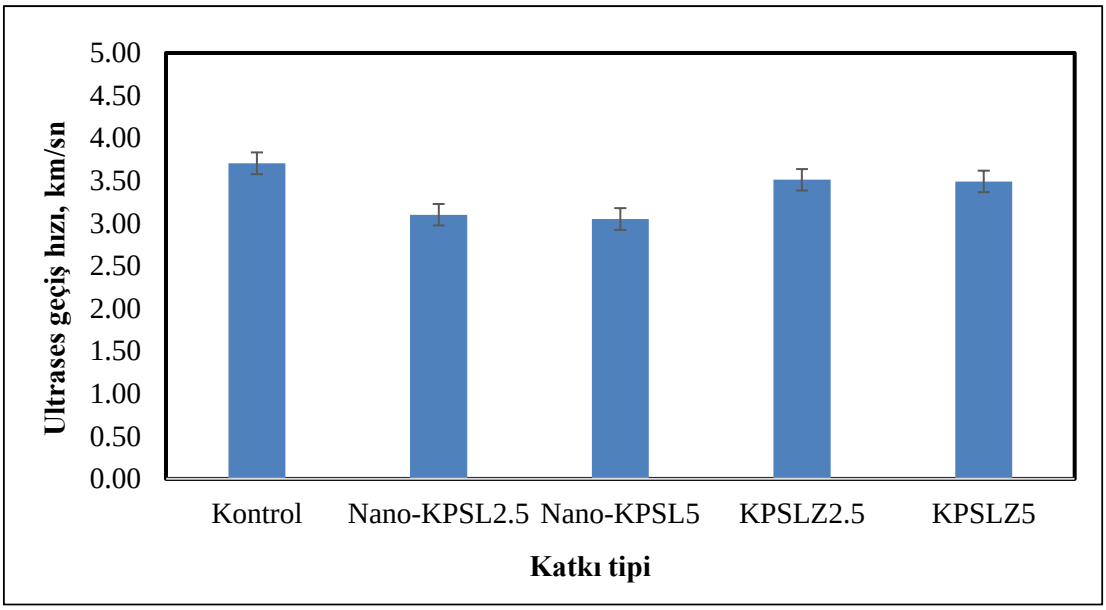
FDM'li harçların görünen viskozitelerindeki değişimler 10-100 dev/dk kayma hızı değerlerinde ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 10). Çimento esaslı harçların görünen viskozite değerlerinin olabildiğince düşük olması yüksek akışkanlığa sahip oldukları anlamına gelmektedir. Tüm harç karışımlarının görünen viskozite değerleri deformasyon hızının arttırılmasıyla birlikte azalmaktadır. Hem Nano-KPSL hem de KPSLZ katkılı harçlarda tüm hız değerlerinde kontrol numuneye göre daha yüksek viskozite değeri elde edilmiştir. Bununla birlikte KPSLZ katkılı numuneler Nano-KPSL katkılı numunelerle kıyaslandığında daha düşük viskozite değerinde olduğu görülmüştür. Yayılma değerlerinde olduğu gibi, KPSLZ sıvı halde karışıma ilave edildiğinden harcın akışkanlığa karşı direnci azalmış ve görünen viskozite değerlerinin katı partikül halinde olan Nano-KPSL katkısına göre daha yüksek olmasını sağlamıştır. Pilevhar vd. (2020) yaptıkları çalışmada akma gerilmesi ve plastik viskozitenin daha yüksek miktarda mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme (MEPCM) içeren harçlarda artmasını MEPCM yüzeyinin daha fazla su emmesinden olabileceğini belirtmişlerdir (Pilevhar ve ark., 2020).



Şekil 10. Deney numunelerinin görünen viskozite değerleri

3.2. Ultrases Geçiş Hızı

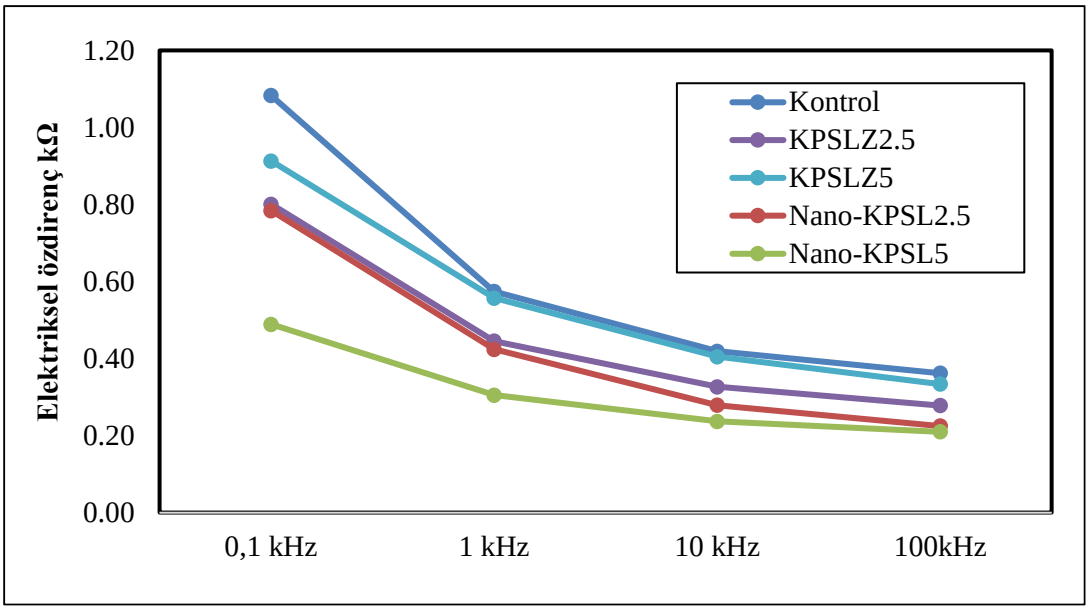
Ultrases geçirgenliğine bağlı olarak beton dayanımı açısından kalite değerlendirmesi yapılabilmektedir. Deney numuneleri üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı (UPV) deney sonuçları incelendiğinde kontrol numune ile faz değiştiren malzeme katkılı numunelerin değerlerinde belirgin bir farklılık gözlenmemiştir (Şekil 11). Tüm FDM katkılı harçların UPV değerleri kontrol harca göre az da olsa daha düşük değerlere sahiptir. Nano-KPSL katkılı numunelerde kontrol harca göre %19 oranında daha düşük UPV elde edilmiştir. FDM'li harçlar içerisinde en yüksek ultrases geçiş hızı %2,5 KPSLZ katkılı harçlarda, en düşük ultrases geçiş hızı %5 Nano-KPSL katkılı numunelerde elde edilmiştir. Nano-KPSL malzemeler polimerik malzemelerden üretilmeleri nedeniyle harç içerisinde sesin iletilmesini kısmen de olsa yavaşlatmış ve bundan dolayı da UPV değerlerinin diğer harçlara göre daha düşük olmasına neden olmuştur. Zebari vd. (2017) çimentolu kompozitlerin ultrases geçiş hızı değerleriyle dayanımları arasında ki etkileşim üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada verilen bilgilere göre, Nano-KPSL olan seriler orta dayanım sınıfındayken, KPSLZ olan serilerin kalitesi dayanım açısından iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Deney numunelerin ultrases geçiş hızı

3.3. Elektriksel Özdirenç

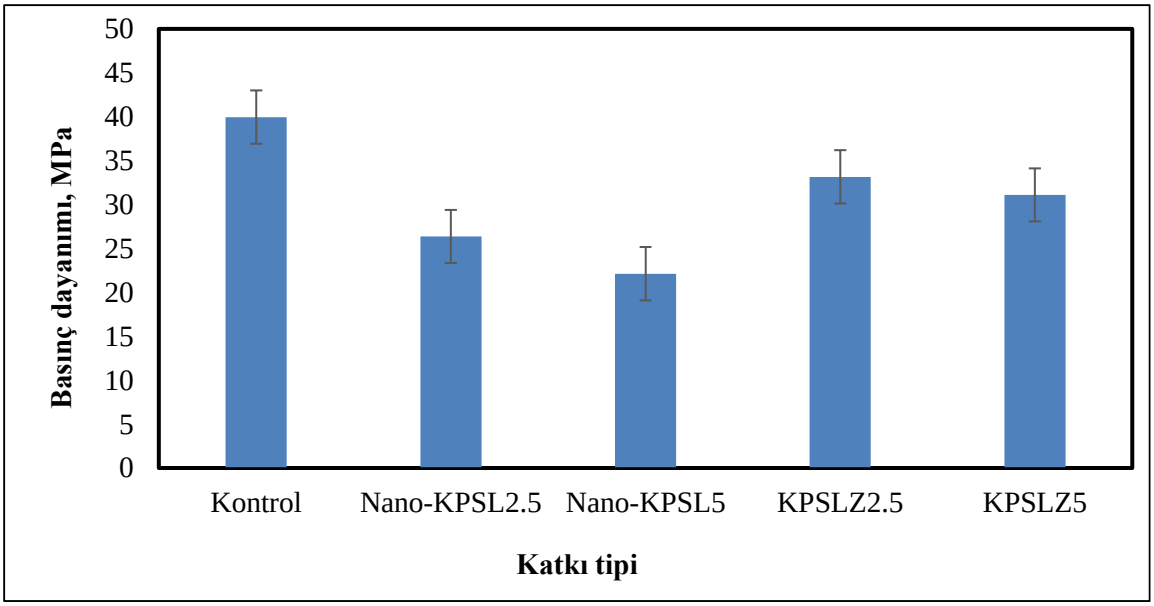
Çimento esaslı harçların kullanıldığı yerlerde özellikle inşaat donatısı olması durumunda korozyon riski ortaya çıkmaktadır. İnşaat demirinin korozyonunda en önemli etkenlerden birisi de ortamın elektrik iletkenliğidir (Hornbostel ve ark., 2013). Çimento esaslı harçlarda %0, %2,5 ve %5 FDM katkı kullanımı ile elde edilen numunelerin elektriksel özdirenç değerleri 0.1,1,10 ve 100 kHz frekans için grafikte gösterilmiştir (Şekil 12). Çimento esaslı harçlarda frekans artışına paralel olarak iyon transferinin hızlanması daha düşük değerde elektriksel özdirenç elde edilmesine neden olmaktadır. Farklı frekans değerleri için numunelerin elektriksel özdirençleri incelendiğinde Nano-KPSL artışına bağlı olarak özdirenç değerleri azalmıştır. Ancak, KPSLZ içeren harçlarda düşük frekans değerinde tersine durum gözlenmiş olup, elektriksel özdirenç değerleri kapsülsüz FDM içerine bağlı olarak artmıştır. Bunun nedeni kapsülün yüzey geriliminden dolayıdır (Mira-Hernández, 2025). Hornbostel ve ark., (2013) çimentolu kompozitlerin elektriksel özdirenç değerleri açısından korozyon risk durumlarını sınıflandırmışlardır. Klorür bulunan ortamlarda 0,3-1,0 kohm değerleri arasında düşük korozyon riski; 0,3-0,1 kohm değerleri arasında orta derecede korozyon riski olduğunu belirtmişlerdir. FDM katkılı harçların elektriksel özdirenç değerleri dikkate alındığında; düşük frekansta orta derecede korozyon riski, yüksek frekans değerlerinde ise düşük korozyon riski oluşturacağı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 12. FDM katkılı numunelerin farklı frekanslar için elektriksel özdirenç değerleri

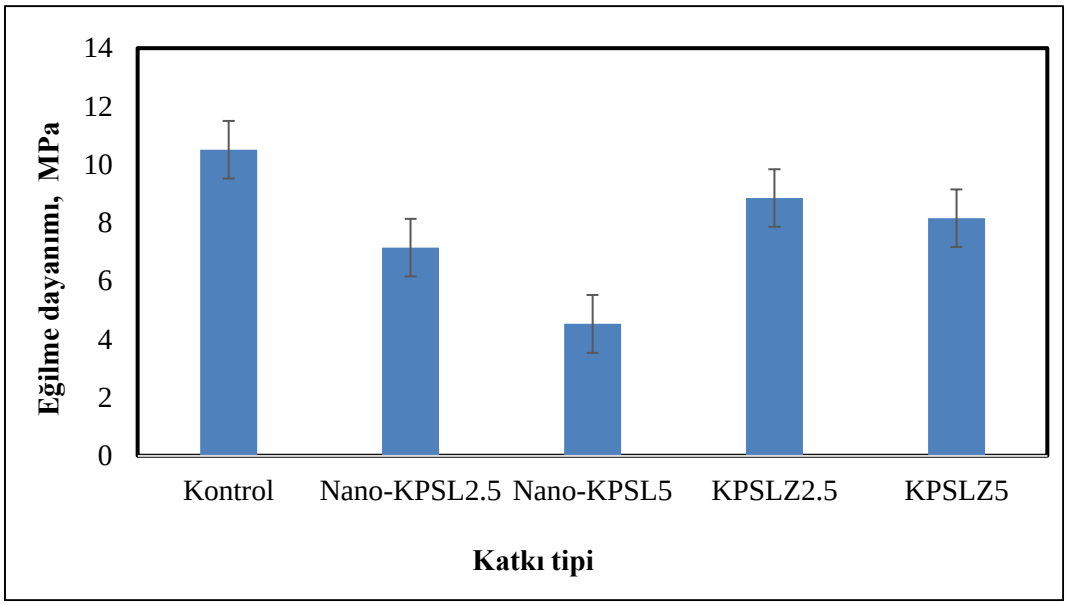
3.4. Basınç ve Eğilme Dayanımı

FDM katkılı tüm numunelerin basınç ve eğilme dayanımı sonuçları kontrol numune ile karşılaştırıldığında daha düşük değerler elde edilmiştir. Ayrıca FDM kullanım oranının artmasıyla birlikte her iki katkı tipinde dayanım azalmıştır. KPSLZ katkılı harçlarda bu azalma oranları sırasıyla yaklaşık %17 ve %22 iken Nano-KPSL katkılı harçlar için yaklaşık %34 ve %44 oranlarında olmuştur (Şekil 13). Fenollera ve ark., (2013) benzer bir çalışmada karışıma eklenen her %5 oranındaki mikrokapsüllenmiş FDM'nin, harç dayanımını yaklaşık %7 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir (Fenollera ve ark., 2013).



Şekil 13. Deney numunelerinin basınç dayanımı

Eğilme dayanımında ise tüm numunelerin değerleri kontrol numune değerine göre azalmıştır. Bütün katkılı numunelerde FDM oranı arttıkça eğilme dayanımında azalma meydana gelmiştir. Kontrol numuneye göre KPSLZ katkılı harçlarda bu azalma oranları sırasıyla yaklaşık %32 ve %57 iken Nano-KPSL katkılı harçlar için yaklaşık %16 ve %22 oranlarında olmuştur (Şekil 14). Çoğu araştırma sonucunda, mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemenin çimento kompozitinin gözenekliliğini arttırdığı dolayısıyla da mekanik özelliklerini etkilediği vurgulanmıştır (Djamai ve ark., 2019; Drissi ve ark., 2021). Harçların karıştırma işlemi sırasında bazı FDM kapsülleri hasar görebilir ve sızan parafin mumu çimento matrisinin hidratasyon işlemini engelleyebilir. Bunun sonucunda bulundukları bölgede zayıf alanlar oluşması nedeniyle harç dayanımlarında azalmalar görülebileceği belirtilmiştir (Illampas ve ark., 2021; Marani ve ark., 2023).



Şekil 14. Deney numunelerinin eğilme dayanımı

4. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, farklı oranlarda Nano-KPSL ve KPSLZ katkı içeren çimento esaslı harçların reolojik, fiziksel ve mekanik özeliklerindeki değişimler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

- Çimento esaslı harçların işlenebilirlikleri hem kapsülsüz hem de nano-kapsüllü FDM kullanılmasıyla azalmıştır. Nano-KPSL katkı oranının %2,5 ve %5 olduğu harçlarda, yayılma çapı değerinin kontrol harcına göre %6 ve %9; KPSLZ harç için ise aynı katkı oranlarındaki yayılma çapı değerinin %3 ve %6 oranında azaldığı görülmüştür.
- Görünen viskozite değerleri incelendiğinde, Nano-KPSL ve KPSLZ katkılı çimento esaslı numunelerde katkı oranı artışının viskozitenin artmasına neden olduğu gözlenmiştir. Ayrıca KPSLZ katkılı numunelerin Nano-KPSL katkılı numunelere göre daha düşük viskoziteye sahip oldukları sonucuna varılmıştır. Diğer yandan, harç karışımların tamamında deformasyon hızının arttırılmasıyla

birlikte görünen viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Kontrol numunede katkılı numunelere göre bütün deformasyon hızları için daha düşük viskozite değeri elde edilmiştir.

- FDM'li harçlar içerisinde en yüksek ultrases geçiş hızı %2,5 KPSLZ katkılı harçta elde edilirken en düşük değer %5 Nano-KPSL katkılı numunelerde elde edilmiştir. Faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harç numunelerde gerçekleştirilen ultrases deney sonuçları incelendiğinde, kontrol numuneye göre Nano-KPSL'li katkılı numunelerde %19 oranında daha düşük UPV elde edilmiştir.
- Deney numunelerinin farklı frekans değerleri için elektriksel özdirençleri incelendiğinde frekans artışına bağlı olarak direnç değerleri azalmıştır. En yüksek elektriksel özdirenç kontrol numunesinde, en düşük değer de %5 Nano-KPSL ilaveli numunede elde edilmiştir. Harç içerisinde Nano-KPSL oranı arttıkça elektriksel özdirenç azalmakta, KPSLZ oranı arttığında ise artmaktadır.
- FDM kullanım oranının %2,5'tan %5 oranına arttırılmasıyla da her iki katkı tipinde dayanım azalmıştır. KPSLZ katkılı harçlarda bu azalma oranları sırasıyla yaklaşık %17 ve %22 iken Nano-KPSL katkılı harçlar için yaklaşık %34 ve %44 oranlarında olmuştur.
- Kontrol numuneye göre KPSLZ katkılı harçlarda eğilme dayanımında azalma meydana gelmiş olup, bu azalma oranları sırasıyla yaklaşık %32 ve %57 iken Nano-KPSL katkılı harçlar için yaklaşık %16 ve %22 oranlarında olmuştur.

FDM'nin kapsüllü ve kapsülsüz olarak fiziksel ve mekanik özeliklere etkisi genel olarak değerlendirildiğinde, kapsülsüz olarak kullanımı durumunda kontrol harca göre az da olsa azalmalar olmakla birlikte, kapsüllü kullanılması durumunda olumsuz etkisi daha fazla olmuştur. Ancak, FDM'lerin ısıl performans açsından tekrarlı kullanımda kapsüllü olanlar daha etkili olmaktadır. Kapsülsüz olanlar harç içerisinde hidratasyon ürünleri arasında sıvı olarak dağıldığından ısıl özelikler açısından çok az ömürleri olacaktır. Bu nedenle kapsüllü FDM kullanımı ısıl enerji depolama ve tekrar kullanım açısından daha etkili olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmayı destekleyen YÖK100/2000 doktora programına ve TÜBİTAK 221M784'e teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanmış olan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması yoktur. Sunulan makale için etik kurul izni alınmasına gerek bulunmamaktadır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yapılan çalışmada 1. ve 2. yazar çalışma taslağının oluşturulması ve bu taslak çerçevesinde gerekli materyallerin belirlenip tedariğinin sağlanması, literatür araştırması, deneysel çalışmaların yapılarak sonuçların analiz edilmesi, makalenin içerik ve yazım denetiminin yapılmasında katkı sunmuşlardır.

Kaynakça

Agyenim F., Hewitt N., Eames P., Smyth M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010; 14(2): 615-628.

Albdour SA., Haddad Z., Sharaf OZ., Alazzam A., Abu-Nada E. Micro/nano-encapsulated phase-change materials (ePCMs) for solar photothermal absorption and storage, Fundamentals, recent advances, and future directions. Progress in Energy and Combustion Science 2022; 93: 101037.

Alsaadawi MM., Amin M., Tahwia AM. Thermal, mechanical and microstructural properties of sustainable concrete incorporating Phase change materials. Construction and Building Materials 2022; 356: 129300.

Anisur MR., Mahfuz MH., Kibria MA., Saidur R., Metselaar IHSC., Mahlia TMI. Curbing global warming with phase change materials for energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013; 18: 23-30.

ASTM C1760. Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

Baccega E., Bottarelli M., Cesari S. Addition of granular phase change materials (PCMs) and graphene to a cement-based mortar to improve its thermal performances. Applied Thermal Engineering 2023; 229: 120582.

Baetens R., Jelle BP., Gustavsen A. Phase change materials for building applications, A state-of-the-art review. Energy and Buildings 2010; 42: 1361-1368.

Barreneche C. Evaluation in the macroscale. Applied Energy 2013; 109: 428-432.

Biwan X., Hongyan M., Zeyu L., Zongjin L. Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites. Applied Energy 2015; 160: 358-367.

Boh B., Sumiga B. Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. Materials and Geoenvironment 2008; 55: 329-344.

Bondareva NS., Sheremet MA. Heat transfer performance in a concrete block containing a phase change material for thermal comfort in buildings. Energy and Buildings 2022; 256: 111715.

Cabeza LF., Castell A., Barreneche C., Gracia D., Fernández I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings, a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011; 15: 1675-1695.

Cabeza LF., Castellón C., Nogués M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. Energy Building 2007; 39: 113-119.

Cheng J., Kang M., Lin W., Liang C., Liu Y., Wang Y., Niu S., Zhang F. Preparation and characterization of phase change material microcapsules with modified halloysite nanotube for controlling temperature in the building. Construction and Building Materials 2023; 362: 129764.

Cui Y., Xie J., Liu J. Review of phase change materials integrated in building walls for energy saving. Procedia Engineering 2015; 121: 763-770.

Cui Y., Xie J., Liu J., Wang J., Chen S. A review on phase change material application in building. Advances in Mechanical Engineering 2017; 9(6): 1687814017700828.

Das R., Gandhi ISR., Muthukumar P. Use of agglomerated Micro-encapsulated phase change material in cement mortar as thermal energy storage material for building. Materials Today: Proceedings 2022; 65(2): 808-814.

Djamai ZI., Salvatore F., Si Larbi A., Cai G., El Mankibi M. Multiphysics analysis of effects of encapsulated phase change materials (PCMs) in cement mortars. Cem. Concr. Res. 2019; 119: 51-63.

Dora S., Mini KM. Performance assessment of capric acid-ethyl alcohol/expanded vermiculite phase change material incorporated cement mortar for thermal insulation in buildings. Journal of Energy Storage 2023; 72(C): 108550.

Drissi S., Mo KH., Falchetto AC., Ling TC. Understanding the compressive strength degradation mechanism of cement-paste incorporating phase change material. Cem. Concr. Compos. 2021; 124: 104249.

Dutil Y., Rousse D., Lassue S. Modeling phase change materials behavior in building applications, comments on material characterization and model validation. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 61: 132-135.

Evola G., Marletta L., Sicurella F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. Building and Environment 2013; 59: 517-527.

Fenollera M., Míguez J., Goicoechea I., Lorenzo J., Ángel Álvarez M. The influence of phase change materials on the properties of self-compacting concrete. Materials 2013; 6: 3530-3546.

Frahat NB., Amin M., Heniegal AM., Omar IOM. Optimizing microencapsulated PCM ratios of sustainable cement mortar for energy savings in buildings. Construction and Building Materials 2023; 391: 131844.

Gbekou FK., Benzarti K., Boudenne A., Eddhahak A., Duc M. Mechanical and thermophysical properties of cement mortars including bio-based microencapsulated phase change materials. Construction and Building Materials 2022; 352: 129056.

Goia F., Bianco L., Cascone Y. Experimental analysis of an advanced dynamic glazing prototype integrating PCM and thermotropic layers. Energy Proced 2014; 48: 1272-1281.

Guardia C., Barluenga G., Palomar I. Evaluation of the energy storage capacity of phase change material cement-lime mortars by using heat flux meters and ultrasonic pulse transmission. Journal of Energy Storage 2022; 50: 104674.

Hao L., Xiao J., Sun J., Xia B., Cao W. Thermal conductivity of 3D printed concrete with recycled fine aggregate composite phase change materials. Journal of Cleaner Production 2022; 364: 132598.

Hattan HA., Madhkhan M., Marani A. Thermal and mechanical properties of building external walls plastered with cement mortar incorporating shape-stabilized phase change materials (SSPCMs). Construction and Building Materials 2021; 270: 121385.

Hornbostel K., Larsen CK., Geiker MR. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate-A literature review. Cement and Concrete Composites 2013; 39: 60-72.

Hunger M., Entrop AG., Mandilaras I., Brouwers HJH., Founti M. The behaviour of self-compacting concrete microencapsulated phase change materials. Cement & Concrete Composites 2009; 31: 731-743.

Illampas R., Rigopoulos I., Ioannou I. Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar. Journal of Building Engineering 2021; 40: 102328.

Jacob R., Bruno F. Review on shell materials used in the encapsulation of phase change materials for high temperature thermal energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 48: 79–87.

Kong X., Lu S., Li Y. Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application. Energy Buildings 2014; 81: 404-415.

Kumar GN., Ram VV., Parameshwaran R. Thermal and structural properties of cement mortar embedded with hybrid nanocomposite based phase change nanocapsules for building application. Construction and Building Materials 2023; 385: 13148.

Kumar R., Misra M., Kumar R., Gupta D., Khatri P., Tak B. Phase change materials, technology status and potential defence applications. Defence Science Journal 2011; 61: 576-582.

Kylili A., Fokaides PA. Life cycle assessment (LCA) of phase change materials (PCMs) for building applications. A review. Journal of Building Engineering 2016; 6: 133-143.

Lee T., Hawes DW., Banu D., Feldman D. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. Solar Energy Materials and Solar Cells 2000; 62(3): 217-237.

Lin Y., Jia Y., Alva G., Fang G. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018; 82: 2730-2742.

Ma Y., Sun S., Li J., Tang G. Preparation and thermal reliabilities of microencapsulated phase change materials with binary cores and acrylate-based polymer shells. Thermochim Acta 2014; 588: 38-46.

Mandilaras I., Stamatiadou M., Katsourinis D., Zannis G., Founti M. Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. Building and Environment 2013; 61: 93-103.

Marani A., Zhang L., Nehdi ML. Design of concrete incorporating microencapsulated phase change materials for clean energy, A ternary machine learning approach based on generative adversarial network. Engineering Applications of Artificial Intelligence 2023; 118: 105652.

Marani A., Zhang L., Nehdi ML. Design of concrete incorporating microencapsulated phase change materials for clean energy, A ternary machine learning approach based on generative adversarial networks". Engineering Applications of Artificial Intelligence 2023; 118: 105652.

Mira-Hernández C., Travaglini G., Dolfi A., Mancin S. Electrical properties of phase change materials for electrical impedance-based sensing of the liquid fraction. Journal of Energy Storage 2025; 113: 115625.

Moustapha BE., Bonnet S., Khelidj A., Maranzana N., Froelich D., Khalifa A., Babah IA. Effects of microencapsulated phase change materials on chloride ion transport properties of geopolymers incorporating slag and, metakaolin, and cement-based mortars. Journal of Building Engineering 2023; 74: 106887.

Muraleedharan M., Nadir Y. Geopolymer mortar integrated with phase change materials for improvement of thermal efficiency in buildings: A review. Materials Today: Proceedings 2021; 44(1): 878-885.

Peng L., Wu H., Mao Q. Numerical and experimental study on the performance of a thermal energy storage in a solar building. Journal of Energy Storage 2023; 61: 106745.

Pilehvar S., Szczotok AM., Carmona M., Pamies R., Kjøniksen AL. The effect of microencapsulated phase change materials on the rheology of geopolymer and Portland cement mortars. J Am Ceram Soc. 2020, 103: 5852-5869.

Pires L., Silva PD., Castro Gomes JP. Experimental study of an innovative element for passive cooling of buildings. Sustain. Energy Technol. Assess. 2013; 4: 29-35.

Qiu X., Lu L., Wang J., Tang G., Song G. Preparation and characterization of microencapsulated n-octadecane as phase change material with different n-butyl methacrylate-based copolymer shell. Solar Energy Materials and Solar Cells 2014; 128: 102-111.

Raj VAA., Velraj R. Review on free cooling of buildings using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010; 14: 2819-2829.

Ramakrishnan S., Sanjayan J., Wang X., Alam M., Wilson J. A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites. Applied Energy 2015; 157: 85-94.

Rao Y., Lin G., Luo Y., Chen S., Wang L. Preparation and thermal properties of microencapsulated phase change material for enhancing fluid flow heat transfer. Heat Transfer-Asian Research 2007; 36: 28-37.

Rebelo F., Figueiredo A., Vicente R., Ferreira VM. Study of a thermally enhanced mortar incorporating phase change materials for overheating reduction in buildings. Journal of Energy Storage 2022; 46: 103876.

Sarcinella A., Barroso de Aguiar JL., Jesus C., Frigione M. Thermal properties of PEG-based form-stable phase change materials (PCMs) incorporated in mortars for energy efficiency of buildings. Journal of Energy Storage 2023; 67: 107545.

Schossig P., Henning HM., Gschwander S., Haussmann T. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. Solar Energy Materials and Solar Cells 2005; 89(2-3): 297–306.

Shahzad Q., Shen J., Naseem R., Yao Y., Waqar S., Liu W. Influence of phase change material on concrete behavior for construction 3D printing. Construction and Building Materials 2021; 309: 125121.

Soares N., Costa JJ., Gaspar AR., Santos P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings `energy efficiency. Energy and Buildings 2013; 59: 82-103.

Tan FL., Hosseinizadeh SF., Khodadadi JM., Fan L. Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule. International Journal of Heat and Mass Transfer 2009; 52: 3464-3472.

Tseng YH., Fang MH., Tsai PS., Yang YM. Preparation of microencapsulated phase-change materials (MCPCMs) by means of interfacial polycondensation. Journal of Microencapsulation 2005; 22: 37-46.

TS EN 12350-6, 2010, Beton – Taze beton deneyleri-Bölüm 6: Yoğunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12390-3, 2010, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12390-5, 2010, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Tyagi VV., Pandey AK., Buddhi D. Thermal performance assessment of encapsulated PCM based thermal management system to reduce peak energy demand in buildings. Energy and Buildings 2016; 117: 44-52.

Vicente R., Silva T. Brick masonry walls with PCM macrocapsules, an experimental approach. Applied Thermal Engineering 2014; 67: 24-34.

Wang H., Wang JP., Wang X., Li W., Zhang X., Preparation and properties of microencapsulated phase change materials containing two-phase core materials. Industrial & Engineering Chemistry Research 2013; 52: 14706-14712.

Waqas A., Ud Din Z. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings-a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013; 18: 607-625.

Weinlader H., Beck A., Fricke J. PCM-facade-panel for daylighting and room heating. Solar Energy 2005; 78: 177-186.

Yahay NA., Ahmad H. Numerical investigation of indoor air temperature with the application of PCM gypsum board as ceiling panels in buildings. Procedia Engineering 2011; 20: 238-244.

Yan B., Lu H., Li M., Wang X., Wang Z., Pi M., Cui W., Ran R. Preparation of phase change microcapsules with high thermal storage and temperature sensitive for thermal management. Journal of Energy Storage 2023; 64: 107003.

You M., Wang X., Zhang X., Zhang L., Wang J. Microencapsulated n-Octadecane with styrene-divinybenzene co-polymer shells. Journal of Polymer Research 2011; 18: 49-58.

Yu B., Li S., Zhu H., Jiang Q., Wang D., Chen Y. A composite phase change material for improving the freeze–thaw resistance performance of cement mortars. Construction and Building Materials 2023; 387: 131657.

Yu K., Liu Y., Jia M., Wang C., Yang Y. Thermal energy storage cement mortar containing encapsulated hydrated salt/fly ash cenosphere phase change material. Thermo-mechanical properties and energy saving analysis. Journal of Energy Storage 2022, 51: 104388.

Yu XK., Tao YB. Improvement of thermal cycle stability of paraffin/expanded graphite composite phase change materials and its application in thermal management. Journal of Energy Storage 2023; 63: 107019.

Yuan Y., Zhang N. Preparation and thermal characterization of capric–myristic–palmitic acid/expanded graphite composite as phase change material for energy storage. Materials Letters 2014; 125: 154-157.

Zastawna-Ruminand A., Nowak K. Experimental thermal performance analysis of building components containing phase change material (PCM). Procedia Engineering 2015; 108: 428-435.

Zebari Z., Bedirhanoğlu İ., Aydın M. Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 2017; 8: 1.

Zhang GH., Bon SAF., Zhao CY. Synthesis, characterization and thermal properties of novel nanoencapsulated phase change materials for thermal energy storage. Solar Energy 2012; 86: 1149-1154.

Zhang P., Ma ZW., Wang RZ. An overview of phase change material slurries. MPCS and CHS, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010; 14: 598-614.

Zhang XX., Tao XM., Yick KL., Wang XC. Structure and thermal stability of microencapsulated phase-change materials. Colloid & Polymer Science 2004; 282: 330-336.

Zhao CY., Zhang GH. Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs), Fabrication, characterization and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011; 15(8): 3813-3832.

Zhu L., Dang F., Ding W., Sang G., Wang Q., Jiao K. Thermo-physical properties of light-weight aggregate concrete integrated with micro-encapsulation phase change materials, Experimental investigation and theoretical model. Journal of Building Engineering 2023; 69: 106309.

Zhu N., Ma Z., Wang S. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials, a review. Energy Conversion and Management 2009; 50: 3169-3181.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2079-2093, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2079-2093, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Jüt Lif Uzunluğu ve Katkı Oranının Sürdürülebilir Beton Tasarımında Mekanik ve Isı Yalıtım Özelliklerine Etkisi

Hakan SARIKAYA[1], Gülşah SUSURLUK[2*]

[1]Uşak Üniversitesi Banaz Meslek Yüksekokulu İnşaat Teknolojisi Programı, Uşak
[2] İstanbul Beykent Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Tekstil Teknolojisi Programı, İstanbul

[1]https://orcid.org/0000-0002-8043-3302
[2]https://orcid.org/0000-0003-3284-2248
*Sorumlu yazar: gulsahsusurluk@beykent.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 03.03.2025
Kabul tarihi:12.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Jüt lifi
Basınç dayanımı
Eğilme dayanımı
Isı yalıtım
Sürdürülebilirlik

ÖZ

Doğal liflerin çimentolu karışımlarda kullanımı, geri dönüştürülebilirliği, yenilenebilirliği, sürdürülebilir özellikleri ve diğer çevresel faydaları nedeniyle dikkat çekmektedir. Çeşitli doğal lifler arasında, uygun maliyetli, uzun ömürlü ve yenilenebilir bir doğal lif türü olan jüt lifi (JU), sürdürülebilir betonun mukavemetini ve ısı yalıtım özelliklerini iyileştirme yeteneği nedeniyle ilgiyi hak etmektedir. Bu araştırma, farklı lif uzunluklarında (3, 4,5 ve 6 cm) ve farklı katkı oranlarında (%0, %0,5, %1 ve %1,5) JU lifinin çimento ağırlığınca sıradan Portland çimentosu (OPC) karışımlarına entegre edilerek, mekanik özellikleri ve ısı yalıtım performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçlar, çimento ağırlığına göre %1 oranında JU lif eklenmesinin, %28,37 eğilme mukavemeti kazanımıyla %21,17'ye kadar yalıtım artışına yol açtığını göstermiştir. Lif uzunluğu ve katkı oranlarının artışı, eğilme mukavemeti ve ısı yalıtım değerlerinde belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Bu bağlamda bu çalışmada, farklı uzunluk ve katkı oranlarının basınç, eğilme mukavemeti ve ısı yalıtım performansları arasındaki ilişkilerin R^2=0,98 korelasyon katsayısı ile yüksek doğrulukla tahmin edilebileceği ve güçlü bir istatistiksel ilişki gösterdiği ortaya konulmaktadır. Elde edilen bulgular, doğal elyaf katkılı beton tasarımlarının yalnızca performans iyileştirmesi değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da uygulanabilir ve etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Effect of Jute Fiber Length and Content Ratio on Mechanical and Thermal Insulation Properties in Sustainable Concrete Design

Research Article

Article History:
Received: 03.03.2025
Accepted: 12.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Jute fiber
Compressive strength
Flexural strength
Thermal insulation
Sustainability

ABSTRACT

The use of natural fibers in cementitious mixtures is attracting attention due to their recyclability, renewability, sustainable properties and other environmental benefits. Among various natural fibers, jute fiber (JU), a cost-effective, long-lasting and renewable type of natural fiber, deserves attention due to its ability to improve the strength and thermal insulation properties of sustainable concrete. This research investigated the effect of different fiber lengths (3, 4,5 and 6 cm) and different content ratios (0%, 0,5%, 1% and 1,5%) of JU fiber on the mechanical properties and thermal insulation performance of ordinary Portland cement (OPC) mixtures by weight of cement. The results showed that the addition of JU fiber at 1% by weight of cement led to an insulation increase of up to 21,17% with a flexural strength gain of 28,37%. The increase in fibre length and content ratios provided a significant improvement in flexural strength and thermal insulation values. Therefore, this study demonstrates that the relationships between compressive strength, flexural strength, and thermal

insulation performance, considering different fiber lengths and fiber content ratios, can be predicted with high accuracy (R^2 = 0.98), indicating a strong statistical correlation. The findings indicate that natural fiber-reinforced concrete mixtures offer not only performance enhancement but also a viable and effective solution for environmentally sustainable construction practices.

To Cite: Sarıkaya H., Susurluk G. Jüt Lif Uzunluğu ve Katkı Oranının Sürdürülebilir Beton Tasarımında Mekanik ve Isı Yalıtım Özelliklerine Etkisi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2079-2093.

1. Giriş

21. yüzyılın başlarından itibaren, beton veya harç gibi sürdürülebilir çimento esaslı malzemelere olan küresel talepte önemli ölçüde artış yaşanmaktadır (Althoey ve ark., 2023; Khan ve McNally, 2023). Dahası, son yıllarda sürdürülebilirliğin endüstriyel uygulamalara entegrasyonu ve tüketicilere yönelik iletişimi, inşaat sektöründeki çimento bazlı malzemelerde de sürdürülebilir bir geleceğe olan bağlılığı artırmış ve bu eğilim, diğer endüstriyel sektörlerde gözlemlenen sürdürülebilirlik yönelimleriyle paralellik göstermektedir. Çimento karışımlarında doğal liflerin değerlendirilmesine yönelik araştırmalar, eko-verimlilik zorluklarını ele alma ve daha sürdürülebilir inşaat malzemeleri geliştirme ihtiyacının yönlendirmesiyle hızla ilerlemektedir (Guehlouz ve ark., 2025). Çimento esaslı karışımlarda doğal liflerin kullanımı, sentetik liflere kıyasla yüksek enerji tüketimi ve üretim maliyeti nedeniyle yaygınlaşmıştır (Özen ve ark., 2024). Araştırmacılar doğal liflerin daha ucuz, daha esnek olduğunu ve sentetik liflerden daha az sağlık tehlikesi oluşturduğunu vurgulamaktadır (Onuaguluchi ve Banthia, 2016; Sultana ve ark., 2020). Ek olarak, doğal lifler, özellikle jüt, keten, kenevir, pamuk ve kapok gibi bitkisel bazlı olanlar, yenilenebilirlikleri, biyolojik olarak parçalanabilirlikleri ve geri dönüştürülebilirlikleri nedeniyle sürdürülebilir malzemeler olarak önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Rocha ve ark., 2022; Filazi ve ark., 2023). Dahası, geleneksel takviye malzemelerine kıyasla üstün mekanik ve yalıtım performansları, bu liflerin kullanımını sürdürülebilir bir seçenek olarak öne çıkarıp, inşaat sektöründe kullanım potansiyelini artırmaktadır (Venkatarama Reddy, 2009).

Ardanuy ve ark., (2015); Ferreira ve ark., (2016) tarafından yürütülen çalışmada, doğal liflerin tipik olarak 200 MPa'yı aşan bir çekme mukavemeti sergilediği ifade edilmektedir. Hejazi ve ark.'na (2012) göre, jüt bitkilerinin dış yüzeyinden elde edilen jüt lifi, bitkilerin 2,5 m yüksekliğe kadar büyümesi ve yaklaşık 25 mm'lik bir gövde çapına sahip olmasıyla en uygun maliyetli ve dayanıklı doğal liflerden biri olduğunu vurgulamaktadır. Hill ve ark., (1998), jüt lifinin %72 selüloz, %13 lignin ve %13 hemiselülozdan oluştuğunu bulurken, Kundu ve ark., (2012), jüt lifinin çelik liflerden yaklaşık yedi kat daha hafif olduğunu ve 250-300 MPa'lık bir çekme mukavemeti sergilediğini vurgulamaktadır. Ayrıca, çimentolu bazlı malzemeler üzerinde yapılan araştırmalar, jüt liflerinin dahil edilmesinin genel olarak beton karışımlarının mekanik özelliklerini artırdığını ve aynı zamanda alternatif diğer doğal lif türlerine kıyasla üstün ekonomik faydalar sağladığını göstermektedir (Yan ve ark., 2016; Islam ve Ahmed, 2018; Tiwari ve ark., 2020). Bitkisel esaslı liflerden özellikle jüt lifini içeren beton karışımları ile ilgili önceki araştırmalar sınırlı kalmıştır ve genellikle hem lif uzunluğunun hem de lif katkı oranının betonun özellikleri üzerindeki önemli etkisi göz ardı edilmiştir. Dahası, jüt lifinin termal iletkenliği üzerindeki etkisi büyük ölçüde keşfedilmemiştir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı jüt lifi (JU) içeren sürdürülebilir

beton malzemesinin mekanik-yalıtım özelliklerini araştırmak ve inşaat sektöründe sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda birincil hammadde kaynaklarının kullanımına kullanımına yönelik farklı bir perspektif sunmaktır.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Malzeme

Bu çalışmada TS EN 206+A2 standardı (2021) doğrultusunda oluşturulan kompozisyonlara doğal bir lif olan jüt lifi katılarak sürdürülebilir bir yöntem sağlanması hedeflenmiştir. Afyon Çimento'dan, TS EN 196-1 standardına (2019) uygun ve beton formülasyonlarında kullanılan 42,5 R tipi Sıradan Portland Çimentosu (OPC) tedariği sağlanmıştır. Beton karışımları, belediye su şebekesinden elde edilen musluk suyu ve Oktaş Beton tarafından sağlanan agregalar kullanılarak hazırlanmıştır.

Karışımlarda kullanılan OPC'nin kimyasal bileşimi %19,1 SiO_2, %5,19 Al_2O_3, %2,65 Fe_2O_3 ve %63,4 CaO içermektedir. Karışımlarda kullanılan bu oranlar da çimentonun hidratasyonu ve mukavemet gelişimi için yüksek kalsiyum içeriğine işaret etmektedir. Ek olarak, MgO (%1,83), SO_3 (%2,95), Na_2O (%0,22), K_2O (%0,94) ve Cl^- (%0,011) gibi minimal oranlarda kimyasal bileşenler de içermektedir. Fiziksel özellikler açısından, OPC 1,05 g/cm³ yoğunluk ve 3680 cm²/g özgül yüzey alanı değerine sahiptir. Bu değerler gelişmiş hidratasyon reaksiyonlarına katkıda bulunabilecek ince bir parçacık boyutu dağılımını gösterdiğine atfedilebilir.

Karışımlarda kullanılan agreganın kimyasal bileşimi ise temel olarak %20,9 SiO_2, %0,4 Al_2O_3, %0,2 Fe_2O_3 ve %42,6 CaO kimyasal bileşiminden oluşmakta ve kalsiyum açısından zengin içeriğini vurgulamaktadır. MgO (%0,4) ve eser miktarda Na_2O (<%0,1) ve K_2O (%0,1) kimyasal bileşenler de içermektedir. SO_3 ve Cl^- içerikleri ise ihmal edilebilir düzeydedir. Fiziksel özellikler açısından bakıldığında ise agreganın yoğunluğu 2,42 g/cm³'tür. Karışımlarda kullanılan OPC ile agreganın bu karakterizasyonu, bu araştırmada incelenen beton karışımlarının performansı üzerindeki potansiyel etkilerine ilişkin temel bilgiler sağlamaktadır.

2.2. Jüt (JU) Lifi

JU lifi, 1,5 g/cm³ yoğunluk, 10-100 mm arasında değişen uzunluk ve 100-300 µm arasında değişen çapı ile karakterize edilen bir doğal liftir. Lifin nem içeriği ise, higroskopik davranışlarından dolayı doğal liflerin karakteristiği olan %12 ile %14 arasında değişmektedir. Mekanik özelliklerine bakıldığında, jüt lifi, 300-600 N/mm² aralığında bir çekme mukavemeti gösterir ve bu değer, onu çeşitli uygulamalarda uygun bir takviye malzemesi olarak kullanımını desteklemektedir. Ek olarak, lifin başlangıç modülü 10-20 GPa arasındadır. Bu değer, kompozit malzemelerdeki performansına katkıda bulunan orta sertlik ve elastikiyetini göstermektedir.

2.3. Karışımın Bileşimi

Jüt lifi (JU) kullanımının beton kompozisyonlarının mekanik performansı ve ısıl iletkenliği üzerindeki etkisini analiz etmek için, çimento miktarı sabit tutularak çimento ağırlığının %0,5, %1 ve %1,5'i oranında jüt lifi ilave edilmiş ve dokuz farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Tasarlanan karışım oranları Tablo 1'de sunulmuştur ve karışımlar JU-0, JU/3-0,5, JU/3-1, JU/3-1,5, JU/4,5-0,5, JU/4,5-1, JU/4,5-1,5, JU/6-0,5, JU/6-1 ve JU/6-1,5 olarak adlandırılmıştır. Ayrıca, karışım oranlarında su miktarı 160 kg/m³ olarak belirlenmiştir.

- JU-0: Jüt lifi içermeyen kontrol karışımı.
- JU/3-0,5, JU/3-1 ve JU/3-1,5: 3 cm uzunluğunda jüt lifi ile güçlendirilmiş beton karışımları.
- JU/4,5-0,5, JU/4,5-1 ve JU/4,5-1,5: 4,5 cm uzunluğunda jüt lifi ile güçlendirilmiş beton karışımları.
- JU/6-0,5, JU/6-1 ve JU/6-1,5: 6 cm uzunluğunda jüt lifi ile güçlendirilmiş beton karışımları.

Karışım etiketlerinde yer alan "0", "0,5", "1" ve "1,5" ifadeleri, karışıma ilave edilen JU lifi oranlarını yüzde olarak temsil etmektedir.

Tablo 1. Jüt lifi içeren beton karışımlarının bileşim oranları

Karışım	Çimento (kg/m^3)	İnce Agrega (kg/m^3)	Kaba Agrega (kg/m^3)	Jüt lifi (gr)
JU-0	300	722	1111	-
JU/3-0,5	300	722	1111	15
JU/3-1	300	722	1111	30
JU/3-1,5	300	722	1111	45
JU/4,5-0,5	300	722	1111	15
JU/4,5-1	300	722	1111	30
JU/4,5-1,5	300	722	1111	45
JU/6-0,5	300	722	1111	15
JU/6-1	300	722	1111	30
JU/6-1,5	300	722	1111	45

2.4. Numunelerin Hazırlanması, Kürleme Süreçleri ve Uygulanan Testler

Lif takviyeli betonun karıştırılması prosedüründe, sonradan karıştırma yöntemi, Gao ve ark.,'nın (2017) çalışmasında belirtilen şekilde uygulanmıştır (Gao ve ark., 2017). Bu yöntemde karıştırma suyu (doğal kaynak suyu) ve çimento önce mekanik bir karıştırıcıda 30 saniye karıştırılmış, daha sonra da jüt lifleri eklenerek 120 saniye karıştırılmıştır. Karıştırma aşamasında sonra, lif takviyeli beton 100 x 100 x 100

mm (basınç dayanımı testi için) ve 100 x 100 x 500 mm'lik (eğilme dayanımı testi için) kalıplara dökülmüş ve aynı anda titreştirilmiştir. Dökümden sonra, numunelerin her biri kalıptan çıkarılmadan önce ilk 24 saat boyunca 23 ± 2 °C sıcaklıkta etüvde bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler 7 ve 28 gün boyunca suda kürlenmiştir. Ardından kür havuzundan alınarak, sırasıyla mekanik ve yalıtım özelliklerini belirlemek amacıyla testler uygulanmıştır. Numunelerin üretim, işleme süreci ve test aşamaları Şekil 1'de gösterilmektedir.



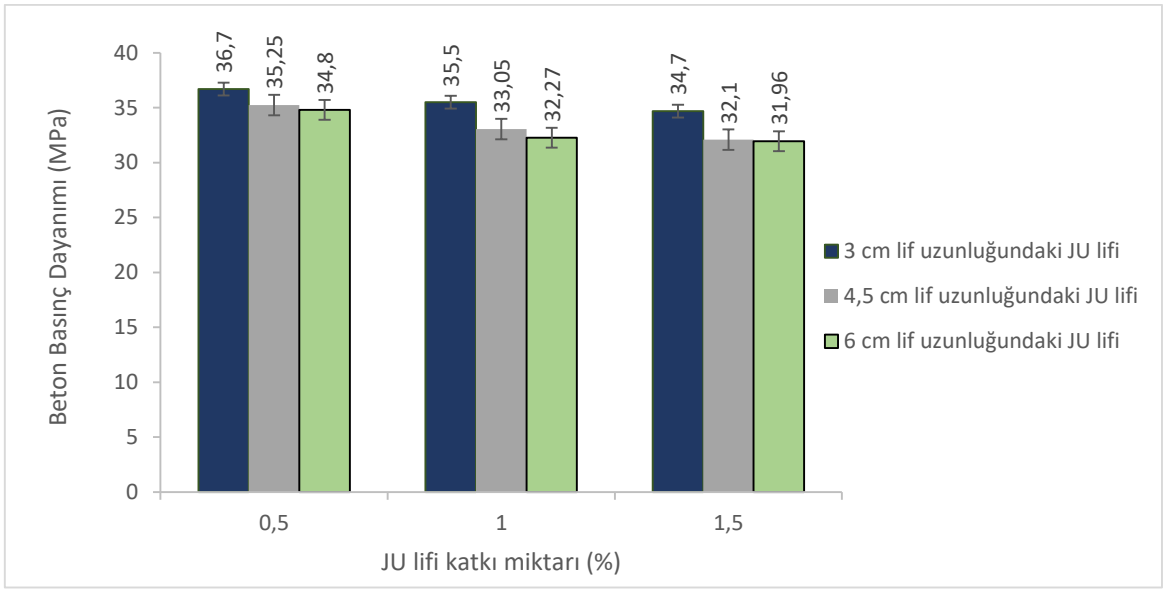
Şekil 1. Numune üretim ve test süreci

Basınç dayanımları, TS EN 12390-4 standardı (2002) doğrultusunda, eğilme dayanımları ise TS EN 12390-5 standardı esaslarına göre (2009) gerçekleştirilmiş ve üç ayrı test sonucunun ortalamasının hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Numunelerin ısıl iletkenlik katsayısı ise ASTM C 1113-09 hot wire standardına (2009) göre, eğilme dayanım testinden kalan kırık numuneler üzerinden QTM-500 cihazı kullanılarak çeşitli yerlerinden beş kez ölçülmüş ve nihai ölçümü elde etmek için ortalama alınmıştır. Şekil 1'de kullanılan cihazların görüntüsü yer almaktadır.

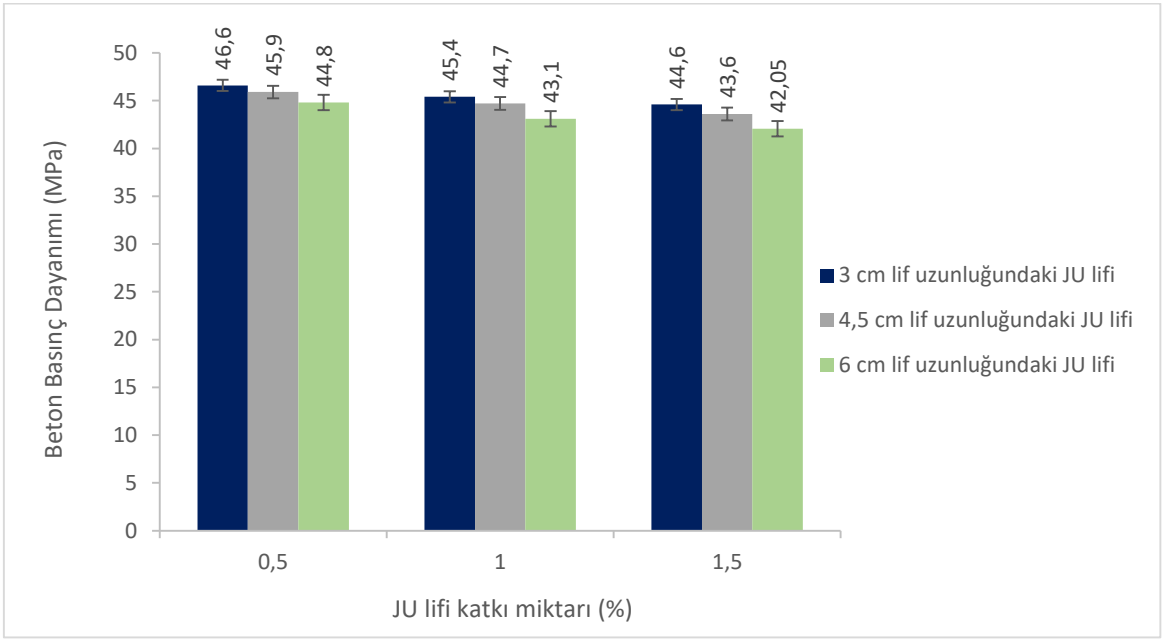
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

JU lif takviyeli beton numunelerinin 7 ve 28 günlük kürlemenin ardından gerçekleştirilen basınç dayanımı değerlendirmelerinin sonuçları Şekil 2 ve 3'te sunulmaktadır.



Şekil 2. JU lif takviyeli numunelerinin 7 gün süresince kürlenen basınç dayanımı test sonuçları



Şekil 3. JU lif takviyeli numunelerinin 28 gün süresince kürlenen basınç dayanımı test sonuçları

Liflerin çimento matrisine dahil edilmesinin matriste önemli değişikliklere neden olduğu, toplam boşlukları artırarak ve çatlakların yayılmasını önleyerek mukavemeti etkilediği bilinmektedir (Shah ve ark., 2020). Lif içeriği, basınç dayanımındaki değişikliklerin birincil belirleyicisidir (Juarez ve ark., 2015; Chen ve ark., 2021; Chen ve ark., 2024; Dai ve ark., 2024).

7 günlük kürlemenin ardından JU-0 beton numunesi 39,7 MPa dayanıma ulaşmıştır. Beton karışımlarına %0,5, %0.1 ve %1,5 katkı oranlarında 3 cm uzunluğunda JU lifi eklenmesi, basınç dayanımında sırasıyla %7,60, %10,62 ve %12,63'lük azalmalara, 4,5 cm uzunluğunda JU lifi eklenmesi, sırasıyla %11,25, %16,79 ve %19,18'lik azalmalara, 6 cm uzunluğunda JU lifi eklenmesi ise %12,38, %18,75 ve %19,53'lük azalmalara yol açmıştır. JU-0 beton numunesi, 28 günlük kürlenme süresinin ardından 48,9 MPa'lık dayanıma ulaşmıştır. 3 cm uzunluğunda JU lifinin beton karışımlarına %0,5, %1 ve %1,5 katkı

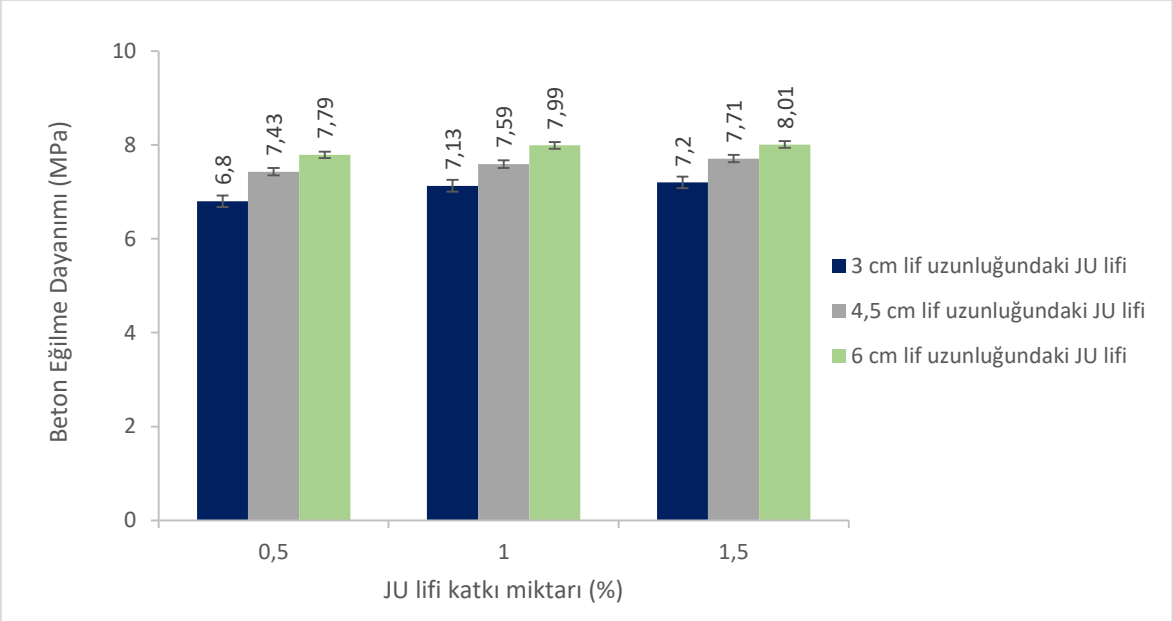
oranlarında ilave edilmesiyle, basınç dayanımında sırasıyla %4,70, %7,15 ve %8,79 oranında, 4,5 cm uzunluğunda JU lifi eklenmesi, sırasıyla %6,13, %8,58 ve %10,83 oranında, 6 cm uzunluğunda JU lifi eklenmesi ise %8,38, %11,86 ve %14 oranında azalma meydana getirmiştir. Farklı lif uzunluğu ve katkı oranlarına sahip JU lif takviyeli beton numunelerinin incelenmesi, 7 ve 28 günlük kürlenmenin ardından basınç dayanımında tutarlı bir eğilim olduğunu ortaya koymuştur: JU lifinin eklenen katkı oranının ve uzunluğun artması, basınç dayanımında azalmaya neden olmuştur.

Önceki araştırmalar, doğal liflerin çimentolu matrislere dahil edilmesinin, artan gözeneklilik ve lifler ile matris arasındaki zayıf arayüz bağı nedeniyle bazen basınç dayanımını azaltabileceğini göstermektedir. Örneğin, Thapa ve ark., (2024) çimentolu karışımlarına değişen katkı oranlarında (%0, 0,25, 0,5, 0,75, 1 ve 1,25 ağırlık) alkali ile işlenmiş Eulaliopsis binata liflerinin dahil edilmesinin etkilerini araştırmış ve deneyin sonuçları, lif içermeyen karışımın 31,57 MPa basınç dayanımının, %1,25 Eulaliopsis binata lifi eklendiğinde 24,78 MPa'ya düştüğünü ve lif katkılı karışımlarının basınç dayanımında %21,51'lik bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Juarez-Alvarado ve ark., (2022), bitki kaynaklı çimentolu kompozit malzemelere agave ve keten liflerinin eklenmesini incelemiş ve liflerin çatlama direncini ve termal konforu artırırken, basınç dayanımında azalmalara yol açtığını vurgulamıştır. Agave lechuguilla lifleri, %0,1 katkı oranında basınç dayanımını %15,67 ve %0,7 katkı oranında %36,31 oranında azaltırken, keten lifleri aynı katkı oranlarında sırasıyla %29,40 ve %4,85 oranında azalmalara neden olmuştur. Bhandari (2022) tarafından yapılan çalışmada, beton içine eklenen hindistan cevizi liflerinin mekanik dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmış ve lif uzunluğu ile lif katkı oranındaki artışın basınç dayanımını azalttığı görülmüştür. Benzer şekilde, Raghoo ve ark., (2021) tarafından yapılan çalışmada, %0,3 ile %0,5 lif katkı oranlarında ve 20 ile 40 mm lif uzunluklarında beton karışımlarına eklenen muz lifinin, lif uzunluğu ile lif katkı oranındaki artışın basınç dayanımını azalttığı vurgulanmıştır. Bu bulgular, doğal liflerin çimento esaslı malzemelere dahil edilmesinin genellikle artan gözeneklilik ve lifler ile matris boyunca daha zayıf arayüz bağları nedeniyle basınç dayanımında azalmaya yol açtığına dair önceki literatürle uyumlu sonuçlar göstermektedir.

3.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Doğal lifler, çimentolu karışımların eğilme özelliklerini geliştirmek için sıklıkla kullanılır. Bu lifler, çatlakları köprüleyerek enerji dağılımına katkıda bulunur, lif-matris bağını aşmak için ek enerji gerektirir ve çatlak yayılımı sırasında lifin çekilmesini ve kopmasını sağlar (Holschemacher ve ark., 2010). Ek olarak, son yıllarda polipropilen ve polyester lif gibi yaygın olarak kullanılan sentetik liflerle karşılaştırıldığında, doğal lifler uygun fiyatlı olmaları, çevresel sürdürülebilirlikleri ve biyolojik olarak parçalanabilirlikleri nedeniyle tanınmaya başlamıştır ve bu da onları insan yapımı liflere uygulanabilir alternatifler olarak konumlandırmıştır (Lee ve Choi, 2022). Önceki çalışmalar, doğal liflerin çimentolu matrislere dahil edilmesinin eğilme performanslarını önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Örneğin, çimento karışımlarına ağırlıkça %1'e kadar içeriklerde agave lechuguilla lifi, hindistan cevizi lifi, babassu lifi, keten lifi ve kenevir lifi dahil edildiğinde sırasıyla %38, %25,1, %22, %19 ve %13

oranında eğilme mukavemetinde iyileşme gözlemlenmiştir (García ve ark., 2024). Guehlouz ve ark., (2025) tarafından yapılan araştırmada, beton performansını optimize etmek için farklı uzunluklarda (15 ve 30 mm) keten lifinin, hacimce farklı katkı oranlarında (%0,15, %0,30 ve %0,50) çimento karışımlarına eklenerek elde edilen yüksek performanslı beton üzerindeki mekanik etkileri araştırılmıştır. Ana bulgular, liflerin eklenmesinin genellikle işlenebilirliği azaltırken, mekanik özellikleri önemli ölçüde artırdığını, özellikle lif uzunluğu artışında (30 mm'de %0,30 katkı oranında), kontrol numunesine kıyasla eğilme dayanımında %32 oranında artışla iyileşme gözlemlendiğini göstermektedir. Benzer şekilde, Bittner ve Oettel (2022) tarafından yapılan araştırmada da, beton içerisine farklı katkı oranlarında bambu lifi entegre edilerek eğilme dayanımında önemli oranda artış gözlemlenmiştir.



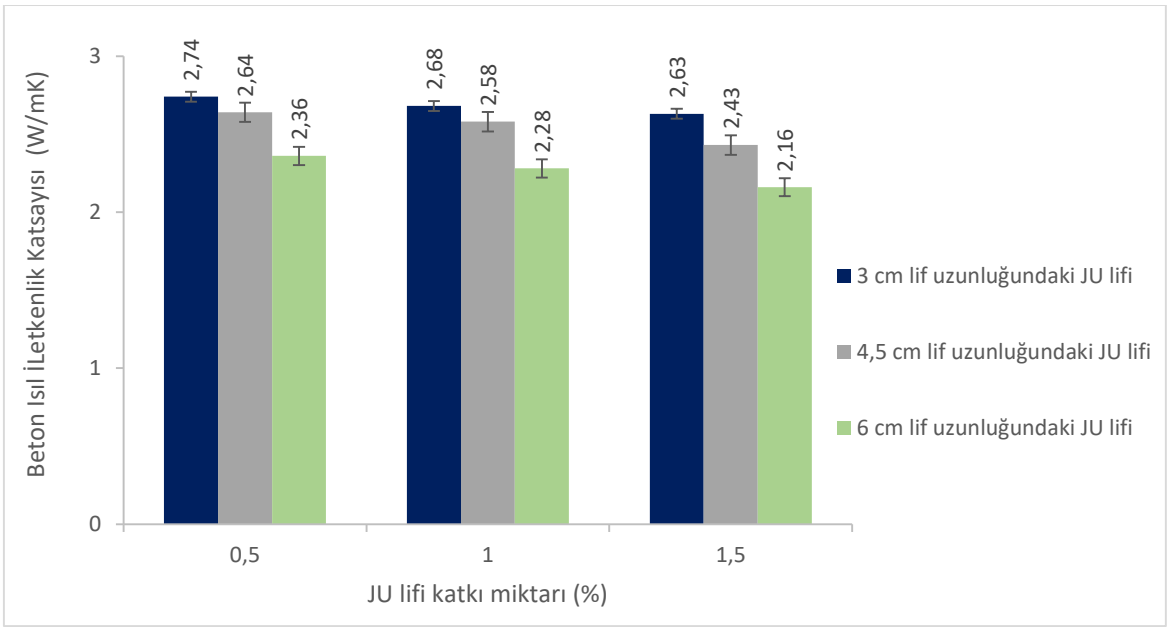
Şekil 4. Farklı lif uzunluğu ve katkı oranlarına sahip JU lif takviyeli beton numunelerinin 28 günlük kür süresi sonunda eğilme dayanımı test sonuçları

JU lif takviyeli beton numunelerinin 28 günlük kürlenme sonrasında gerçekleştirilen eğilme dayanımı değerlendirmelerinin sonuçları Şekil 4'te gösterilmektedir. JU liflerinin farklı uzunluklarda (3 cm, 4,5 cm ve 6 cm) ve farklı katkı oranlarında (%0,5, %1 ve %1,5) dahil edilmesi, 6,24 MPa mukavemet kaydeden JU-0 kontrol numunesine kıyasla eğilme performansında önemli bir iyileşme göstermiştir. %0,5'lik bir lif katkısında, eğilme dayanımı 3, 4,5 ve 6 cm'lik lif uzunlukları için sırasıyla %8,97, %19,07 ve %24,84 oranında, %1'lik bir lif katkısında ise yüzdelik artışlar sırasıyla %14,26, %21,63 ve %28,04 oranında ve eğilme performansında sürekli bir iyileşme olduğunu göstermektedir. %1,5'lik en yüksek lif katkısında da, eğilme dayanımı sırasıyla %15,70, %23,56 ve %28,37 oranında artışlar göstermiş ve bu da hem lif uzunluğunun hem de katkı oranının mekanik performansa olumlu katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, önceki araştırmalarla doğrulandığı üzere, lif uzunluğunun ve lif katkı oranının betonun eğilme mukavemeti üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır (Yan ve ark., 2016; Bittner ve Oettel, 2022; Rahimi ve ark., 2022; García ve ark., 2024; Guehlouz ve ark., 2025).

3.3. Isıl İletkenlik Katsayısı Deney Sonuçları

Geleneksel, yerel olarak temin edilebilen ve doğal liflerle zenginleştirilmiş inşaat ürünleri kullanılarak mükemmel termal yalıtım özellikleri sergileyen yenilikçi inşaat kompozit malzemeler yaratılabilir (Majumder ve ark., 2023). Sürdürülebilirliği artırmak, karbon ayak izini azaltmak ve yapı malzemelerinin üretim maliyetlerini düşürmek için araştırmacılar, doğal liflerle güçlendirilmiş çimento bazlı kompozitler geliştirmeye odaklandılar. Bu kompozitlerin termal özellikleriyle ilgili çalışmalar çoğunlukla doğal liflerin kullanımını vurgulamaktadır (Yooprasertchai ve ark., 2022). Bu nedenle, sürdürülebilir ve termal tasarım günümüzde önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır (Mistretta ve ark., 2019). Buna paralel olarak, bu çalışma doğal lifler kullanılarak jüt lif takviyeli kompozitlerin üretimini önermektedir.

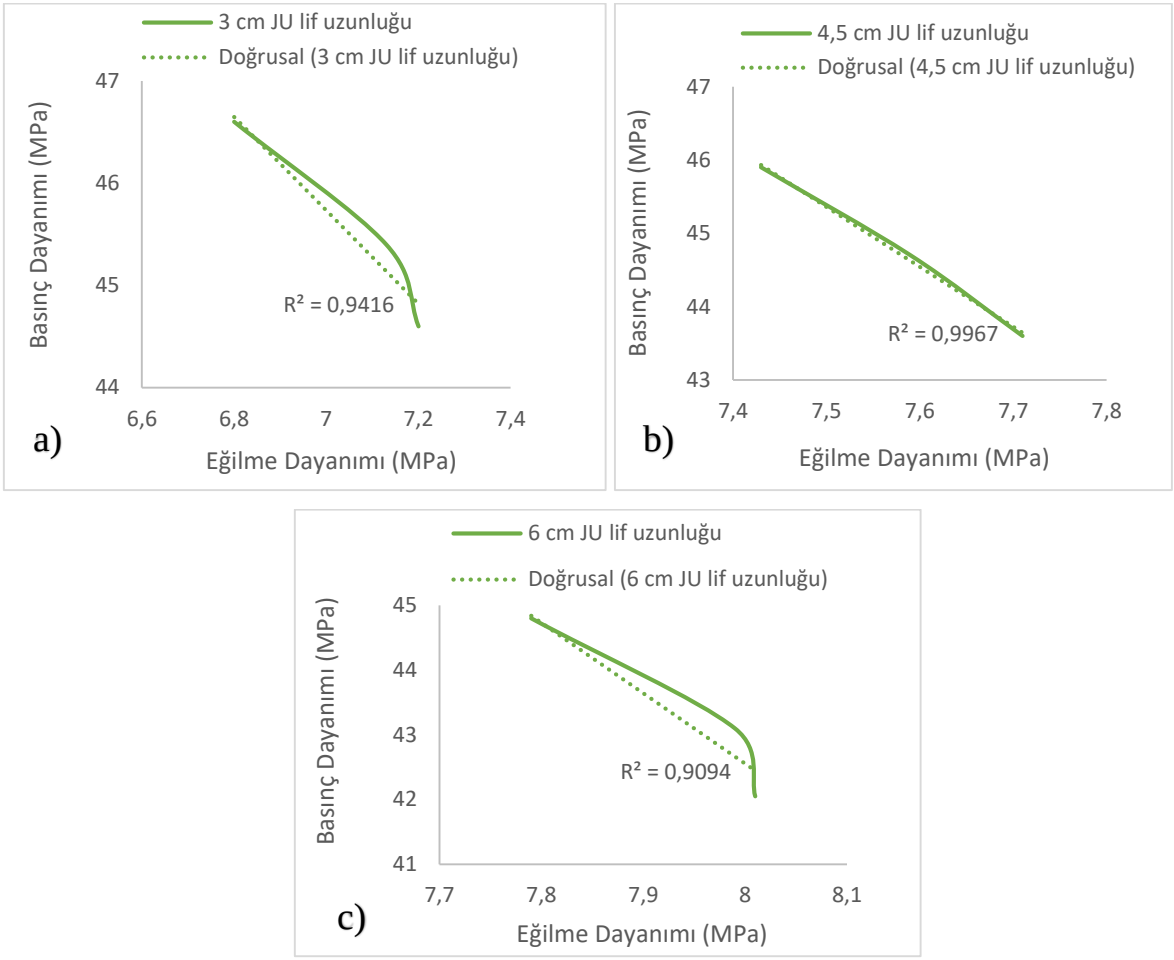
28 gün boyunca suda kürlenen, farklı lif uzunluğu ve katkı oranlarına sahip JU lifi takviyeli beton numunelerinin ısıl iletkenlik katsayıları Şekil 5'te gösterilmiştir. JU-0 kontrol numunesi 2,98 W/mK'lik bir termal iletkenlik göstermiştir ve JU liflerinin beton karışımlarına entegre edilmesi termal iletkenlikte önemli bir azalmaya yol açmıştır. %0,5 lif katkı oranında ise ısıl iletkenlikteki azalma sırasıyla 3, 4,5 ve 6 cm lif uzunlukları için %3,65, %7,3 ve %13,87 oranında, %1 lif katkı oranında, ısıl iletkenlik sırasıyla %5,47, %9,93 ve %16,79 oranında azalmıştır. %1,5 lif katkı oranında, azalmalar sırasıyla %7,30, %11,32 ve %21,17 oranında olmuştur ve bu da hem artan elyaf lif uzunluğunun hem de katkı oranının iyileştirilmiş ısı yalıtımına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, doğal liflerin dahil edilmesinin ısı transferini önemli ölçüde azalttığını gösteren literatürle uyumludur (Yan ve ark., 2016; Susurluk ve ark., 2024; Guehlouz ve ark., 2025).



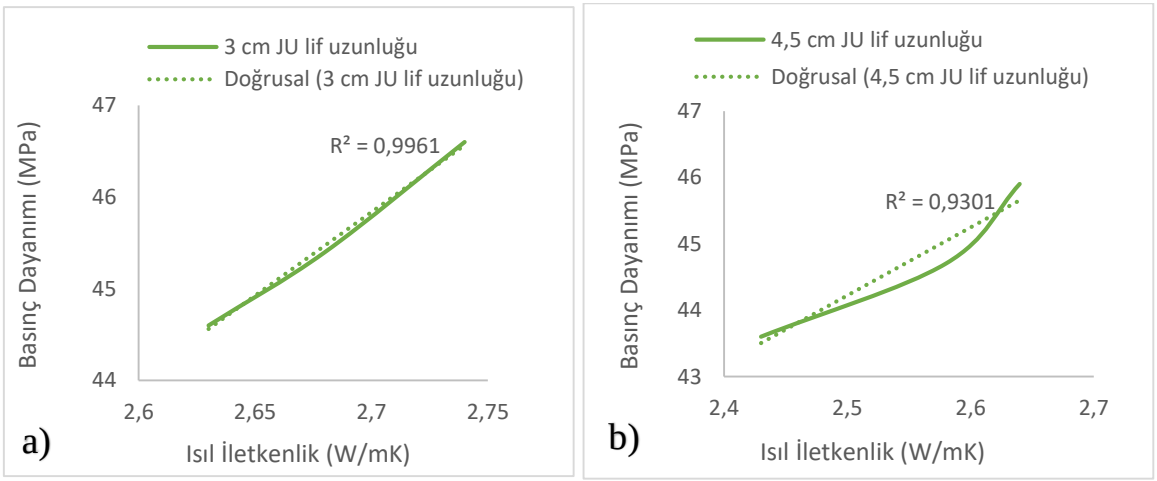
Şekil 5. Farklı lif uzunluğu ve katkı oranlarına sahip JU lif takviyeli beton numunelerinin 28 günlük kür süresi sonunda ısıl iletkenlik katsayısı test sonuçları

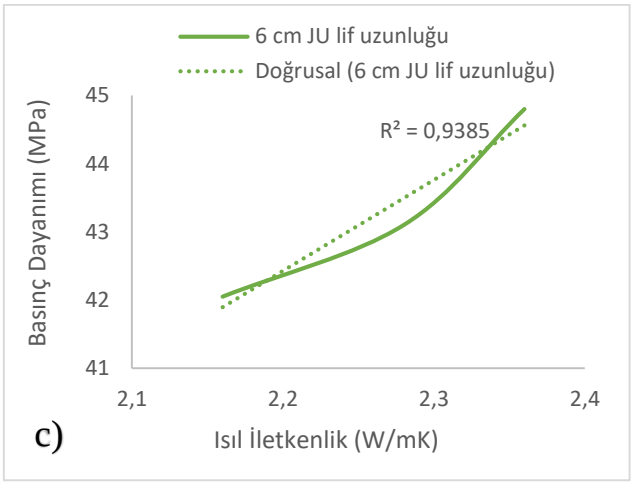
3.4. Mekanik Performans-Isı Yalıtımı Etkileşimi

Şekil 6, 7 ve 8 JU lif uzunluğu ve katkı oranının sırasıyla, basınç-eğilme, basınç-yalıtım, eğilme-yalıtım özellikleri arasındaki etkileşimi göstermektedir.

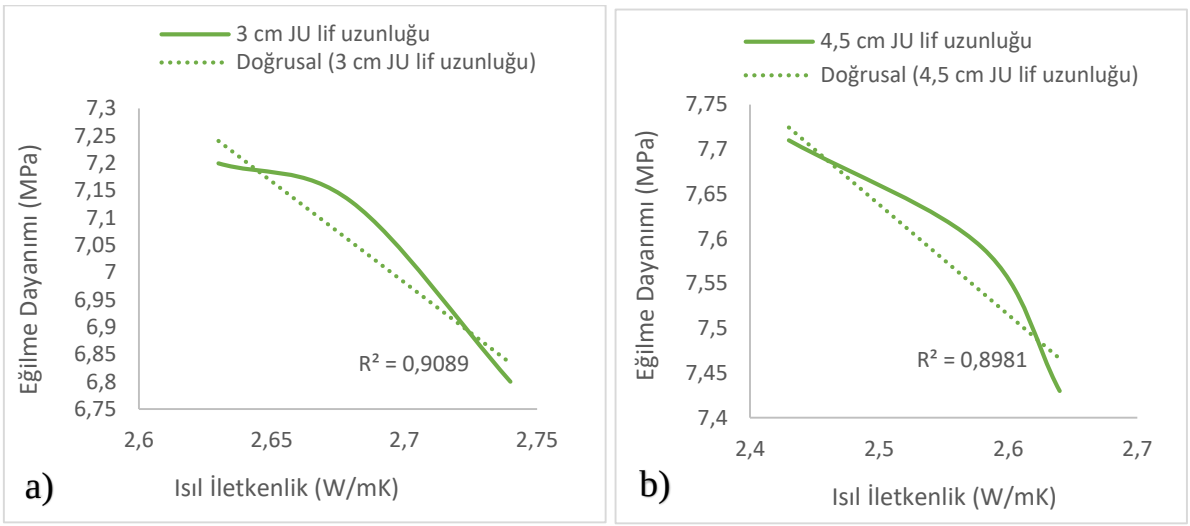


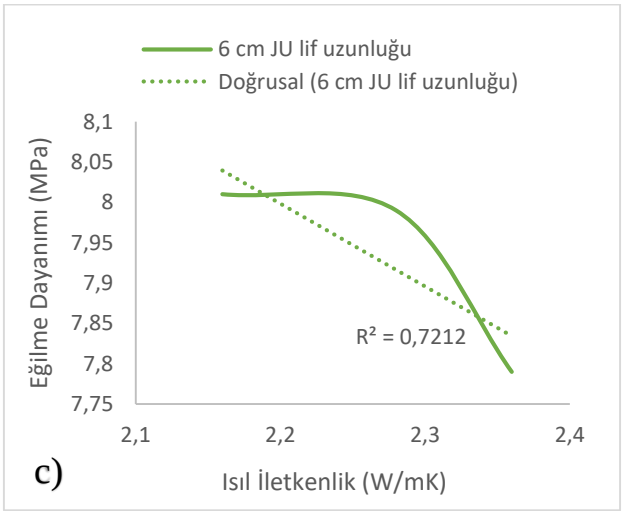
Şekil 6. Lif uzunluğu ve katkı oranının basınç-eğilme dayanımı korelasyonu





Şekil 7. Lif uzunluğu ve katkı oranının basınç dayanımı-ısıl iletkenlik korelasyonu





Şekil 8. Lif uzunluğu ve katkı oranının eğilme dayanımı-ısıl iletkenlik korelasyonu

Şekil 6'da, lif uzunluğu ve katkı oranlarının artışına göre, basınç-eğilme performansını destekleyen yüksek R^2 (0,94, 0,99 ve 0,91) değerleri ortaya konulmaktadır. Şekil 7'de, lif uzunluğu ve katkı oranlarının artışına göre, basınç-ısıl iletkenlik performansını destekleyen R^2 (0,99, 0,93 ve 0,94)

değerlerinin yüksek olduğu gösterilmektedir. Aynı şekilde Şekil 8'de de, lif uzunluğu ve katkı oranlarının artışına göre, eğilme-ısıl iletkenlik performansını destekleyen R^2 (0,91, 0,90 ve 0,72) değerlerinin yüksek korelasyonlar sergilediği ortaya konulmaktadır. Analiz sonuçları, farklı lif uzunluğu ve katkı oranlarında tasarımı yapılan beton numunelerinin basınç, eğilme dayanımı ve ısıl iletkenlik özelliklerinin dikkate alınmasını destekleyici niteliktedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, farklı uzunluk ve katkı oranında tasarlanan numunelerin mekanik ve termal yalıtım özellikleri deneysel olarak incelenmiş olup, elde edilen bulgular aşağıdaki temel sonuçları ortaya koymaktadır.

- 7 ve 28 günlük kürleme sonunda, artan JU lif uzunluğu ve katkı oranı, basınç dayanımındaki azalmaların sınırlı kalmasını sağlamıştır.
- Eğilme mukavemeti performansında maksimum lif uzunluğu ve katkı oranı ile %28,37'ye varan artış göstermiştir.
- 6 cm lif uzunluğu ve %1,5 katkı oranı ile beton numunelerinde %21,17 oranında termal yalıtkanlık kazancı tespit edilmiştir.
- Ayrıca, basınç-eğilme dayanımı ve ısıl iletkenlik özellikleri arasındaki etkileşimler, doğrusal regresyon analizleri ile değerlendirilmiş ve yüksek korelasyon katsayıları (R^2 = 0.98) elde edilmiştir.

Özetle bu çalışma, farklı lif uzunlukları ve katkı oranlarında tasarlanan beton karışımlarının mekanik ve termal iletkenlik performansları üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde incelemiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarda, basınç dayanımında sınırlı düşüşler görülürken, eğilme performansı ve termal yalıtkanlıkta yüksek kazanımlar sağlandığını sağlandığı gösterilmektedir. Beton tasarımlarının homojenliği ve JU liflerinin çimento matrisinde dengeli dağılımı, ısı yalıtımı ile mekanik dayanım arasındaki ilişkiye olumlu katkıda bulunmuştur. Bu bulgular, sürdürülebilir inşaat uygulamalarında doğal bazlı kaynak kullanımını etkinleştiren ve çevresel ayak izini azaltan yenilikçi beton tasarım stratejilerine yeni bir perspektif kazandırmaktadır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, JU lif katkılı beton karışımları; ısı yalıtımı ihtiyacı bulunan iç bölme elemanları, prefabrik yapı panelleri ve enerji verimliliği hedeflenen yapılarda potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Gelecek çalışmalarda farklı doğal lif türleri, alternatif bağlayıcı sistemler (örneğin geopolimerler) veya mikro yapısal analizlerle uzun vadeli dayanıklılık performansları da incelenerek bu alandaki bilgi birikimi daha da derinleştirilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Althoey F., Ansari WS., Sufian M., Deifalla AF. Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment. Developments in the Built Environment 2023; 16: 100284.

Ardanuy M., Claramunt J., Toledo Filho RD. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. Construction and Building Materials 2015; 79: 115-128.

ASTM C1113/C1113-09. Standard test method for thermal conductivity of refractories by hot wire (Platinum Resistance Thermometer Technique). ASTM International, West Conshohocken, PA. 2009.

Bhandari R. Augmentation of coconut fiber with ground granulated blast furnace slag reinforced lightweight aggregated concrete: A review. International Journal of Innovative Research in Modern Physics & Science (IJIRMPS) 2022; 10(2): 2349-7300.

Bittner CM., Oettel V. Fiber reinforced concrete with natural plant fibers-investigations on the application of bamboo fibers in ultra-high performance concrete. Sustainability 2022; 14(19): 12011.

Chen W., Xie Y., Li B., Wang J., Thom N. Role of aggregate and fiber in strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. Construction and Building Materials 2021; 299: 124002.

Chen Z., Zhao G., Wei J., Chen C., Tang Y. Residual impact resistance behavior of PVA fiber-reinforced cement mortar containing Nano-SiO_2 after exposure to chloride erosion. Construction and Building Materials 2024; 414: 134990.

Ferreira SR., Martinelli E., Pepe M., de Andrade Silva F., Toledo Filho RD. Inverse identification of the bond behavior for jute fibers in cementitious matrix. Composites Part B: Engineering 2016; 95: 440-452.

Filazi A., Tortuk S., Pul M. Determination of optimum blast furnace slag ash and hemp fiber ratio in cement mortars. Structures 2023; 57: 10502.

García G., Cabrera R., Rolón J., Pichardo R., Thomas C. Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions. Journal of Building Engineering 2024; 98: 111267.

Gao J., Wang Z., Zhang T., Zhou L. Dispersion of carbon fibers in cement-based composites with different mixing methods. Construction and Building Materials 2017; 134: 220-227.

Guehlouz I., Ben Amma BK., Belkadi AA., Soualhi H. Experimental analysis of mechanical behavior, rheology, and endogenous shrinkage in high-performance concrete with flax and polypropylene fibers. Construction and Building Materials 2025; 460: 139856.

Hejazi SM., Sheikhzadeh M., Abtahi SM., Zadhoush A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and Building Materials 2012; 30: 100-116.

Hill CA., Khalil HA., Hale MD. A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres. Industrial Crops and Products 1998; 8(1): 53-63.

Holschemacher K., Mueller T., Ribakov Y. Effect of steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete. Materials and Design 2010; 31: 2604-2615.

Islam MS., Ahmed SJU. Influence of jute fiber on concrete properties. Construction and Building Materials 2018; 189: 768-776.

Juarez CA., Fajardo G., Monroy S., Duran-Herrera A., Valdez P., Magniont C. Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite. Construction and Building Materials 2015; 91: 164-170.

Juarez-Alvarado CA., Magniont C., Escadeillas G., Terán-Torres BT., Rosas-Diaz F., Valdez-Tamez PL.Sustainable proposal for plant-based cementitious composites: Evaluation of their mechanical, durability, and comfort properties. Sustainability 2022; 14: 14397.

Khan M., McNally CA. Holistic review on the contribution of civil engineers for driving sustainable concrete construction in the built environment. Developments in the Built Environment 2023; 16: 100273.

Kund SP., Chakraborty S., Roy A., Adhikari B., Majumder SB. Chemically modified jute fibre reinforced non-pressure (NP) concrete pipes with improved mechanical properties. Construction and Building Materials 2012; 37: 841-850.

Lee GW., Choi YC. Effect of abaca natural fiber on the setting behavior and autogenous shrinkage of cement composite. Journal of Building Engineering 2022; 56: 104719.

Majumder A., Stochino F., Frattolillo A., Valdés M., Mancusi G., Martinelli E. Jute fiber reinforced mortars: Mechanical response and thermal performance. Journal of Building Engineering 2023; 66: 105888.

Mistretta F., Stochino F., Sassu M. Structural and thermal retrofitting of masonry walls: An integrated cost-analysis approach for the Italian context. Building and Environment 2019; 155: 127-136.

Onuaguluchi O., Banthia N. Plant-based natural fiber reinforced cement composites: a review. Cement and Concrete Composites 2016; 68: 96-108.

Özen S., Benlioğlu A., Mardani A., Altın Y., Bedeloğlu A. Effect of graphene oxide-coated jute fiber on mechanical and durability properties of concrete mixtures. Construction and Building Materials 2024; 448: 138225.

Raghoo Y., Ramasawmy H., Gooroochurn M., Chummun J., Seeboo A., Brown N. A further milestone to the use of natural fibers in concrete – past findings, barriers and novel research avenues. IOP Conference Series, Materials Science and Engineering 2021; 1203(2): 022038.

Rahimi M., Hisseine OA., Tagnit-Hamou A. Effectiveness of treated flax fibers in improving the early age behavior of high-performance concrete. Journal of Building Engineering 2022; 45: 103448.

Rocha DL., Tambara LU., Marvila MT., Pereira EC., Souza D., de Azevedo ARG. A review of the use of natural fibers in cement composites: concepts, applications and Brazilian history. Polymers 2022; 14(10): 1-22.

Shah SFA., Chen B., Oderji SY., Haque MA., Ahmad MR. Comparative study on the effect of fiber type and content on the performance of one-part alkali-activated mortar. Construction and Building Materials 2020; 243: 118221.

Sultana N., Hossain SMZ., Alam MS., Hashish MMA., Islam MS. An experimental investigation and modeling approach of response surface methodology coupled with crow search algorithm for optimizing the properties of jute fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials 2020; 243: 118216.

Thapa K., Sedai S., Paudel J., Gyawali TR. Investigation on the potential of Eulaliopsis binata (babiyo) as a sustainable fiber reinforcement for mortar and concrete. Case Studies in Construstion Materials 2024; 20: 03115.

Tiwari S., Sahu AK., Pathak RP. Mechanical properties and durability study of jute fiber reinforced concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020; 961: 012009.

TS EN 12390-4 (2002). Testing hardened concrete - Part 4: Compressive strength - Specification for testing machines. Turkish Standard Institute, Ankara (in Turkish).

TS EN 12390-5 (2019). Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens. Turkish Standard Institute, Ankara (in Turkish).

TS EN 196-1 (2009). Methods of testing cement: Part 1. Determination of strength. Turkish Standard Institute, Ankara (in Turkish).

TS EN 206+A2 (2021). Concrete - specification, performance, production and conformity. Turkish Standard Institute, Ankara (in Turkish).

Venkatarama Reddy BV. Sustainable materials for low carbon buildings. International Journal of Low-Carbon Technologies 2009; 4(3): 175-181.

Yan PL., Chouw N., Huang L., Kasal B. Effect of alkali treatment on microstructure and mechanical properties of coir fibers, coir fiber reinforced-polymer composites and reinforced-cementitious composites. Construction and Building Materials 2016; 112(6): 168-182.

Yan L., Kasal B., Huang L. A review of recent research on the use of cellulosic fibers, their fiber fabric reinforced cementitious, geo-polymer, and polymer composites in civil engineering. Composites Part B: Engineering 2016; 92: 94-132.

Yooprasertchai E., Wiwatrojanagul P., Pimanmas A. A use of natural sisal and jute fiber composites for seismic retrofitting of nonductile rectangular reinforced concrete columns. Journal of Building Engineering 2022; 52: 104521.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2094-2110, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2094-2110, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Endüstriyel Borlama Uygulamaları için AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Optimum Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi

Yasin GÜRCAN[1], Arzum IŞITAN[2*]

[1,2]Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli

[1]https://orcid.org/0009-0002-0798-4578
[2]https://orcid.org/0000-0002-5228-9788
*Sorumlu yazar: aisitan@pau.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 15.02.2025
Kabul tarihi: 12.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Borlama
Takım çeliği
Yüzey pürüzlülüğü
Boyut toleransı

ÖZ

Borlama işlemi sırasında, malzemenin yüzeyinde çok ince ve son derece sert bir seramik tabaka oluşur. Bu işlem, aşınma ve korozyona karşı yüksek direnç gerektiren bileşenlerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Borlanmış parçalar üstün özellikler kazansa da işlem sırasında kullanılan yüksek sıcaklıklar, parçanın son boyutlarını ve yüzey pürüzlülüğünü değiştirebildiğinden önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Bu durum, yüksek boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi gerektiren ancak işlevleri nedeniyle hızla aşınan zımbalar gibi hassas kesici takımlar için özellikle kritiktir. Bu çalışmada, hassas kalıp parçalarında yaygın olarak kullanılan AISI D2 (1.2379, X153CrMoV12) soğuk iş takım çeliğinin borlama sonrası yüzey pürüzlülüğündeki değişim incelenmiştir. Farklı başlangıç yüzey pürüzlülüğüne sahip numuneler, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda, 6 ve 8 saat süreyle Ekabor® II katı ortamında borlanmıştır. İşlem öncesi nihai boyutlandırma ve yüzey durumları, tel erozyon ve hassas tornalama işlemleriyle hazırlanmıştır. Sonuçlar, başlangıç Ra değeri < 1 µm olan numunelerde yüzey pürüzlülüğünde %143'e kadar artış olduğunu, Ra değeri > 2 µm olan bazı numunelerde ise %26'ya varan azalma sergilediğini göstermiştir. Artan sıcaklık ve süre, bu etkileri daha da yoğunlaştırmıştır. Bulgular, başlangıç yüzey pürüzlülüğünün borlama sonrası yüzey morfolojisi üzerinde kritik bir rol oynadığını ve hassas uygulamalarda dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Determination of the Optimum Surface Roughness of AISI D2 Cold Work Tool Steel for Industrial Boronizing Applications

Research Article

Article History:
Received: 15.02.2025
Accepted: 12.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Boronizing
Tool steel
Surface roughness
Dimension tolerance

ABSTRACT

During the boronizing process, a very thin and extremely hard ceramic layer forms on the surface of the material. This procedure is commonly applied to components requiring high resistance to wear and corrosion. Although boronized parts acquire superior properties, a key challenge is the elevated temperatures used during the process, which can alter the final dimensions and surface roughness of the part. This issue is particularly critical for precision cutting tools such as punches, which require high dimensional accuracy and surface quality but often suffer from rapid wear due to their function. In this study, the surface roughness evolution of AISI D2 (1.2379, X153CrMoV12) cold work tool steel—widely used in precision mold parts—was investigated after boronizing. Specimens with different initial surface roughness values were boronized in a solid Ekabor® II medium at 900 °C and 950 °C for 6 and 8 hours. Final dimensions and surface conditions were prepared via wire erosion and fine turning before treatment. The results showed that samples with Ra < 1 µm experienced up to 143% increase in surface roughness, while some Ra > 2 µm samples exhibited reductions of up to 26%. Increased temperature and duration intensified these effects. The findings emphasize that

the initial surface roughness plays a critical role in the post-boronizing surface morphology and must be carefully controlled in precision applications.

To Cite: Gürcan Y., Işıtan A. Determination of The Optimum Surface Roughness of AISI D2 Cold Work Tool Steel for Industrial Boronizing Applications.. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2094-2110.

1. Introduction

According to ASTM 681 standard, tool steels are categorized into hot work, cold work, shock-resisting, special-purpose, and mold tool steel (ASTM, 2018). Cold work tool steels, particularly those in groups A, D, and O, are extensively used in the molding industry. Within the D types, ranging from D2 to D7, high carbon and chromium contents contribute to exceptional wear resistance. AISI D2 steel (DIN 1.2379 / X155CrVMo12-1) is notably prevalent in the manufacturing of various molding parts, including blanking, forming, and trim dies, gages, slitting cutters, wear parts, lamination dies, thread rolling dies, drawing dies, rotary cutting dies, knurls, bending dies, gages, shear blades, burnishing tools, rolls, machine parts, master parts, injection screw and tip components, seaming rolls, extrusion dies, tire shredders, scrap choppers, stamping dies, and more (Hunan Fushun Metal Co., 2024; Precision Punch and Tooling, 2024; Thyssenkrupp Steel, 2024).

Components like cutting and forming punches in the molding industry, as well as those involved in sensitive processes like female plates, experience substantial wear. Simultaneously, these elements are expected to maintain the desired surface and geometric tolerances. Wear not only shortens component life but also results in production downtime, increased maintenance costs, and energy inefficiency. Friction and wear in industrial systems account for approximately 23% of global energy consumption. Technological advancements in surface engineering could reduce these losses by up to 40%, equating to an 8.7% reduction in global energy use and 1.4% of annual gross domestic product (GDP) (Holmberg and Erdemir, 2017; Bastidas, 2020; Woydt, 2021).

Improving surface hardness is one of the most effective approaches for enhancing wear resistance. Surface hardening methods for steels can be broadly classified into surface exchange processes and hard coating processes. Surface exchange processes can be either hardening-based or diffusion-based (Lampman, 1991). Diffusion-free methods include quenching, flame, induction, and laser hardening, while diffusion-based methods—such as carburizing, nitriding, carbonitriding, and boronizing—alter the surface composition. Hard coatings, including CVD, PVD, and thermal spraying, offer abrasion resistance through thin, durable surface films (Lampman, 1991; Bahrami et al., 2005; Qamar, 2009; Işıtan, 2019).

Boronizing is a thermochemical surface treatment in which boron atoms diffuse into the metal substrate, forming hard boride compounds. The resulting ceramic-like surface layer exhibits high hardness values ranging from 1450 to 2000 HV and thicknesses between a few microns and 100 μm, depending on process parameters. Steels, cast irons, non-ferrous alloys, and sintered metals can all be boronized using solid, paste, gas, or plasma media under temperatures of 700–1100 °C for durations of 1–12 hours

(Matuschka, 1980; Özbek, 2000; Uluköy and Can, 2006; Ulukoy et al., 2013). Figure 1 shows, as an example, the boride layer and EDS analysis of AISI 1040 steel obtained by solid boronizing.

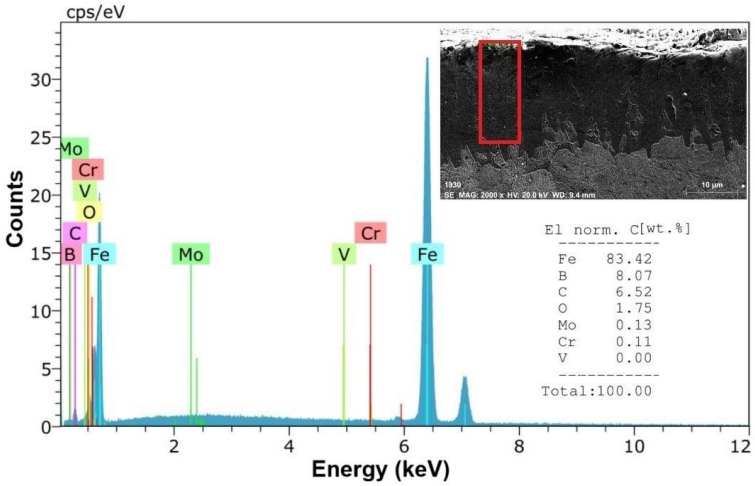


Figure 1. EDS analysis of the boride layer obtained by solid boronizing on AISI 1040 steel

Cold work tool steels are widely used in the mold manufacturing industry. Nowadays, it is expected to produce elements with high wear resistance and at the same time with the required surface and geometric tolerance levels for precision operations such as cutting, punching and forming punches, female plates used in the molding industry. These components operate under high force/pressure and are subject to high friction. These conditions have a great influence on the wear of the parts. Due to its high wear and corrosion resistance, studies are ongoing to understand the boronizing of steels, in particular tool steels and its effect on industrial applications (de Mendonça Ferreira et al., 2021; Nair et al., 2022; Çakır, 2022; Kantoríková et al., 2023). In an industrial application, three times more serviceable part life and four times more cost-effectiveness were achieved for AISI 1040 steel (Işıtan, 2018). According to Armagan et al. (2016), boriding treatment resulted in a 170% reduction in wear loss of AISI D2 tool steel.

Nevertheless, the part's surface quality after boronizing is not the same as before the procedure. As a result of the process, there can be changes in the dimensions of the part, as there is a 5-25% volume expansion in the boron layer (Matuschka, 1980; Sinha, 1991). VillaVelázquez-Mendoza et al. (2014) investigated the influence of surface roughness, treatment time, and temperature on the iron boride layer thickness formed on AISI 1018 steel via the paste boronizing process. The initial surface roughness of the steel substrates ranged from 0.015 to 1.2 µm. It was observed that the boride layer thickness increased with substrate roughness up to an optimal value of approximately 0.8 µm. This enhancement was attributed to the increased contact area between the boronizing paste and the steel surface, which facilitated boron diffusion into the steel's crystalline lattice. However, when the surface roughness exceeded 0.8 µm, a deterioration in the adhesion between the paste and the substrate was reported, leading to a reduction in boride layer thickness due to hindered diffusion kinetics (VillaVelázquez-Mendoza et al., 2014). Jain and Sundararajan (2002) investigated the effect of boronizing on the surface

roughness of low carbon steel. In their study, a steel specimen with an initial surface roughness (Ra) of 0.2–0.3 μm exhibited an approximately 2–3-fold increase in roughness after undergoing boronizing at 940 °C for 2 hours. The observed increase in surface roughness was reported to be independent of the thickness of the boronizing medium. Instead, it was attributed to the chemical reaction occurring during the process, which led to the formation of iron boride phases on the surface (Jain and Sundararajan, 2002). Yu et al. (2005) also found that the surface roughness of a mild steel increased during the boronizing process at 850 °C with maximum 4 hours boronizing durations (Yu et al., 2005). Turkmen and Yalamac (2022) boronized SAE 1020 steel specimens with a surface roughness value of 0.28 μm at 850 °C for 4 hours with different boronizing mixtures by powder-pack method. The surface roughness values increased between 63% and 96% after the boronizing processes (Turkmen and Yalamac, 2022). In the study by Belaid et al. (2022), a modified cold work tool steel treated by powder-pack boronizing within the temperature range from 800 °C to 1000 °C for boronizing time of 2, 4, 6 and 8 hours. The pre-boronizing surface roughness value of Ra=0.07 μm increased up to Ra=0.46 μm depending on the boronizing conditions (Belaid et al., 2022). In the study by Sahin (2009), the AISI 1020, AISI 1040, and AISI 2714 were chosen as substrate materials and were boronized at 900 °C by a solid boronizing method using Ekabor® I for 2 and 4 hours. Surface roughness values decreased after boronizing for surfaces that were rough before boronizing and increased for surfaces that were smooth before boronizing (Sahin, 2009).

The increase in surface roughness after boronizing is primarily attributed to the formation of iron boride phases (FeB and Fe_2B), which possess distinct crystal structures and hardness values. The heterogeneous growth of these phases, influenced by boronizing temperature, duration, and the substrate's initial roughness, often leads to uneven surface profiles, micro-cracks, and the formation of micropores due to gas evolution (e.g., B_2O_3 vapors) during the process. While many studies confirm an increase in surface roughness after boronizing, others have reported reductions in roughness, particularly when the initial Ra values were relatively high. These contrasting outcomes highlight the complex interaction between initial surface conditions and boride layer development.

Surface quality and dimensional control are critical in the molding industry, especially for precision parts. While boronizing is advantageous for hardness and wear resistance, the process inevitably alters the surface texture. Most literature studies use polished samples with low initial roughness and standard processing times of 2–8 hours. However, there is limited data on how initial surface roughness affects post-boronizing surface quality in tool steels like AISI D2. In industrial settings, particularly in the mold and forming industries, boronized punches, dies, and inserts are increasingly used to extend tool life under high-load, abrasive conditions. However, dimensional instability and surface quality deviations after boronizing can lead to assembly mismatches, reduced precision, and even tool rejection. Therefore, understanding and controlling surface roughness and dimensional changes post-boronizing is critical for ensuring seamless integration into high-precision tooling systems. By identifying optimal initial surface

conditions, this study directly contributes to improving process reliability and reducing costly post-processing steps such as regrinding or finishing.

This study aims to determine the optimum initial surface roughness for AISI D2 cold work tool steel to be boronized and used in precision mold part production. In this investigation, AISI D2 steel was boronized with Ekabor® II solid powder. Before boronizing, the final dimensions and surface conditions were given to the parts by wire erosion and fine turning processes. Samples with varying amounts of surface roughness were boronized in a solid medium for 6 and 8 hours at 900 °C and 950 °C. The effect of the boronizing and finishing process parameters on the final surface roughness of the parts was investigated.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

In this study, a cold work tool steel AISI D2 (DIN 1.2379, X155CrVMo12-1) was used. The chemical composition can be seen in Table 1. It is widely used in many areas such as cutting tools, hot and cold deformation molds, and measuring devices.

Table 1. Chemical composition of AISI D2 cold work tool steel

Element	C	Si	Cr	Mo	V	Fe
wt. %	1.55	0.40	12	0.70	1.00	Bal.

Ekabor® II powders are commercially produced by BorTec as a boronizing solid agent (BorTec, 2024). The approximate chemical composition is composed of 90% SiC, 5% B_4C and 5% KBF_4, with a particle size below 850 μm (Çalık, 2013). Ekabor® II powder was preferred for its reliable performance and proven industrial applicability.

2.2. Methods

The samples to be subjected to boronizing were brought to Ø10±0.4 x 20 mm dimensions by turning and wire erosion processes as final finishing processes, and thus different surface roughness's were obtained on the surface of the samples. The dimensions of the samples were measured using a digital micrometer (Mitutoyo, Japan) with an accuracy of ±0.001 mm. Measurements were taken at five random locations, and the average thickness was calculated. Surface roughness measurements were made using the Mahr MarSurf PS1 surface roughness measuring device (Figure 2a). The surface roughness values obtained before boronizing were averaged by making 3 measurements on each piece. These results, obtained as Ra<1μm as a result of wire erosion, Ra<2μm as a result of fine turning, and Ra<4μm as a result of rough turning, are basically grouped under 3 groups (Table 2).

The boronizing parameters (900 °C and 950 °C, 6 and 8 hours) were selected based on prior research, which demonstrated significant effects of these values on boride layer formation and surface hardness

(Armagan et al., 2016; Gürcan et al., 2019; Kutlubay et al., 2019; Belaid et al., 2022). The boronizing process was carried out in Ø48 x 65 mm stainless steel containers/crucibles using Ekabor® II powders in 6 and 8 hours at 900 °C and 950 °C parameters, as shown in Table 2. The test specimens, which were cleaned with alcohol prior to the process, were placed on Ekabor® II powder placed 15 mm high in stainless steel crucibles, as shown in Figure 2b. A 15 mm thick layer of Ekabor® II powder was placed around and above the specimen and the crucible cover was closed. After that, graphite powder was used to cover the top of the cover to prevent oxidation between the boronizing medium and the furnace atmosphere. The crucible was then placed in a Nabertherm furnace (Figure 2c). After the boronizing process, the crucible was removed from the furnace and allowed to cool at room temperature. Any residual Ekabor® II on the cooled parts was removed with hot water and alcohol.

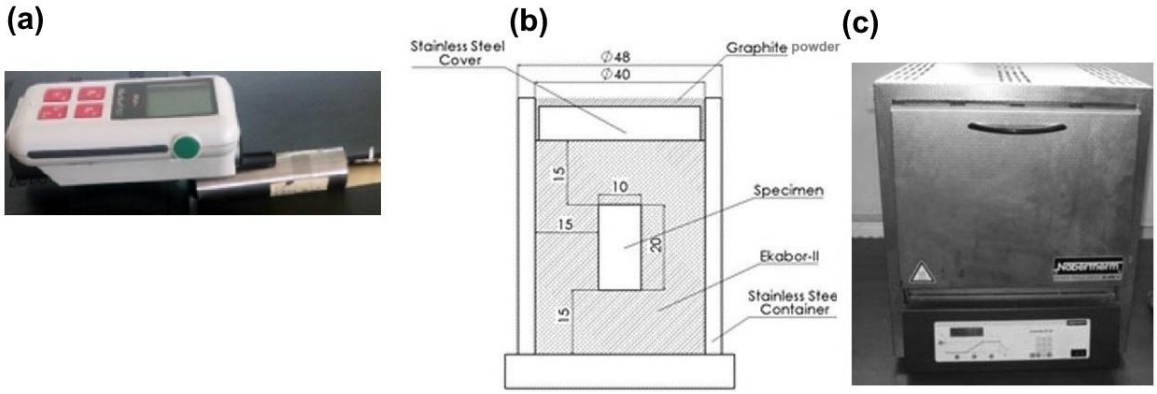


Figure 2. Instruments used in the study: Surface roughness measuring device (a), a schematic view of boriding container (b), furnace (c).

After cleaning, surface roughness and size measurements were repeated. The boronized specimens were cut 5 mm from the forehead for microstructure examination and then grinded with 200, 360, 600, 800, 1000 grit SiO_2 paper. For the polishing process, 3 and 6 µm diamond polishing solutions were used. Then, a 2% nital (nitric acid and ethanol) solution was used for the etching process. The Scanning Electron Microscopy (SEM) were employed to illustrate the boride layers. SEM analysis of the prepared samples was performed using a Zeiss Supra V40 FESEM device, operating at 20 kV, located at Pamukkale University's Advanced Research Center (ILTAM). The hardness values of the borided specimens were taken at 50 g load using a digital micro-Vickers hardness tester (Hardway Hardness Testing Equipment DV-IAT-4.3) at specified increments from the surface to the inner parts of the specimen.

Table 2. Boronizing parameters and surface roughness values before boronizing process

Specimen number	Ra, µm	Boronizing temperature, °C	Boronizing time, h
		Ra<1 µm	
1	0.337	900 °C	8
2	0.335	900 °C	8
3	0.347	900 °C	8
4	0.350	900 °C	6
5	0.355	900 °C	6
6	0.350	900 °C	6
7	0.342	950 °C	8
8	0.399	950 °C	8
9	0.364	950 °C	6
10	0.372	950 °C	6
11	0.356	950 °C	6
		Ra<2µm	
12	1.233	900 °C	8
13	1.754	900 °C	6
14	1.146	900 °C	6
		Ra>2µm	
15	3.649	900 °C	8
16	4.342	900 °C	8
17	3.492	900 °C	8
18	2.217	900 °C	6
19	2.211	950 °C	8

3. Results and Discussion

3.1. Microstructural Results

The formation of a sawtooth structure in the boronized samples was revealed in SEM examinations, as shown in Figure 3. The average thickness of the layers formed was between 23 µm and 40 µm and increased depending on the boronizing time and temperature.

Boron layer thickness and morphology can vary depending on the base material, boronizing medium, temperature, and time (Matuschka, 1980; Sinha, 1991). The 25-40 µm layer thickness and sawtooth morphology obtained in this study are consistent with several studies in the literature (Armagan et al., 2016; Reséndiz-Calderón et al., 2024).

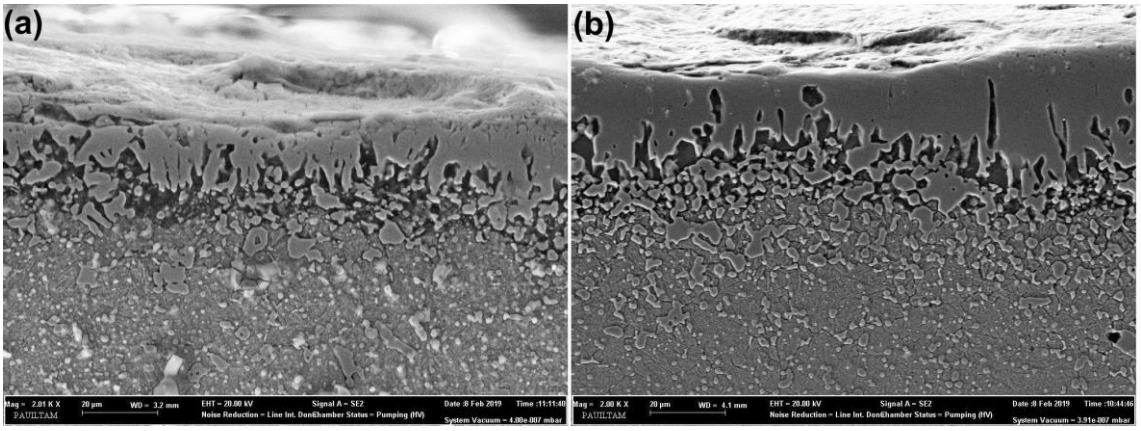


Figure 3. SEM images of boronized samples: a) at 900 °C for 6 h, b) at 900 °C for 8 h

Figure 4 shows the EDS area spectra of AISI D2 steel boride layer boronized at 900 °C for 8 hours. Apart from the main alloying elements carbon, chromium, molybdenum, and vanadium, 8.51 % (wt. %) boron was identified. In ferrous alloys, since the atomic diameter of boron is 27% smaller than the atomic diameter of iron, boron dissolves in α-Fe as a solid in both the ground and intermediate positions, in the order of ppm. The alloying elements also affect the crystallographic arrangement, phase composition, and the thickness of the boride layer at the interface between the boride layer and the steel. An increase in hardness is observed with increasing carbon content up to 0.4% carbon content, above which it remains almost constant for higher carbon content. Since carbon does not dissolve in FeB and Fe_2B type phases but accumulates in areas near the matrix in the form of carbides going Fe_3C, Cr_3C, Fe_6C_3, it is believed that this affects the boronizing mechanism and makes the layer in question tighter and harder. Silicon behaves like carbon and does not dissolve in the boride layer. Chromium affects both the morphology and the depth of the boride layer in steels. Since chromium is an element with a lower atomic number than iron, it is the most boron-rich element (Fe, Cr) B. It diffuses first and systematically from the matrix into the phase and diffuses towards the surface. When the characteristics of the boride layers of chromium alloys are compared with non-chromium alloys, it is seen that the boride layers of chromium alloys are much thinner depending on the carbon percentage (Matuschka, 1980; Sinha, 1991; Özbek, 2000).

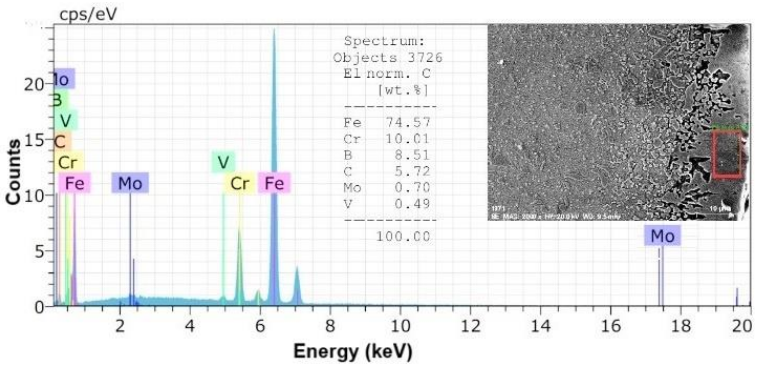


Figure 4. EDS area spectra of AISI D2 steel boride layer boronized at 900 °C for 8 hours

3.2. Microhardness Results

The highest hardness value of 1674 HV0.05 was obtained in the sample boronized at 950 °C for 8 hours. While the hardness value was 1505 HV0.05 in the sample boronized at 900 °C for 6 hours, it was obtained as 1580 and 1650 HV0.05 in the sample boronized at 950 °C for 6 hours and 900 °C for 8 hours, respectively. After about 230-250 µm from the surface, the hardening depth lost its effectiveness and decreased to 300-350 HV0.05.

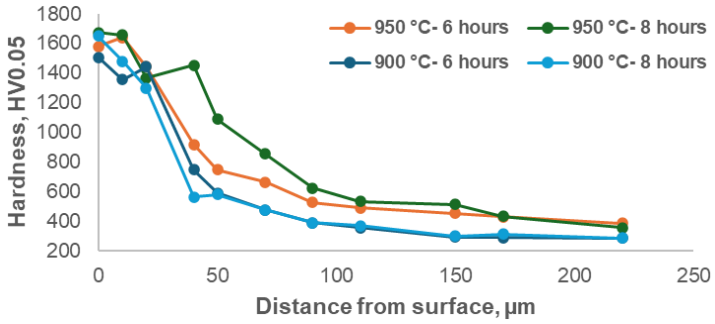


Figure 5. Microhardness measurement results after boronizing process

The microhardness values obtained in this study are in strong agreement with findings reported in the literature. The hardness obtained on the surface increased with the increase in boronizing temperature and time, as expected (Matuschka, 1980; Sista et al., 2011; Pereira et al., 2016). The highest surface hardness of 1674 HV0.05 was recorded in the sample boronized at 950 °C for 8 hours, whereas other boronizing conditions yielded hardness values ranging from 1505 to 1650 HV0.05. These values fall well within the typical hardness range (1450–2000 HV) of boride layers reported by Matuschka (1980), Sista et al. (2011), and Pereira et al. (2016), depending on the substrate and process parameters. The observed increase in surface hardness with higher boronizing temperature and time also aligns with the aforementioned studies.

The presence of alloying elements such as carbon, chromium, molybdenum and vanadium significantly affect the structure and hardness of the boride layer. As can be seen in the EDS area spectra of AISI D2 steel boride layer (boronized at 900 °C for 8 hours) given in Figure 4, it can be seen that the ratio of insoluble carbon increase in the FeB or Fe_2B phases just below the surface. Carbon accumulates as carbides near the surface just below the surface, contributing to a denser and harder layer. Chromium promotes the formation of (Fe,Cr)B phases and affects both the morphology and thickness of the boride layer, often resulting in higher microhardness and thinner layers in chromium-rich steels (Matuschka, 1980; Sista et al., 2011; Pereira et al., 2016).

Additionally, Armağan et al. (2016) reported up to a 77% increase in surface hardness in boronized AISI D2 steel when compared to non-boronized tool steels, which is comparable to the current study. This improvement is attributed to the formation of dense iron boride phases, as also confirmed by SEM-EDS analyses in this study. Moreover, the obtained boride layer thicknesses (23–40 µm) and their sawtooth morphology are consistent with prior literature (Matuschka, 1980; Reséndiz-Calderón et al., 2024),

further validating the reliability of the microstructural and mechanical transformations observed after boronizing.

3.3. Surface Roughness Results

The surface roughness measurement results before and after the boronizing process are shown in Table 3 and summarized in Figure 6. As a result of the measurements, for parts with a surface roughness Ra<1 μm before boronizing, an average of 64% increase in average surface roughness with 900 °C 6 hours boronizing, 70% increase in surface roughness was observed with 900 °C 8 hours boronizing, 88% increase in average surface roughness for 950 °C 6 hours, and 104% increase in average surface roughness for 950 °C 8 hours. The roughness of the surface increased significantly as the boronizing time and temperature increased. The initial Ra values before boronizing range from approximately 0.33 to 0.39 μm. After boronizing, the Ra values range from 0.49 to 0.86 μm. The percentage change in Ra values varies from 36% to 143%. Notably, specimen 11, boronized at 950 °C for 6 hours, exhibits a 143% increase in surface roughness. Generally, higher temperatures (950 °C) and longer durations (8 hours) result in increased roughness in surface.

For the samples having 1<Ra<2 μm, the initial Ra values before boronizing range from 1.15 to 1.75 μm. After boronizing, the Ra values range from 1.29 to 2.03 μm. The percentage change in Ra values ranges between 15% and 46%. Specimen 12, boronized for 8 hours at 900 °C, shows the highest increase in roughness at 46%.

For specimens with Ra>2 μm, the initial Ra values before boronizing ranged from 2.21 to 4.34 μm. After boronizing, the Ra values range from 2.32 to 3.64 μm. The percentage change in Ra values is predominantly negative, ranging from -26% to 20%. For instance, specimen 15, boronized at 900 °C for 8 hours, demonstrates a 26% reduction in surface roughness.

Higher temperatures and longer boronizing durations (e.g., 950 °C for 8 hours) tend to result in greater increases in surface roughness. Specimens with lower initial Ra values (Ra < 1 μm) generally exhibit more significant changes in surface roughness after boronizing, with a higher percentage increase. In contrast, specimens in the Ra> 2 μm category can sometimes experience a decrease in surface roughness following the boronizing process.

Table 3. Variation of surface roughness after boronizing depending on boronizing time, temperature, and surface roughness before boronizing

Specimen number	Boronizing time, hours	Boronizing temperature, °C	Ra, µm (after boronizing)	Change in Ra, %
		Ra<1 µm		
1	8	900 °C	0.586	73
2	8	900 °C	0.573	71
3	8	900 °C	0.570	65
4	6	900 °C	0.593	69
5	6	900 °C	0.552	55
6	6	900 °C	0.593	69
7	8	950 °C	0.766	124
8	8	950 °C	0.744	86
9	6	950 °C	0.497	36
10	6	950 °C	0.697	87
11	6	950 °C	0.865	143
		Ra<2µm		
12	8	900 °C	1.809	46
13	6	900 °C	2.032	15
14	6	900 °C	1.288	16
		Ra>2µm		
15	8	900 °C	2.678	-26
16	8	900 °C	3.641	-16
17	8	900 °C	2.928	-16
18	6	900 °C	2.318	4
19	8	950 °C	2.655	20

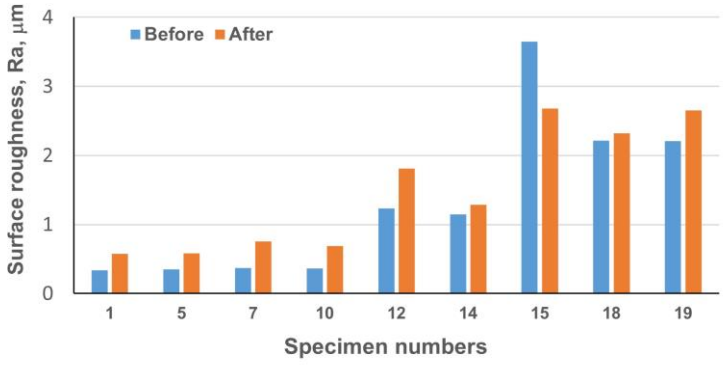


Figure 6. Surface roughness measurement results

In the study by Cetin et al. (2021), while the Ra value of all samples before boronizing was 0.110 µm, the average surface roughness (Ra) values of all boronized samples were higher than untreated AISI 904L (Cetin et al., 2021). In the substrate material used by Basir et al. (2015) 316 austenitic stainless steel, the surface roughness value of Ra=2.130 µm decreased to 0.937 µm as a result of the paste boronizing process (Basir et al., 2015). In the study by Peng (2020), the average Ra value of unboronized AISI 1018 steel sample was 0.7955 µm, while that of AISI 1018 sample boronized at 900 °C for 4 h was 1.3545 µm (Peng, 2020). Krelling et al. (2015) used solid boronizing media on AISI H13 steel. Before treatment, all the samples had an average roughness Ra of 0.05 µm. The roughness increased up to 1

μm with thermochemical treatment (Krelling et al., 2015). Şahin (2009) examined the effects of the boronizing process on surface roughness and dimensions of various steels, including AISI 1020, AISI 1040, and AISI 2714. For each of the steel materials used in the study, the final surface roughness threshold value before boronizing was determined. The base material surface roughness values below this value showed a tendency to increase in surface roughness after the boronizing process, while the surface roughness tended to decrease for threshold values above this value. The study concluded that the boronizing process generally increased the surface roughness, particularly at higher temperatures and for longer durations (Şahin, 2009). In this study, it was also observed that the surface roughness increase was more pronounced in samples with initially lower Ra values, whereas samples with initially higher Ra values exhibited less change or even a decrease in roughness. In the Ra < 1 μm category, a substantial increase in surface roughness is observed after boronizing, particularly at higher temperatures and longer durations. Additionally, the decrease in surface roughness seen in some specimens in the Ra > 2 μm category (e.g., a -26% change for specimen 15) aligns with Şahin's observation that surfaces with initially higher roughness may experience less of an increase or a decrease after the boronizing process (Şahin, 2009).

In this study, at all boronizing conditions and parameters, the specimens grew in diameter and length (Figure 7). The dimensional alterations observed in AISI D2 steel samples after boronizing varied depending on both the processing temperature and duration. As shown in Figure 7a, the increase in sample diameter was more pronounced at shorter boronizing durations. Specifically, the maximum radial expansion occurred at 900 °C for 6 hours (~0.35%), while a noticeable reduction was observed when the duration was extended to 8 hours (~0.12%). A similar trend, albeit less prominent, was seen at 950 °C, where the diameter increases slightly decreased from ~0.3% at 6 hours to ~0.2% at 8 hours. This reduction in dimensional growth with prolonged treatment time may be attributed to the stabilization of the boride layer and a potential reduction in compressive stresses at the surface due to deeper diffusion of boron atoms.

In contrast, the elongation behavior of the specimens along their length exhibited an opposing trend, as illustrated in Figure 7b. At 900 °C, increasing the boronizing time from 6 to 8 hours resulted in a decrease in elongation percentage (from ~0.22% to ~0.13%). However, at 950 °C, a slight increase in elongation was observed with extended treatment (from ~0.14% to ~0.18%). This may be related to enhanced diffusion kinetics and possible anisotropic layer growth at elevated temperatures, leading to differential expansion along the axial direction.

The boron layer formed during the boronizing of steels may also consist of other metal borides depending on the alloying elements of the steel, the boronizing medium used, and the boronizing conditions, but generally and predominantly consists of FeB and Fe_2B borides or only Fe_2B borides. The formation of Fe_2B also causes a non-uniform volume change on the steel surface (Matuschka, 1980; Sinha, 1991). As a result of the boronizing process, dimensional increases occur in steel materials depending on the type of steel and boronizing conditions. For example, while the dimensional increase

in the boronizing processes using Ekabor I was one fifth of the boride layer thickness for AISI 1020 and AISI 1040, it was one third of the boride layer thickness for AISI 2714 (Şahin, 2009).

When boronizing was performed at 900 °C for 8 hours, the increase in both diameter and length was minimal. Overall, these findings indicate that both radial and axial dimensional changes are strongly influenced by boronizing temperature and time. The condition of 900 °C for 8 hours was found to yield the most controlled dimensional behavior, suggesting its suitability for precision applications where dimensional stability is critical.

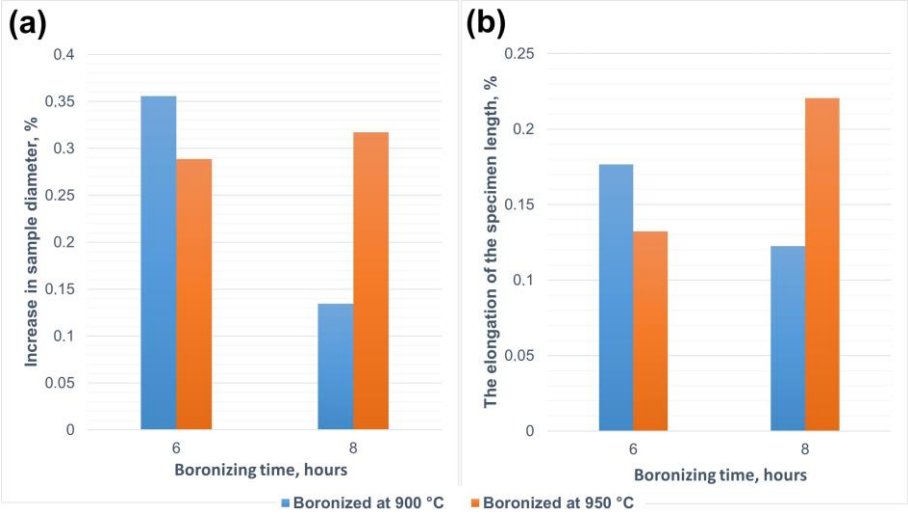


Figure 7. After boronizing, a) increase in specimen diameter (%) and b) increase in specimen length (%)

4. Conclusion

With the thermochemical boronizing process, a very thin boride layer with very high wear and corrosion resistance is obtained on the steel surface. Despite this superior layer obtained after the boronizing process, it is not widely used in the production of mold parts such as punches, where high wear performance is expected but surface roughness is important. Considering this difficulty, in this study, AISI D2 steel, which is widely used in the production of mold parts, was boronized at 900 °C and 950 °C for 6 and 8 hours. The variation of the surface roughness of the steel parts, which were divided into three different surface roughness groups, was investigated after the boronizing process. The formation of boride layers was revealed in SEM and EDS examinations. The results of this study can be summarized as follows:

- As the boriding temperature and time increased, the boride layer thickness increased from 23 µm to 40 µm and the maximum hardness obtained on the surface increased from 1505 HV0.05 to 1674 HV0.05 for samples boronized at 900 °C for 6 hours and 950 °C for 8 hours, respectively.
- Depending on the time and temperature, a 10% increase in the hardness values of the boronized samples was obtained.
- The hardening depth was obtained as 230-250 µm from the surface.

- For smoother surfaces (Ra < 1 μm), the boriding process led to a significant increase in surface roughness, especially under high temperature and prolonged conditions (up to 143% increase for 8 hours at 950 °C).
- Moderately rough surfaces (1 < Ra < 2 μm) exhibited a more controlled increase in Ra values, while rougher specimens (Ra > 2 μm) showed either a negligible change or a decrease in surface roughness, e.g. up to 26% reduction in surface roughness was observed in specimens boronized at 900°C for 8 hours.
- The boronizing process for specimens with an initial surface roughness Ra < 1 μm led to an increase of up to 143% in the final surface roughness value, especially under 950 °C and prolonged 8 hours conditions.
- Moderately rough surfaces (1 < Ra < 2 μm) exhibited a more controlled increase in Ra values, and the percentage change in Ra values ranged from 15% to 46%.
- Rougher specimens (Ra > 2 μm) showed either no negligible change in surface roughness or a reduction of up to 26%, as in the case of boriding at 900°C for 8 hours.
- Considering the boriding parameters used in this study, the results show that boronizing of AISI D2 steel using Ekabor II powders at 900 °C for 8 hours is an optimum condition for mold parts with surface roughness Ra > 2 μm, offering improved surface finish, high hardness and minimal dimensional variation.
- The results demonstrated that both radial and axial dimensional changes in AISI D2 steel are significantly influenced by boronizing temperature and duration, with higher stability observed at lower temperatures and longer treatment times.
- Among the evaluated conditions, boronizing at 900 °C for 8 hours provided the most controlled dimensional behavior, indicating its suitability for precision applications requiring tight dimensional tolerances.

The results of this study highlight that the initial surface roughness, along with boronizing temperature and duration, significantly affects the final surface morphology and dimensional changes in AISI D2 steel. While the findings suggest that lower initial Ra values tend to lead to greater increases in surface roughness, and that extended boronizing at 900 °C offers more stable dimensional behavior, these trends are based on a specific set of parameters. Therefore, the observations presented here may serve as a useful reference for industrial applications, particularly in precision tooling, but further studies are recommended under varying process conditions to confirm the broader applicability of these results.

Author Contribution Statement

The authors declare that they have contributed equally to the article.

Acknowledgements

This study was presented as an oral presentation at the 18th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture and Mathematical Sciences between August 19-21, 2024.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest between them.

References

Armagan E., Kaplan Y., Onar V., Ulukoy A. Wear behavior of boronized AISI D2 tool steel. 16th International Materials Symposium, 12-14 October 2016, pp: 353-358, Denizli, Türkiye.

American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM A681 Standard specification for tool steels alloy, 2018.

Bahrami A., Anijdan S., Golozar M., Shamanian M. Effects of conventional heat treatment on wear resistance of AISI H13 tool steel. Wear 2005; 258(5-6): 846–851.

Basir MHM., Abdullah B., Alias SK., Jumadin MH., Ismail MH. Analysis on microstructure, hardness and surface roughness of shot blasted-paste boronized 316 austenitic stainless steel. Jurnal Teknologi 2015; 76(3): 75–79.

Bastidas DM. Corrosion and protection of metals. Metals 2020; 10(4): 458.

Belaid M., Fares ML., Assalla O., Boukari F. Surface characterization of a modified cold work tool steel treated by powder-pack boronizing. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik 2022; 53(1): 15–38.

BorTec. Improve wear protection by boronizing. https://bortec-group.com/services/boronizing/. Accession date: 15.02.2025.

Çalık A. Effect of powder particle size on the mechanical properties of boronized EN H320 LA steel sheets. ISIJ International 2013; 53(1): 160–164.

Çakir MV. A comparative study on tribocorrosion wear behavior of boride and vanadium carbide coatings produced by TRD on AISI D2 steel. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces 2022; 58(3): 562-573.

Çetin M., Günen A., Kalkandelen M., Karakaş MS. Microstructural, wear and corrosion characteristics of boronized AISI 904L superaustenitic stainless steel. Vacuum 2021; 187: 110145.

de Mendonça Ferreira ST., Bacco ALK., do Nascimento EM., Lepienski CM. Mechanical characterization and micro-wear of FeB-Fe_2B layers on boriding AISI D2 and AISI 4340 steels. Materials Sciences and Applications 2021; 12(7): 330-344.

Gürcan Y., Işıtan A., Kutlubay RÇ. Determination of microstructure and microhardness properties of boronized Vanadis 4 steel. 4th International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS), 24-28 April 2019, pp:277-281, Kiev, Ukraine.

Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Friction 2017; 5: 263-284.

Hunan Fushun Metal Co. DIN 1.2379 cold work mould steel bars with ANSI D2 steel grade. https://www.fushunspecialsteel.com/1-2379-cold-work-mould-steel-bars-with-ansi-d2-steel-grade/. Accession date: 15.02.2025.

Işıtan A. Boronizing: In the industrial applications in Turkey, why not find the place it deserves?. International Symposium on Boron, 17-19 April 2019, pp:287-292, Nevşehir, Türkiye.

Işıtan A. Sondaj makinasında kullanılan ve üzerinde keçe çalışan araparçanın aşınma performansının ve kullanım ömrünün arttırılması. Mühendis ve Makine 2018; 59(693): 47–53.

Jain V., Sundararajan G. Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boronizing of steel. Surface and Coatings Technology 2002; 149(1): 21–26.

Kantoríková E., Moravec J., Biňasová V. The effect of borides on the mechanical properties of tool steels and sintered carbides. Transportation Research Procedia 2023; 74: 522-529.

Krelling AP., Milan JCG., De Costa CE. Tribological behaviour of borided H13 steel with different boronizing agents. Surface Engineering 2015; 31(8): 581-587.

Kutlubay RÇ., Işıtan A., Gürcan Y. Borlama işleminin Vanadis 4 çeliğinin aşınma direnci üzerine etkisi. 4th International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS), 24-28 April 2019, pp:282-285, Kiev, Ukraine.

Lampman S. Introduction to surface hardening of steels. In: Davis, JR. (ed.) ASM Handbook Volume 4 Heat Treating. ASM International 1991; 259–267.

Matuschka AG Von. Boronizing. Oxford England: The Alden Pres; 1980.

Nair F., Zafar HMN., Cerit AA., Karamış MB. Analyzing the influence of simultaneously austenitization and multi-directional boriding on the surface and subsurface of H13 tool steel. Journal of Materials Engineering and Performance 2022; 31(12): 9791-9801.

Özbek I. The improvement of surface performance of (AISI M50, AISI M2) high speed steels and AISI W1 steel by boronizing treatment. Sakarya University Graduate School of Natural and Applied Sciences PhD Thesis, Sakarya, Türkiye, 2001.

Peng C. The effect of boronizing on hardness, wear and corrosion properties of AISI 1018 and AISI 316L steels. University of Saskatchewan College of Graduate and Postdoctoral Studies PhD Thesis, Metis, Canada, 2020.

Pereira R., Mariani F., Lombardi AN., Totten GE., Casteletti L. Characterization of layers produced by boronizing and boronizing-PVD on AISI D2 tool steel. Materials Performance and Characterization 2016; 5(4): 406–413.

Precision Punch and Tooling. Technical reference. https://ppunch.com/technical-reference/. Accession date: 15.02.2025.

Qamar SZ. Effect of heat treatment on mechanical properties of H11 tool steel. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2009; 35(2): 115-120.

Reséndiz-Calderón CD., Cao-Romero-Gallegos JA., Farfan-Cabrera LI., Campos-Silva I., Soriano-Vargas O. Influence of boronizing on the tribological behavior of AISI D2 tool steel for dry deep drawing of stainless steel and aluminum. Surface and Coatings Technology 2024; 484: 130832.

Sinha AK. Boronizing. In: Davis, JR. (ed.) ASM Handbook Volume 4 Heat Treating. ASM International 1991; 437.

Sista V., Kahvecioglu O., Eryilmaz OL., Erdemir A., Timur S. Electrochemical boronizing and characterization of AISI D2 tool steel. Thin Solid Films 2011; 520(5): 1582–1588.

Şahin S. Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714. Journal of Materials Processing Technology 2009; 209(4): 1736–1741.

Thyssenkrupp Steel. 2379 tool steel. https://thyssenkruppsteel.wordpress.com/tag/aisi-d2/. Accession date: 15.02.2025

Türkmen İ., Yalamaç E. Effect of alternative boronizing mixtures on boride layer and tribological behaviour of boronized SAE 1020 steel. Metals and Materials International 2022; 28(5): 1114–1128.

Ulukoy A., Can AC., Ozmen Y., Tasgetiren S. Borocarburizing of decarburized gears made from $21NiCrMo_2$ (AISI 8620) steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications 2013; 229(3): 226–235.

Uluköy A., Can AÇ. Çeliklerin borlanması. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences 2006; 12(2): 189–198.

VillaVelázquez-Mendoza CI., Rodriguez-Mendoza JL., Ibarra-Galván V., Hodgkins RP., López-Valdivieso A., Serrato-Palacios LL., Leal-Cruz AL., Ibarra-Junquera V. Effect of substrate roughness, time and temperature on the processing of iron boride coatings: Experimental and statistical approaches. International Journal of Surface Science and Engineering 2014; 8(1): 71–91.

Woydt M. The importance of tribology for reducing CO_2 emissions and for sustainability. Wear 2021; 474: 203768.

Yu L., Chen X., Khor K., Sundararajan G. FeB/Fe_2B phase transformation during SPS pack-boronizing: Boride layer growth kinetics. Acta Materialia 2005; 53(8): 2361–2368.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2111-2132, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2111-2132, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Exploring the Antibacterial Potential of *Laurus nobilis* Essential Oil and the Synergistic Interaction with 1,8-Cineole and Gentamicin Against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*

Demet HANÇER AYDEMİR[1*]

[1]Süleyman Demirel University, Isparta Vocational School of Health Services, Medical Services and Techniques Department, 32260, Isparta, Türkiye

[1]https://orcid.org/ 0000-0003-0174-8769
*Corresponding author: demetaydemir@sdu.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 27.12.2024
Accepted: 20.05.2025
Published Online:15.12.2025

Keywords:
Methicillin-resistant
Staphylococcus aureus
Laurus nobilis
1,8-cineole
Antibacterial activity
Synergism
Membrane permeability

ABSTRACT

This study aims to evaluate the *in vitro* antibacterial activity of *Laurus nobilis* essential oil (LnEO) and investigate the synergistic interaction between 1,8-cineole and gentamicin against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). The chemical composition of LnEO was analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Its antibacterial activity was assessed via the disk diffusion method, while the minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) were determined using the broth macro-dilution method. The mechanism of action of LnEO was tested using the cell membrane permeability test. The interaction between 1,8-cineole and gentamicin was evaluated using the checkerboard method. A total of 45 volatile compounds, accounting for 100% of the essential oil composition, were identified, with 1,8-cineole (51.43%) being the predominant component. LnEO showed no effect on MRSA growth at 1:40 and 1:20 dilution ratios. However, inhibition zones of 14.2 mm, 11.8 mm, and 8.7 mm were observed at dilution ratios of 1:1, 1:5, and 1:10, respectively, indicating that MRSA is susceptible to LnEO at these concentrations. The MIC and MBC values were established as 1:4 and 1:2, respectively. In the time-kill assay, LnEO at 2xMIC caused a progressive decrease in bacterial viability, with no viable bacteria detected at 90 min. At 1xMIC, a 2.4 log10 reduction in viable cell count was observed after 6 h. LnEO at 1xMIC and 1/2xMIC concentrations caused loss of membrane integrity, evidenced by increased crystal violet uptake. Furthermore, the combination of gentamicin and 1,8-cineole exhibited a synergistic effect against MRSA (FICI $\leq$ 0.5). These findings suggest that LnEO and its major component, 1,8-cineole, hold potential for developing effective strategies against MRSA infections. The results also indicate that combining synthetic antimicrobials with natural bioactive compounds at lower doses could reduce potential toxicity and mitigate resistance development, offering a promising alternative to high-dose monotherapy.

Laurus nobilis Esansiyel Yağının Antibakteriyel Potansiyelinin ve 1,8-Sineol ile Gentamisin Arasındaki Sinerjik Etkileşimin Metisiline Dirençli *Staphylococcus aureus*'a Karşı İncelenmesi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 27.12.2024
Kabul tarihi:20.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, *Laurus nobilis* esansiyel yağının (LnEO) *in vitro* antibakteriyel aktivitesini değerlendirmek ve metisiline dirençli *Staphylococcus aureus*'a (MRSA) karşı 1,8-sineol ile gentamisin arasındaki sinerjik etkileşimi araştırmaktır. LnEO'nun kimyasal bileşimi gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC-MS) kullanılarak analiz edildi. Antibakteriyel aktivitesi disk difüzyon yöntemi ile değerlendirilirken,

Metisiline dirençli *Staphylococcus aureus*
Laurus nobilis
1,8-sineol
Antibakteriyal aktivite
Sinerji
Membran geçirgenliği

minimum inhibitör konsantrasyonu (MİK) ve minimum bakterisidal konsantrasyon (MBK) broth makro dilüsyon yöntemi kullanılarak belirlendi. LnEO'un etki meknanizması ise hücre zarı geçirgenliği testi kullanılarak test edildi. 1,8-sineol ile gentamisin arasındaki etkileşim dama tahtası yöntemi kullanılarak değerlendirildi. Esansiyel yağ bileşiminin %100'ünü oluşturan toplam 45 uçucu bileşik tanımlandı ve 1,8-sineol (%51,43) baskın bileşendi. LnEO, 1:40 ve 1:20 seyreltme oranlarında MRSA'nın büyümesi üzerinde hiçbir etki göstermedi. Bununla birlikte, 1:1, 1:5 ve 1:10 seyreltme oranlarında sırasıyla 14,2 mm, 11,8 mm ve 8,7 mm'lik inhibisyon zonları gözlenmesi, MRSA'nın bu konsantrasyonlarda LnEO'ya duyarlı olduğunu göstermektedir. MİK ve MBK değerleri sırasıyla 1:4 ve 1:2 olarak belirlendi. Zaman-öldürme testinde, 2xMİK konsantrasyonunda LnEO, bakteriyel canlılıkta kademeli bir azalmaya yol açtı ve 90. dakikada canlı bakteri tespit edilmedi. 1xMİK konsantrasyonunda ise 6 saat sonunda canlı hücre sayısında 2.4 log10 azalma kaydedildi. LnEO 1xMİK ve 1/2xMİK konsantrasyonda hücre zarının bütünlüğünün kaybolmasına neden oldu; bu, kristal viyole alımının artmasıyla kanıtlandı. Ayrıca, gentamisin ve 1,8-sineol kombinasyonu, MRSA'ya karşı sinerjik bir etki gösterdi (FICI ≤ 0,5). Bu bulgular LnEO ve onun ana bileşeni olan 1,8-sineolün MRSA enfeksiyonlarına karşı etkili stratejiler geliştirme potansiyeli taşıdığını göstermektedir.Sonuçlar ayrıca sentetik antimikrobiyalleri doğal biyoaktif bileşiklerle düşük dozlarda birleştirmenin potansiyel toksisiteyi azaltabileceğini ve direnç gelişimini hafifletebileceğini, yüksek doz monoterapiye umut verici bir alternatif sunabileceğini göstermektedir.

To Cite: Hançer Aydemir D. Exploring the Antibacterial Potential of *Laurus nobilis* Essential Oil and the Synergistic Interaction with 1,8-Cineole and Gentamicin Against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2111-2132.

1. Introduction

Staphylococcus aureus (*S. aureus*) causes nosocomial and community-associated infections. It causes various human diseases, including skin infections, sepsis, osteomyelitis, pneumonia, bacteremia, and endocarditis (Ibrahim et al., 2023). Since *S. aureus* is very resistant to environmental conditions, it is widespread both in nature and in the throat and nasal cavities of humans, acne, and abscessed wounds (Gulbandilar et al., 2012). It is spread by direct contact with an infected person, handling a contaminated object or consuming food, and inhaling infected droplets dispersed through sneezing or coughing. In particular, food contamination with enterotoxin-producing *S. aureus* causes staphylococcal food poisoning (Çakıcı et al., 2015). With the therapeutic use of penicillin antibiotics in 1941, the number of cases decreased. Still, after a while, the emergence of beta-lactamase-producing strains led to the emergence of penicillin-resistant *S. aureus* bacteria. In this case, methicillin antibiotics started to be used in the treatment, but methicillin-resistant *S. aureus* (MRSA) strains emerged after a while. Later, vancomycin antibiotics were used in the treatment, but this time vancomycin-resistant *S. aureus* (VRSA) strains came to the fore. The formation of the resistance observed in *S. aureus* against existing antibiotics has made the treatment difficult, and this has caused the search for new methods and antimicrobial agents in the treatment (Culos et al., 2013). However, interest in essential oils has increased in the last years due to the antimicrobial and antibiofilm effects of bioactive components in essential oils (Sharifi-Rad et al., 2017; Maniki et al., 2023). It is thought that they do not have toxic effects due to their natural structure, and the development of bacterial resistance to chemical substances found in essential oils becomes difficult (Al-Jabri and Hossain, 2014).

Essential oils obtained from medicinal plants have been known to have biological activity since ancient times (Baratta et al., 1998; Bounatirou et al., 2007). Essential oils contain terpenoids, phenolic compounds, aliphatic hydrocarbons, aldehydes, acids, acyclic esters, alcohol, and lactones (Rota et al., 2004). The antimicrobial effects of these oils are primarily attributed to their chemical composition and the specific functional groups present (Celiktas et al., 2007; Omidbeygi et al., 2007). Essential oils work by sensitizing the bacterial cell membrane, increasing the permeability of intracellular components, and disrupting bacterial enzyme systems (Singh et al., 2002). In this regard, *Laurus nobilis* are considered to have significant antibacterial potential (Chouhan et al., 2017). *Laurus nobilis* (*L. nobilis*) grows in many warm regions of the world and its leaves are used in a variety of food applications (Jirovetz et al., 1997; Barla et al., 2007). Studies have determined that the main component of *Laurus nobilis* essential oil (LnEO) is 1,8-cineole (Marzouki et al., 2009; Aydın, 2019). This compound is also known as eucalyptol, is found in other plants such as *Rosmarinus officinalis* and *Eucalyptus globulus*. Additionally, 1,8-cineole is an agent used in the treatment of gastrointestinal and respiratory diseases (Saraiva et al., 2021).

The increase in antibiotic resistance in recent years has led to the need for the discovery of new plant-derived drugs to combat infections, against which bacteria cannot develop resistance. Essential oils and their components have shown potential to be used as adjuvants in antimicrobial drugs to prevent the development of antibiotic resistance in pathogenic strains (Chouhan et al., 2017). The synergistic interaction between essential oils or their components and antimicrobial agents appears to be a promising alternative strategy for combating antimicrobial resistance. Some studies have shown that the synergy between essential oils and antibiotics increases their effectiveness against antibiotic-resistant bacteria (Yang et al., 2017; Owen and Laird, 2018). For instance, aminoglycosides such as gentamicin are often used in combination with beta-lactams to treat severe infections caused by both Gram-negative and Gram-positive bacteria (Paul et al., 2014). However, there is limited literature on the interaction between 1,8-cineole and gentamicin. The aim of this study is to determine the antibacterial activity of *Laurus nobilis* essential oil (LnEO) on MRSA and to explore the interaction between its main component, 1,8-cineole, and gentamicin to develop new and more effective treatment options.

2. Material and Methods

2.1. Essential Oil

LnEO was commercially purchased from the pharmacy. The oil was obtained from the *L. nobilis* leaves by steam distillation method. LnEO was diluted with 10% dimethyl sulfoxide (DMSO), passed through a 0.45 μm millipore filter, transferred to dark-colored, sterile, and aluminum foil-coated dark-colored bottles, and stored at +4 °C until use.

2.2. Test Microorganism

Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) ATCC 43300 reference strain was used in the study. MRSA was cultured by passage from stock culture to freshly prepared Nutrient Agar (NA) medium under sterile conditions using a loop. The petri dishes with bacterial inoculation were incubated in a 37 °C incubator for 18-24 h.

2.3. Chemicals

Gentamicin (10µg; Bioanalyse) antibiotic disc was used as reference material in the disk diffusion method. In the combination study, 1,8-cineole (purity ≥98.0%; Sigma-Aldrich; CAS 470-82-6) was used.

2.4. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) *Analysis*

LnEO was analyzed with the Shimadzu QP 5050 (Kyoto, Japan) brand GC-MS system. Varian CP WAX 52 CB capillary column as separation column (50 m x 0.32 mm ID, d_f: 1.2 µm) was used. Helium (99.999%) was used as carrier gas with a constant column inlet pressure of 10 psi (1 psi = 6894.76 Pa). The sample volume injected was 1 µL. The GC furnace was programmed as follows: The initial column temperature was set to 60 °C, after this temperature was kept constant for 1 min, it was increased to 220 °C with a temperature increase of 2 °C/min and kept constant for 20 min at the final temperature of 220 °C. Compound identification was performed by comparing the mass spectra and linear retention indices (LRI) of the compounds with published data from reputable sources, including those from the Wiley and NIST mass spectral libraries. Reference compounds for each identified peak were confirmed using commercial standards, and retention indices (RI) were compared to those available in the literature for further confirmation. The ion source temperature and injection block temperatures were set at 250 and 280 °C, respectively. The emission current of the ionization filament was set to 70 eV.

2.5. Disk Diffusion Method

The *in vitro* antibacterial activity of LnEO was determined by the disk diffusion method, according to the Clinical Laboratory Standards Institute (CLSI, 2012a) standards. Concentrations of the essential oil were prepared as 1/1, 1/5, 1/10, 1/20, and 1/40 (v/v) in 10% DMSO. MRSA was incubated in Mueller Hinton broth (MHB) medium at 37 °C for 18-24 h and the turbidity of the bacterial suspension was adjusted to 0.5 McFarland ($1.0x10^8$ CFU/mL). According to the spread plate method, 100 µL of the bacterial suspension was taken and planted on Mueller Hinton agar (MHA) medium and left to dry for 5-10 min. Sterile commercial blank discs (6 mm in diameter) were impregnated with 20 µL of prepared essential oil samples. The DMSO-impregnated disc was served as a negative control, and a gentamicin antibiotic disc (10 µg) was used as a positive control. The discs were transferred on a solidified agar medium using sterile forceps. The media were incubated for 24 h at 35 °C. After incubation, the diameter of the zone of inhibition around the disc was measured in millimeters. The test was repeated three times

and the mean values were determined as the result value. Based on the width of the inhibition zone diameter, expressed in mm, the results were evaluated as follows: insensitive for diameters less than 8 mm (-), sensitive (+) for diameters 9 to 14 mm, very sensitive for diameters 15 to 19 mm (++) and has been interpreted as being extremely sensitive (+++) for diameter greater than or equal to 20 mm (Moreira et al., 2005).

2.6. Minimum Inhibitory Concentration (MIC) and Minimum Bactericidal Concentration (MBC)

Various approaches exist for assessing antimicrobial activity. One of the most widely used methods is the microbroth dilution technique, which is standardized by the CLSI. This method yields important parameters, including the MIC and MBC of the antimicrobial agent being tested (Buldain et al., 2021). In this study, the broth macro-dilution method was chosen for MIC determination due to its suitability for larger test volumes, ease of application in manual settings, and its inclusion among the validated methods described by CLSI (CLSI, 2012b). The bacterial suspension was incubated for 18-24 h at 37 °C in Mueller Hinton broth (MHB) medium and its turbidity was adjusted to 0.5 McFarland ($1.0x10^8$ CFU/mL). The final two-fold serial dilutions of LnEO were prepared in the concentration range of 1:1-1:128 (v/v). 100 µL of the inoculum was inoculated into the test medium to achieve the final test concentration of $5.0x10^5$ CFU/mL. Positive control (bacteria+medium) and negative controls (medium alone and essential oil only) were also established. Following the overnight incubation at 37 °C, the lowest concentration of essential oil that inhibited the visible growth of bacteria was recorded as the MIC value. On the other hand, MBC was determined as the lowest concentration of LnEO needed to kill MRSA. To determine the MBC value, 100 µL of samples were taken from wells with no bacterial growth and spread onto MHA media and incubated at 37 °C for 24 h. At the end of the incubation, the concentration of essential oil in the Petri dish without bacterial growth was recorded as the MBC value (Yilmaz, 2012). Each experiment was repeated three times.

2.7. Time-kill Assay

MIC and MBC parameters provide static information. The time-kill test defines the antimicrobial activity of a compound dynamically and allows for the analysis of bacterial behavior during the exposure period in the presence of the antimicrobial agent (Buldain et al., 2021). A concentration equal to the 1xMIC and MBC=2xMIC of LnEO were chosen as the oil concentration to be used in the study. Essential oil and 0.5 McFarland suspension were transferred to 2 mL of Mueller-Hinton medium to get a final inoculum of $5.0x10^5$ CFU/mL. In addition, a tube containing the medium and bacteria ($5.0x10^5$ CFU/mL) without essential oil, was also prepared to be used as a growth control. The tubes were incubated at 35 °C at agitation speed of 250 rpm. 100 µL were taken from the tubes at certain interaction times (0., 10., 30., 60., 90., 120., 180., 240. and 360. min) and 1/10, 1/100, 1/1000 dilutions were made in physiological saline. 10 µL and 100 µL of each of these dilutions were taken and they were spread plated on the commercially purchased 5% sheep blood agar. The plates were incubated at 35 °C for 18-

24 h. At the end of the incubation period, the number of viable bacteria (CFU/mL) for each time point was determined by counting the colonies grown on the plates. The experiment was conducted three times. The arithmetic mean values of viable bacterial counts at each time point were calculated and converted into log10 values. The same calculations were applied to the control group. The time-kill curve of LnEO against MRSA was plotted using the logarithmic values of the arithmetic means over time. Antibacterial activity of LnEO against the bacteria was found at each interaction time from the relation as given below (Li et al., 2009).

$$\frac{(N_0 - N_1)}{N_0} \times 100 \quad (1)$$

In this relation, N_0; refers to the number of viable bacteria in the essential oil-free control tube, and N_1; refers to the number of viable bacteria in the test series containing essential oil.

2.8. Determination of Cell Membrane Permeability Using Crystal Violet Assay

The permeability of the cell membrane was illustrated through crystal violet (CV) staining assay (Topçu and Şeker, 2022). Fresh bacterial cultures were adjusted to 0.5 McFarland turbidity and inoculated to 2% (v/v) nutrient broth, followed by incubation at 30 °C overnight. After incubation, the cultures were centrifuged at 4000 rpm for 20 min to remove the supernatant. The cells were then treated with 1xMIC, 1/2xMIC, and 1/4xMIC concentrations of LnEO and incubated overnight at 30 °C. Cell suspension that was not treated with LnEO in physiological saline served as the negative control. Subsequently, the cultures were centrifuged for 5 min at 5000 rpm. Pellets obtained were resuspended in phosphate-buffered saline containing 10 µg/mL CV and incubated at 30 °C for 20 min. After incubation, the samples were centrifuged again at 5000 rpm for 15 min, and the optical density (OD) of the supernatant was recorded at a wavelength of 590 nm. The experiment was repeated three times. The percentage of CV uptake results were calculated using the following equation:

$$\text{CV uptake} = 100 - [(\text{OD sample} / \text{OD control}) \times 100] \quad (2)$$

2.9. Combination study: Checkerboard Method

The efficacy of the combination of 1,8-cineole and gentamicin for MRSA strain was tested by checkerboard method using a 96-well and U-bottom sterile microplate. Firstly, the MIC values of gentamicin and 1,8-cineole were determined. According to the recommendations of CLSI, a stock solution of gentamicin (32 µg/mL) was prepared using sterile distilled water and serial dilutions were prepared two-fold at a concentration range of 16 - 0.03125 µg/mL. Likewise, a stock solution of 1,8-cineole was prepared in 10% dimethyl sulfoxide (DMSO) as 128 mg/mL and two-fold serial dilutions were prepared in the concentration range of 64 - 0.125 mg/mL (CLSI, 2012b). 1,8-cineole was diluted from 2-3 dilutions above the MIC value to 4-5 dilutions below the MIC value in the vertical plane

(column 1) from bottom to top, and gentamicin was diluted from 2-3 dilutions above the MIC value to 4-5 dilutions below the MIC value in the horizontal plane (row A) from right to left. The MIC values were checked using the first horizontal row (row A) for gentamicin and the first vertical row (column 1) for 1,8-cineole. The double dilutions of gentamicin were distributed starting from column 9 to column 2 of the microdilution plate. The double dilutions of 1,8-cineole were transferred to rows B and H of the microdilution plate, with each dilution being placed in an entire row. Thus, different combinations of both antibacterial agents were obtained in each well. A positive control well without antibiotics and a negative control well without bacteria were prepared on the plate. 10 µL of bacterial suspension was pipetted into the wells at a final bacterial inoculum concentration of $5.0x10^5$ CFU/mL and the plates were visually evaluated after 18 h of incubation at 35 ± 2 °C (Table 1). The checkerboard test was repeated twice.

Table 1. Final combination dilutions of gentamicin and 1,8-cineole in the panel to be tested for combination effect*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	PC	G 0.125	G 0.25	G 0.5	G 1	G 2	G 4	G 8	G 16	
B	C$2.5x10^2$	G 0.125 C$2.5x10^2$	G 0.25 C $2.5x10^2$	G 0.5 C $2.5x10^2$	G 1 C $2.5x10^2$	G 2 C $2.5x10^2$	G 4 C $2.5x10^2$	G 8 C$2.5x10^2$	G 16 C$2.5x10^2$	
C	C $5x10^2$	G 0.125 C $5x10^2$	G 0.25 C $5x10^2$	G 0.5 C $5x10^2$	G 1 C $5x10^2$	G 2 C $5x10^2$	G 4 C $5x10^2$	G 8 C $5x10^2$	G 16 C $5x10^2$	
D	C $1x10^3$	G 0.125 C $1x10^3$	G 0.25 C $1x10^3$	G 0.5 C $1x10^3$	G 1 C $1x10^3$	G 2 C $1x10^3$	G 4 C $1x10^3$	G 8 C $1x10^3$	G 16 C $1x10^3$	
E	C $2x10^3$	G 0.125 C $2x10^3$	G 0.25 C $2x10^3$	G 0.5 C $2x10^3$	G 1 C $2x10^3$	G 2 C $2x10^3$	G 4 C $2x10^3$	G 8 C $2x10^3$	G 16 C $2x10^3$	
F	C $4x10^3$	G 0.125 C $4x10^3$	G 0.25 C $4x10^3$	G 0.5 C $4x10^3$	G 1 C $4x10^3$	G 2 C $4x10^3$	G 4 C $4x10^3$	G 8 C $4x10^3$	G 16 C $4x10^3$	
G	C $8x10^3$	G 0.125 C $8x10^3$	G 0.25 C $8x10^3$	G 0.5 C $8x10^3$	G 1 C $8x10^3$	G 2 C $8x10^3$	G 4 C $8x10^3$	G 8 C $8x10^3$	G 16 C $8x10^3$	
H	C $16x10^3$	G 0.125 C $16x10^3$	G 0.25 C $16x10^3$	G 0.5 C $16x10^3$	G 1 C $16x10^3$	G 2 C $16x10^3$	G 4 C $16x10^3$	G 8 C $16x10^3$	G 16 C $16x10^3$	NC

* PC: Positive control, NC: Negative control, G: Gentamicin, C: 1,8-cineole. The numbers represent gentamicin and 1,8-cineole concentrations in µg/mL. White colored wells have no bacterial growth, black wells have bacterial growth. ■: wells with bacterial growth, □: wells without bacterial growth.

Discordant results were retested twice, and samples from wells showing no growth were incubated on 5% sheep blood agar. The results were confirmed after verifying the absence of bacterial growth. The fractional inhibitory concentration (FIC) was obtained by proportioning the MIC values obtained from the combination of gentamicin and 1,8-cineole to the MIC values obtained individually. Then, the FIC values of the substances in the combination were summed and the FIC index (FICI) was calculated. The interpretation of the calculated FICI values was made according to the limit values: FICI ≤ 0.5 synergistic, 0.5 < FICI < 1 partially synergistic, FICI = 1 additive, 1 < FICI ≤ 4 indifferent and FICI > 4 antagonistic (Bonapace et al., 2002).

Statistics

Data were presented as the arithmetic mean ± standard deviation (SD) and analyzed using SPSS 16.0 software with one-way ANOVA. $p < 0.05$ was considered statistically significant.

3. Results

3.1. GC-MS Analysis

GC-MS identification, mass percent ratios, retention times and peak area contributions (%) of the compounds present in LnEO were given in Table 2. The peak numbers were also shown in the chromatogram in Figure 1. A total of 45 components have been determined, constituting 100% of LnEO. It was shown that the major components detected in LnEO were 1,8-cineole (51.43%), beta-terpinyl acetate (10.75%), sabinene (9.54%), alpha-pinene (6.34%), beta-pinene (4.93%), 4-terpineol (3.38%), p-cymene (2.83%), beta-fenchyl alcohol (2.03%), linalool (1.43%), respectively.

Table 2. Chemical profile of *L. nobilis* essential oil.

Peak number	Retention time	Component	% Ratio	Area
1	6.345	alpha-thujene	0.46	1186930
2	6.611	alpha-pinene	6.34	16372935
3	6.934	2,4(10)-thujadien	0.06	145512
4	7.171	campus	0.29	758612
5	8.028	Sabinene	9.54	24649970
6	8.222	beta-pinene	4.93	12732020
7	8.646	beta-myrcene	0.71	1825037
8	8.710	2,3-dehydro-1,8 cineole	0.27	704514
9	9.386	Alpha-phellandrene	0.14	367809
10	9.510	delta 3-carene	0.07	181839
11	9.880	alpha-terpinene	0.33	860992
12	10.252	p-cymene	2.83	7323006
13	10.779	1,8-cineole	51.43	132922302
14	11.303	Ocimene <(E)-, beta >	0.07	179767
15	11.890	gamma-terpinene	0.50	1293456
16	12.545	trans-sabinene hydrate	0.25	645934
17	13.336	alpha-terpinolene	0.16	419301
18	14.197	linalool	1.43	3696053
19	15.423	carveol	0.04	115747
20	15.566	p-menth-2-en-1-ol	0.13	344850
21	16.495	trans -pinocarveolus	0.05	127243
22	16.632	alloocimene	0.13	339955
23	17.751	pinocarvone	0.07	177067
24	18.321	alpha-terpineol	0.39	1013291
25	18.978	4-terpineol	3.38	8741208
26	19.916	beta -fenchyl alcohol	2.03	5237416
27	25.647	bornyl acetate	0.16	422613
28	26.001	myrtenyl acetate	0.05	130637
29	26.375	(-)-trans-pinocarvyl acetate	0.08	213262
30	27.566	Pseudolimonene	0.73	1892092
31	29.224	Limonene oxide	0.17	443955

Peak number	Retention time	Component	% Ratio	Area
32	29.858	beta -terpinyl acetate	10.75	27788103
33	30.073	Eugenol	0.26	675867
34	30.662	neryl acetate	0.10	246004
35	31.959	alpha-bourbonene	0.02	56009
36	32.443	beta-element	0.20	528007
37	33.292	Methyleugenol	0.73	1883736
38	34.216	Trans-caryophyllene	0.21	547444
39	38.561	Selinene <beta->	0.06	149114
40	40.145	Cadinene <gamma>	0.05	131927
41	40.534	delta-cadinene	0.02	61076
42	41.974	Cis-alpha-bisabolene	0.04	103895
43	43.954	Spathulenol	0.04	102345
44	44.188	(-)-caryophyllene oxide	0.21	555482
45	48.500	Elemol <alpha->	0.05	136164
			=100.00	258430498

According to the chromatogram, compounds with higher peaks indicated high values in the essential oil (Figure 1). The highest peak value seen in the chromatogram belongs to the 1,8-Cineole at the peak of 13.

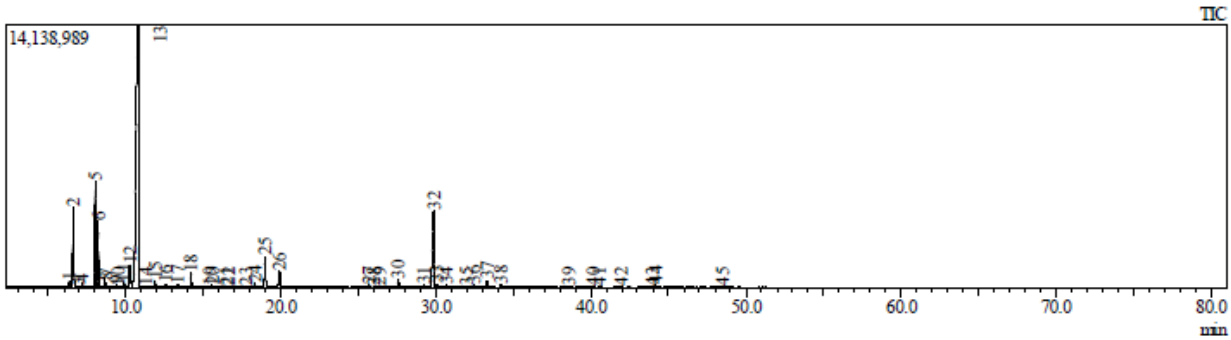


Figure 1. Chromatogram of the *L. nobilis* essential oil by GC-MS. In the chromatogram, the X-axis represents the time taken for the components to pass through the column and reach the mass spectrometer detector. The peaks correspond to the time at which each component reaches the detector, while the Y-axis, or peak area, reflects the amount of each respective component.

3.2. Evaluation of the Antibacterial Activity

In this study, *in vitro* antibacterial efficacy of LnEO was tested against MRSA strain by disk diffusion method. The results are given in Figure 2. The inhibition zone diameter of the gentamicin antibiotic disc was measured as 24.6±0.5 mm. 10% DMSO which was used to dilute LnEO did not show an inhibitory effect on MRSA. To better determine the antibacterial effect, LnEO was diluted at the ratios of 1/1, 1/5, 1/10, 1/20, and 1/40 (v/v). LnEO showed no inhibitory effect on the growth of MRSA at dilution ratios of 1:40 and 1:20. LnEO formed 14.2±0.5 mm, 11.8±0.6 mm, and 8.7±0.7 mm inhibition zones at dilution ratios of 1/1, 1/5, and 1/10, respectively. It was determined that there was a statistically significant difference ($p < 0.05$) between the results obtained at the 1/1, 1/5, and 1/10 dilutions of LnEO and DMSO, but no significant difference was observed between the results obtained at the 1/20 and 1/40 dilutions ($p > 0,5$).

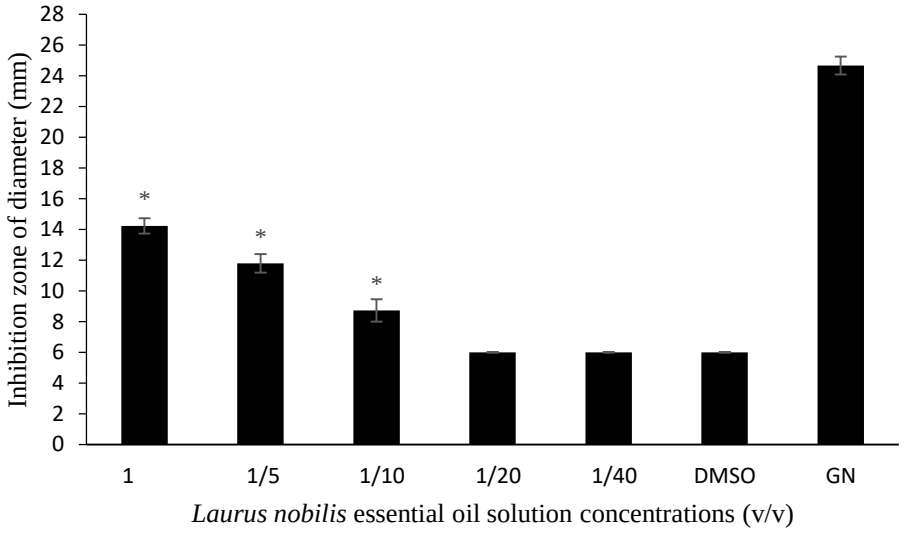


Figure 2. Antibacterial activity of the *L. nobilis* essential oil at different concentrations on MRSA. GN, Gentamicin (10 µg) antibiotic disc was used as the positive control and DMSO was used as the negative control. Zones of inhibition also include disc diameter (6 mm). The data are expressed as means ± SD (n=3). *Indicates a statistically significant difference between the results obtained with LnEO dilutions and those obtained with DMSO ($p < 0.05$).

3.3. Minimum Inhibitory Concentration (MIC) and Minimum Bactericidal Concentration (MBC)

MIC test results of LnEO against MRSA are shown in Table 3. The MIC value was determined as 1:4 (v/v).

Table 3. MIC test results of the *L. nobilis* essential oil against MRSA*

	Dilution rates (v/v)										
	1:1	1:2	1:4	1:8	1:16	1:32	1:64	1:128	PC	NC1	NC2
MRSA	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-

*+, there is growth; -, no growth; PC, positive control (bacteria+medium); NC1, negative control1 (medium alone); NC2, negative control2 (essential oil only).

MBC test results of LnEO against MRSA are presented in Table 4.

Table 4. MBC test results of the *L. nobilis* essential oil against MRSA*

	Dilution rates (v/v)					
	1:1	1:2	1:4	PC	NC1	NC2
MRSA	-	-	+	+++	-	-

*-, no growth (bactericidal); +, low growth; ++, moderate growth (bacteriostatic); +++, high growth (no antibacterial potential); PC, positive control (bacteria+medium); NC1, negative control1 (medium alone), NC2: negative control2 (essential oil only).

One hundred microliters (100 µL) were taken from the dilution tubes (1:1, 1:2, and 1:4) that showed no visible growth in MIC test and were spread onto MHA plates. After overnight incubation at 37 °C, the MBC value, defined as the essential oil concentration in Petri dishes with no bacterial growth, was determined to be 1:2 (v/v).

3.4. Time-kill Kinetics of LnEO

The time-kill curves of LnEO are presented in Figure 3. In the control series, bacterial counts increased as the incubation time progressed. The initial bacterial population was $3.3x10^5$ CFU/mL, which gradually increased throughout the incubation period, reaching $9.2x10^6$ CFU/mL after 6 h.

In the presence of LnEO at a concentration of 2xMIC, bacterial viability progressively decreased at the 10th, 30th, and 60th min. However, no viable bacteria were detected after the 90th min. It was observed that MRSA count decreased to 4.2 log10 by the 10th min, dropped to below 1.7 log10 by the 30th min, and no viable bacteria were detected at the 90th min. When MRSA was exposed to LnEO at a 1xMIC concentration, the initial population ($3.0x10^5$ CFU/mL) decreased gradually during incubation, reaching a reduction of $1.3x10^3$ CFU/mL (2.4 log10 reduction) after 6 h.

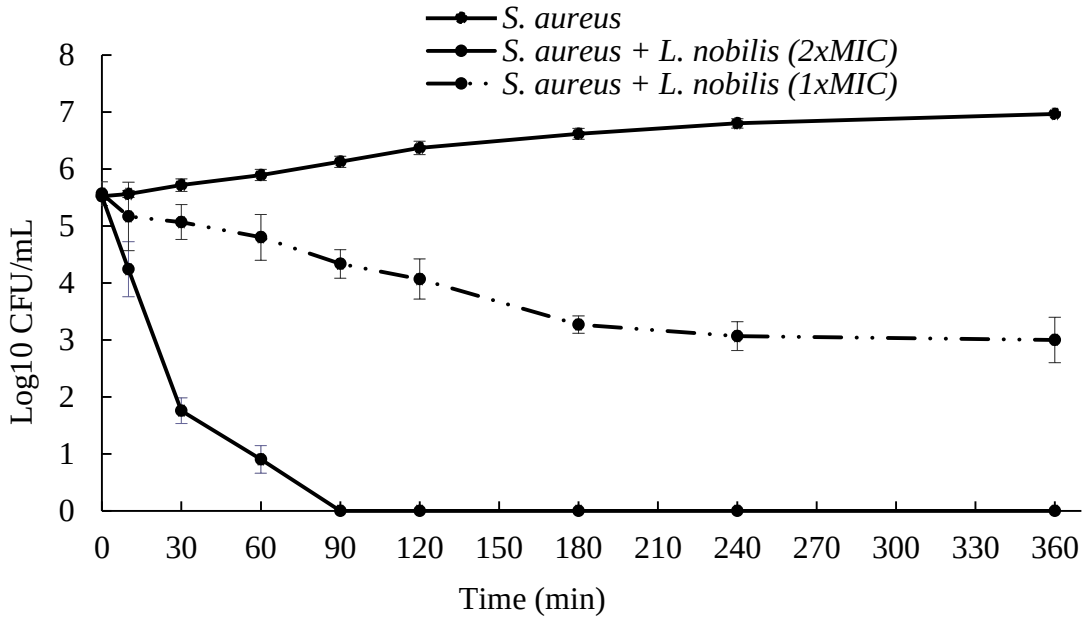


Figure 3. Time-kill curve of *L. nobilis* essential oil (1xMIC, 2xMIC) against MRSA at 6 h incubation time. Each point represents log of the mean ± SD CFU per milliliter (n=3).

The antibacterial activity values of LnEO were calculated using the formula specified in the methods section. These calculations were based on the arithmetic mean values of viable bacterial counts at each incubation period in which MRSA treated with LnEO, as well as the arithmetic mean values obtained from the control experiments. The values found are plotted against time and shown in Figure 4. It was determined that the antibacterial activity of LnEO (2xMIC) against MRSA reached 68.8% at the 30th min, 84.4% at the 60th min (≥ 4 log10 drop in CFU/mL), and 100% at the end of the 90th min. On the other hand, after a 6 h exposure, the antibacterial activity of LnEO at 1xMIC concentration reached 45.1%.

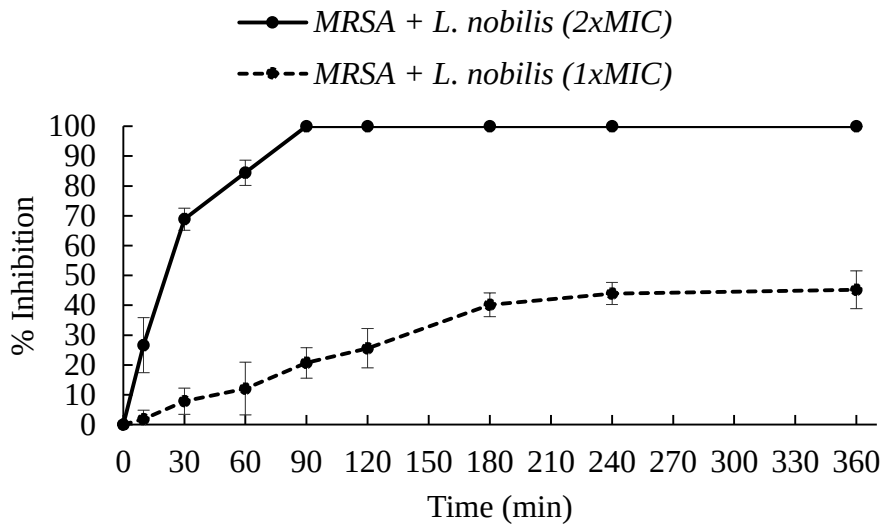


Figure 4. Antibacterial activity of the *L. nobilis* essential oil against MRSA. The data are expressed as means ± SD (n = 3).

3.5. Determination of Cell Membrane Permeability Using Crystal Violet Assay

Membrane permeability was determined using CV uptake assay. CV uptake was 21.8% in the absence of LnEO, while it increased to 65.3% and 38.7% with treatment at 1xMIC and 1/2xMIC concentrations of LnEO, repectively ($p < 0.05$) (Figure 5).

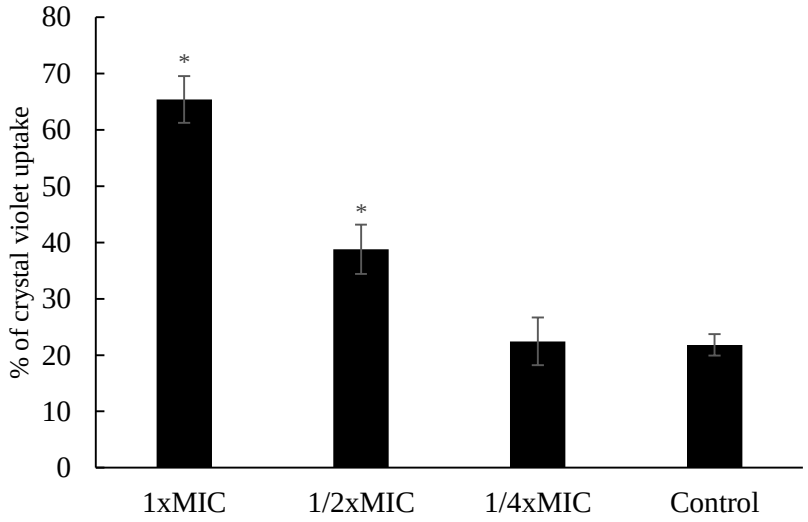


Figure 5. Crystal violet uptake ratio (%). The ability of MRSA to take up crystal violet was evaluated after exposure to LnEO at 1×MIC, 1/2xMIC and 1/4×MIC concentrations. The data are expressed as means ± SD (n = 3). *P < 0.05 compared with the control.

Although CV uptake with 1/4xMIC LnEO treatments was much weaker than with 1xMIC LnEO treatment, a slight increase was observed compared to the control group ($p > 0.05$).

3.6. Interaction of 1,8-cineole with Gentamicin

Firstly, MIC values of 1,8-cineole and gentamicin alone on MRSA were determined. The concentration range of 16 – 0.03125 μg/mL for gentamicin and 64 - 0.125 mg/mL for 1,8-cineole were used to

determine the MIC values. In column 1 for 1,8-cineole and row A for gentamicin, the concentration in the first well without growth was read as the MIC value. The MIC values of gentamicin and 1,8-cineole on MRSA were 4 μg/mL and 4 mg/mL, respectively (Table 5).

Table 5. MIC values of gentamicin and 1,8-cineole against MRSA*

	Dilution rates												
Gentamicin	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.03125	PC	NC1	NC2
(μg/mL)	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
1,8-cineole	64	32	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	PC	NC1	NC2
(mg/mL)	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-

*+, there is growth; -, no growth; PC, positive control (bacteria+medium); NC1, negative control1 (medium alone); NC2, negative control2 (essential oil only).

The wells containing 1,8-cineole and gentamicin combinations were then evaluated for growth. Wells with the lowest drug concentration without growth in all rows and columns (E2, D3, C4, B5, and B6) were used to calculate the FICI value (Table 1). A synergistic effect was determined between 1,8-cineole and gentamicin against MRSA (FICI=0.25).

4. Discussion

In previous studies on *Laurus nobilis*, the monoterpene 1,8-cineole has been widely identified as the dominant compound in its essential oil (Marzouki et al., 2009). Similarly, in this study, 1,8-cineole (51.43%) was identified as the major active component in the composition of LnEO. Other notable compounds included beta-terpinyl acetate (10.75%), sabinene (9.54%), alpha-pinene (6.34%), beta-pinene (4.93%), 4-terpineol (3.38%), p-cymene (2.83%), beta-fenchyl alcohol (2.03%), and linalool (1.43%). Earlier study indicates that 1,8-cineole is generally expected to be present in LnEO at concentrations ranging from 45% to 60% (Aydın, 2019), and the amount of 1,8-cineole detected in this study falls within this expected range.

Upon reviewing studies conducted by other researchers on the major components of LnEO, the following findings were obtained. Previous study conducted in France, the major components of LnEO were found to be 1,8-cineole (39.1%), sabinene (4.4%), alpha-pinene (2.2%), and beta-pinene (1.7%) (Fiorini et al., 1997). Another study reported that the primary component of LnEO was 1,8-cineole (51.73%-68.48%), with significant amounts of alpha-terpinyl acetate (4.04-9.87%), sabinene (4.44-7.75%), alpha-pinene (2.93%-4.89%), beta-pinene (2.58-3.91%), terpinene-4-ol (1.33-3.24%) (Özcan and Chalchat, 2005). A study conducted in Northern Cyprus also identified 1,8-cineole (58.59%), terpinene-4-ol (4.25%), alpha-pinene (3.39%-3.2%), and sabinene (3.32%) as the major components (Yalçın et al., 2007). In research conducted in Iran, the dominant componentswere 1,8-cineole (55.8%), alpha-terpinyl acetate (15.14%), sabinene (3.42%), terpinene-4-ol (5.27%), and alpha-pinene (5.26%) (Verdinan-rizi, 2009). Pala et al. (2011) reported that 1,8-cineole (27.14-46.37%), linalool (4.27-8.60%), alpha-pinene (0.79-2.99%), beta-pinene (0.90-1.86%), and eugenol (0.66-4.90%) were the major

components of LnEO. These findings are largely consistent with the results of our study, with the main variation observed in the concentration of these compounds. This variability is likely influenced by factors such as geographical conditions, harvesting period, and distillation technique, all of which can affect the chemical composition and yield of the oil (Panizzi et al., 1993; Figueiredo et al., 2008). When comparing our results with studies conducted both in our country and internationally, it was observed that 1,8-cineole is the primary component of LnEO.

In this study, LnEO exhibited no antibacterial activity against MRSA at 1/40 and 1/20 dilutions, while inhibition zones of 14.2 mm, 11.8 mm, and 8.7 mm were observed at 1/1, 1/5, and 1/10 dilutions, respectively. It was noted that the inhibition zone diameters decreased proportionally with the reduction in LnEO concentration. Based on the classification of antimicrobial activity of essential oils according to their inhibition diameters (Moreira et al., 2005), the study concluded that *S. aureus* ATCC 25923 was susceptible to LnEO at dilution ratios of 1:1, 1:5, and 1:10. The inhibition zone of pure LnEO against *S. aureus* ATCC 25923 was reported to be 15 mm. However, zones of inhibition were reported to be 9.1 mm, 8.3 mm, and 7.4 mm at 1/2, 1/4, and 1/8 dilutions, respectively (Ouibrahim et al., 2013). Similarly, pure LnEO formed an inhibition zone of 18.75 mm on *S. aureus*, and when diluted with DMSO at a 1/2 and 1/4 ratios, the inhibition zone diameters were 23.35 mm and 9.65 mm, respectively. Therefore, they reported that *S. aureus* is very sensitive to LnEO at these concentrations (Bennadja et al., 2013). These findings align with the results of Kulaksız et al. (2018), who reported an inhibition zone diameter of 13 mm for *S. aureus* ATCC 25923. As *S. aureus* is a Gram-positive bacterium lacking an outer membrane, its cell wall's permeability promotes the passage of hydrophobic compounds like essential oils (Burt, 2004). Phenolic compounds in essential oils increase the permeability of bacteria by causing sensitization of the phospholipid layer in the cell membrane. Leakage of intracellular components out of the cell disrupts bacterial enzyme systems, resulting in the inhibition of the microorganism (Seow et al., 2014).

In this study, LnEO demonstrated an inhibitory effect against MRSA. The MIC value, which is the lowest concentration of essential oil that visually inhibits the growth of MRSA, was determined as 1:4 (v/v). The MBC value, which is the concentration of essential oil in the Petri dishes without bacterial growth, was determined as 1:2 (v/v). Plant extracts are generally considered bactericidal when the MBC/MIC ratio is ≤4 and bacteriostatic when the ratio exceeds 4 (Mujawah et al., 2022). In this study, the MBC/MIC value was found to be 2, indicating that LnEO is bactericidal against MRSA. Similar results were reported by Kulaksız et al. (2018), who found the MIC and MBC values of LnEO against *S. aureus* ATCC 25923 to be above 50%. Parallel to these results, it was determined that LnEO showed antibacterial activity against *S. aureus* ATCC 27706 at 15% concentration (Özcan and Erkmen, 2001).

The time-kill assay is a valuable method for understanding the interactions between microbial strains and antimicrobial agents. This assay demonstrates the concentration- or time-dependent effects of antimicrobial agents on microbial species. It also determines antibacterial agents as bacteriostatic or bactericidal (Balouiri et al., 2016). To this end, the time-kill curve was evaluated against MRSA at

1xMIC and 2xMIC concentrations of LnEO. The results demonstrated a concentration- and time-dependent response. Upon evaluating the time-kill assay results, it was observed that MRSA treated with 2xMIC LnEO exhibited a reduction in bacterial viability over time, with no viable bacteria remaining after 90 min. The bactericidal effect of LnEO against MRSA was confirmed through the time-kill assay results.

CV dye, due to its hydrophobic nature, exhibits limited penetration across the bacterial cell wall. However, it is able to penetrate cells with compromised membranes and enhanced permeability (Nogueira et al., 2021). This characteristic makes the CV assay a reliable tool for detecting cell membrane damage (Tsuchido et al., 1985; Devi et al., 2010). In the present study, the impact of LnEO on the outer membrane permeability of MRSA was assessed by measuring the uptake of CV dye. The uptake of CV was evaluated after exposing MRSA to LnEO at concentrations of 1xMIC, 1/2xMIC, and 1/4xMIC. The control group exhibited a retention of 21.8% CV, while the retention levels in the 1xMIC, 1/2xMIC, and 1/4xMIC treatment groups were recorded as 65.3%, 38.7%, and 22.4%, respectively. These results suggest that exposure to 1xMIC and 1/2xMIC concentrations of LnEO compromised the integrity of the cell membrane.

Essential oils, owing to their lipophilic and hydrophobic properties, tend to preferentially partition from aqueous environments into the lipid bilayers of bacterial membranes. This interaction causes various alterations, including membrane expansion, increased fluidity, and enhanced permeability. Moreover, essential oils disrupt membrane-embedded proteins, inhibit respiratory processes, and interfere with bacterial ion transport mechanisms, all of which contribute to the overall antimicrobial effect (Trombetta et al., 2005). The findings from this study align with these established mechanisms, suggesting that LnEO may facilitate the entry of large molecules, such as CV, by disrupting the bacterial cell membrane structure.

Currently, the prevalence of multi-drug resistant organisms is increasing, prompting the search for new antibiotics. Given the prolonged timeline required for the discovery of new antibiotics, antibiotic combinations are frequently employed in the treatment of infections (Marques et al., 1997). However, due to side effects such as drug-drug interactions and the possibility of one antibiotic in a combination counteracting the lethal effect of the other, there has been increasing interest in incorporating natural compounds derived from plants. These compounds are believed to help reduce antibiotic resistance and potentially mitigate adverse effects (Ayaz, 2001). Combining antibiotics with essential oils or their active ingredients against resistant bacteria may broaden the antibacterial spectrum to reduce the emergence of resistant variants and minimize the dose of a single antibiotic. Previous studies have demonstrated the antibacterial activity of 1,8-cineole to reduce the emergence of resistant variants and minimize the dose of a single antibiotic (Schürmann et al., 2019; Farhanghi et al., 2022). In this study, 1,8-cineole in LnEO was thought to be related to the antibacterial activity of the oil and the effect of its combination with gentamicin on MRSA was investigated. The MIC values of gentamicin and 1,8-cineole were determined as 4 μg/mL and 4 mg/mL, respectively. However, in a study using the

microdilution method, the MIC values of gentamicin and 1,8-cineole obtained for the MRSA strain were 2 μg/mL and 32 mg/mL, respectively (Hriouech et al., 2020). On the other hand, the MIC value of 1,8-cineole against *S. aureus* ATCC 29213 was reported as 12.4 μg/mL (Yáñez Rueda and Cuadro Mogollón, 2012). This may be due to the use of different techniques or the differentiation of the bacterial growth phase. Because it is known that the bactericidal activity of antibiotics decreases when the inoculum increases (Diaz-Tang et al., 2022). As a result of the checkerboard analysis performed in this study, a synergistic effect between 1,8-cineole and gentamicin was observed. 1,8-cineole has been shown to increase the antibacterial effect capacity of the antibiotic gentamicin. Similarly, Hriouech et al. (2020) reported that the combination of gentamicin and 1,8-cineole showed a complete synergistic effect against MRSA strain. The incorporation of essential oils in the prevention of bacterial resistance represents a highly promising strategy, as many conventional antibiotics are singular compounds with a limited target site, whereas essential oils, comprising multiple active constituents, exert their effects at various levels (Yap et al., 2014). Currently, essential oils or their components are utilized in wound dressings, either independently or in conjunction with antibiotics, based on their therapeutic and antibacterial properties (Altaf et al., 2021). Furthermore, certain studies have demonstrated the effectiveness of essential oils in enhancing skin permeability through the use of foams, hydrogels, dermal patches, films, and electrospun polymer dressings, thus promoting the wound healing process (Krysiak et al., 2020; Sroczyk e al. 2022). In combination with antibiotics, 1,8-cineole may be useful in the clinical management of some infectious diseases caused by *S. aureus*, especially nosocomial infections. However, further research should be conducted in the future to have a complete view on the toxicity of 1,8-cineole and to determine its optimal concentration for clinical applications.

5. Conclusion

The results indicate that LnEO and its primary constituent, 1,8-cineole, exhibit antibacterial activity by enhancing the permeability of the cell membrane in MRSA. Furthermore, 1,8-cineole potentiates the antibacterial efficacy of gentamicin through a synergistic interaction between the two agents. These findings suggest that 1,8-cineole may prove clinically beneficial when combined with gentamicin in the treatment of infections, particularly those caused by nosocomial *S. aureus*. The combination of 1,8-cineole with antibiotics could potentially reduce the required doses of standard antibiotics such as gentamicin, thereby mitigating their associated toxic effects while also preventing the emergence of resistance. By potentiating the activity of antibiotics, 1,8-cineole not only enhances the effectiveness of current treatment regimens but also provides alternative therapeutic options for conditions such as polymicrobial infections, which cannot be adequately addressed with a single standard drug.

Future research is required to further assess the clinical efficacy and safety of these compounds in more detail. Specifically, large-scale clinical trials should be conducted to evaluate the synergistic effects of 1,8-cineole and other essential oil constituents in combination with various antibiotics. Such studies may facilitate the development of plant-based therapeutics with low toxicity profiles that are resistant to

bacterial resistance, offering more affordable alternatives to the currently available antibiotics. Furthermore, additional investigations into the potential toxic effects of the 1,8-cineole and gentamicin combination are essential. Examining these agents in combination with other antibiotics and utilizing clinically relevant microbial strains will provide a clearer understanding of their therapeutic potential and limitations. Future studies will offer valuable insights into how these compounds can be more effectively utilized, in conjunction with antibiotics, to address the growing issue of antibacterial resistance.

Acknowledgments

The author would like to thank 'Innovative Technologies Application and Research Center (YETEM)' in Süleyman Demirel University, Isparta/Turkey, for expert cooperation in performing the GC-MS analysis.

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Contribution Rate Statement Summary of Researchers

The author declare that she contributed 100% to the article.

Ethical Approval

The author reports that formal ethics committee approval is not required for this type of study.

Funding

No funding or support was used in this study.

References

Al-Jabri NN., Hossain MA. Comparative chemical composition and antimicrobial activity study of essential oils from two imported lemon fruits samples against pathogenic bacteria. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences 2014; 3: 247-253.

Altaf F., Niazi MB., Jahan Z., Ahmad T., Akram MA., Safdar A., Butt MS., Noor T., Sher F. Synthesis and characterization of PVA/starch hydrogel membranes incorporating essential oils aimed to be used in wound dressing applications. Journal of Polymers and the Environment 2021; 29: 156-174.

Ayaz C. Antibiyotik kombinasyonları. Klimik Dergisi 2001; 14(3): 140-143.

Aydın YA. *Laurus nobilis*, oregano ve cinnamomum zeylanicum uçucu yağları ilaveli antibakteriyel selülozik membranların üretilmesi. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences 2019; 2: 100-106.

Balouiri M., Sadiki M., Ibnsouda SK. Methods for *in vitro* evaluating pharmaceutical analysis; a review. Journal of Pharmaceutical Analysis 2016; 6(2): 71-79.

Baratta MT., Dorman HJD., Deans SG., Figueiredo AC., Barroso JG., Ruberto G. Antimicrobial and antioxidant properties of some commercial essential oils. Flavour and Fragrance Journal 1998; 13: 235–244.

Barla A., Topcu G., Öksuz S., Tumen G., Kingston DGI. Identification of cytotoxic sesquiterpenes from *Laurus nobilis* L. Food Chemistry 2007; 104(4): 1478-1484.

Bennadja S., Tlili-Ait-Kaki Y., Djahoudi A., Hadef Y., Chefrour A. Antibiotic activity of the essential oil of laurel (*L. nobilis* L.) on eight bacterial strains. Journal of Life Sciences 2013; 7(8): 814-819.

Bonapace CR., Bosso JA., Friedrich LV., White RL. Comparison of methods of interpretation of checkerboard synergy testing. Diagnostic Microbiology and Infectious Disease 2002; 44(4): 363-366.

Bounatirou S., Smiti S., Miguel MG., Faleiro L., Rejeb MN., Neffati M., Costa MM., Figueiredo AC., Barroso JG., Pedro LG. Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of the essential oils isolated from Tunisian *Thymus capitus* Hoff. et Link. Food Chemistry 2007; 105: 146-155.

Buldain D., Gortari Castillo L., Marchetti ML., Julca Lozano K., Bandoni A., Mestorino N. Modeling the growth and death of *Staphylococcus aureus* against *Melaleuca armillaris* essential oil at different ph conditions. Antibiotics (Basel) 2021; 10(2): 222.

Burt S. Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods-a review. International Journal of Food Microbiology 2004; 94(3): 223-253.

Celiktas OY., Kocabas EEH., Bedir E., Sukan FV., Ozek T., Baser KHC. Antimicrobial activities of methanol extracts and essential oils of *Rosmarinus officinalis*, depending on location and seasonal variations. Food Chemistry 2007; 100: 553-559.

Chouhan S., Sharma K., Guleria S. Antimicrobial activity of some essential oils-present status and future perspectives. Medicines (Basel) 2017; 4(3): 58.

CLSI. Performance standards for antimicrobial disk susceptibility tests; approved standard-eleventh edition. CLSI document M02-A11. Wayne, PA: Clinical and Laboratory Standards Institute, 2012a.

CLSI. Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically, approved standard, 9th ed., CLSI document M07-A9. Wayne, PA: Clinical and Laboratory Standards Institute, 2012b.

Culos KA., Cannon JP., Grim SA. Alternative agents to vancomycin for the treatment of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* infections. American Journal of Therapeutics 2013; 20(2): 200-212.

Çakıcı N., Demirel Zorba NN., Akçalı A. Food industry employees and staphylococcal food poisonings. The Turkish Bulletin of Hygiene and Experimental Biology 2015; 72(4): 337-350.

Devi KP., Nisha SA., Sakthivel R., Pandian SK. Eugenol (an essential oil of clove) acts as an antibacterial agent against *Salmonella typhi* by disrupting the cellular membrane. Journal of Ethnopharmacology 2010; 130(1): 107-115.

Diaz-Tang G., Meneses EM., Patel K., Mirkin S., García-Diéguez L., Pajon C., Barraza I., Patel V., Ghali H., Tracey AP., Blanar CA., Lopatkin AJ., Smith RP. Growth productivity as a determinant of the inoculum effect for bactericidal antibiotics. Science Advances 2022; 8(50): 1-12.

Farhanghi A., Aliakbarlu J., Tajik H., Mortazavi N., Manafi L., Jalilzadeh-Amin G. Antibacterial interactions of pulegone and 1,8-cineole with monolaurin ornisin against *Staphylococcus aureus*. Food Science & Nutrition 2022; 10(8): 2659-2666.

Figueiredo AC., Barroso JG., Pedro LG., Scheffer JJC. Factors affecting secondary metabolite production in plants: volatile components and essential oils. Flavour and Fragrance Journal 2008; 23(4): 213-226.

Fiorini C., Fouraste I, David B., Bessière JM. Composition of the flower, leaf and stem essential oils from *Laurus nobilis* L. Flavour and Fragrance Journal 1997; 12(2): 91-93.

Gulbandilar A., Beyhan ED., Kısa EI. Investigation of nasal carriage of *Staphylococcus aureus* and meticilin resistance in the Kütahya Health Directorate workers. The Turkish Bulletin of Hygiene and Experimental Biology 2012; 69(3): 155-162.

Hriouech S., Akhmouch AA., Mzabi A., Chefchaou H., Tanghort M., Oumokhtar B., Chami N., Remmal A. The antistaphylococcal activity of amoxicillin/clavulanic acid, gentamicin, and 1,8-cineole alone or in combination and their efficacy through a rabbit model of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* osteomyelitis. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine 2020; 2020(1): 1-9.

Ibrahim RA., Berhe N., Mekuria Z., Seyoum ET., Balada-Llasat JM., Abebe T., Mariam SH., Tsige E., Fentaw Dinku S., Wang SH. Antimicrobial resistance and virulence gene profile of clinical *Staphylococcus aureus*: A multi-center study from Ethiopia. Infection and Drug Resistance 2023; 16: 4835-4844.

Jirovetz L., Buchbauer G., Ngassoum MB. GC/MS-analysis of essential oils from Cameroon plants used as spices in local foodstuff. Recent Research and Development in Agricultural and Food Chemistry 1997; 1: 241-255.

Krysiak ZJ., Kaniuk Ł., Metwally S., Szewczyk PK., Sroczyk EA., Peer P., Lisiecka-Graca P., Bailey RJ., Bilotti E., Stachewicz U. Nano-and microfiber PVB patches as natural oil carriers for atopic skin treatment. ACS Applied Bio Materials 2020; 3(11): 7666-7676.

Kulaksiz B., Er S., Üstündağ-Okur N., Saltan-Işcan G. Investigation of antimicrobial activities of some herbs containing essential oils and their mouthwash formulations. Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences 2018; 15(3): 370-375.

Li X., Dong Q., He P. Synthesis and water absorbency of polyampholytic hydrogels with antibacterial activity. Journal of Applied Polymer Science 2009; 112(1): 439-446.

Maniki E., Kostoglou D., Paterakis N., Nikolaou A., Kourkoutas Y., Papachristoforou A., Giaouris E. Chemical composition, antioxidant, and antibiofilm properties of essential oil from *Thymus capitatus* plants organically cultured on the Greek Island of Lemnos. Molecules 2023; 28(3): 1154.

Marques MB., Brookings ES., Moser SA., Sonke PB., Waites KB. Comparative in vitro antimicrobial susceptibilities of nosocomial isolates of *Acinetobacter baumannii* and synergistic activities of nine antimicrobial combinations. Antimicrobial Agents and Chemotherapy 1997; 41(5): 881-885.

Marzouki H., Piras A., Bel Haj Salah K., Medini H., Pivetta T., Bouzid S., Marongiu B., Falconieri D. Essential oil composition and variability of *Laurus nobilis* L. growing in Tunisia, comparison and chemometric investigation of different plant organs. Natural Product Research 2009; 23(4): 343-354.

Moreira MR., Ponce AG., de Valle CE., Roura SI. Inhibitory parameters of essential oils to reduce a foodborne pathogen. Food Science and Technology 2005; 38(5): 565–570.

Mujawah AAH., Abdallah EM., Alshoumar SA., Alfarraj MI., Alajel SMI., Alharbi AL., Alsalman SA., Alhumaydhi FA. GC-MS and in vitro antibacterial potential of *Cinnamomum camphora* essential oil against some clinical antibiotic-resistant bacterial isolates. European Review for Medical and Pharmacological Sciences 2022; 26(15): 5372-5379.

Nogueira JO., Campolina GA., Batista LR., Alves E., Caetano AR., Brandão RM., Nelson DL., Cardoso MD. Mechanism of action of various terpenes and phenylpropanoids against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. FEMS Microbiology Letters 2021; 368(9): fnab052.

Omidbeygi M., Barzegar M., Hamidi Z., Naghdibadi H. Antifungal activity of thyme, summer savory and clove essential oils against *Aspergillus flavus* in liquid medium and tomato paste. Food Control 2007; 18(12): 1518–1523.

Ouibrahim A., Tlili-Ait-kaki Y., Bennadja S., Amrouni S., Djahoudi AG., Djebar MR. Evaluation of antibacterial activity of *Laurus nobilis* L., *Rosmarinus officinalis* L. and *Ocimum basilicum* L. from Northeast of Algeria. African Journal of Microbiology Research 2013; 7(42): 4968-4973.

Owen L., Laird K. Synchronous application of antibiotics and essential oils: Dual mechanisms of action as a potential solution to antibiotic resistance. Critical Reviews in Microbiology 2018; 44(4): 414-435.

Özcan M., Chalchat JC. Effect of different locations on the chemical composition of essential oils of laurel (*Laurus nobilis* L.) leaves growing wild in Turkey. Journal of Medicinal Food 2005; 8(3): 408-411.

Özcan M., Erkmen O. Antimicrobial activity of the essential oils of Turkish plant spices. European Food Research and Technology 2001; 212: 658-660.

Pala B., Bayram E., Sarı AO., Amount M. Some agrotechnical studies on laurel (*Larus nobilis* L.). IX. Türkiye Field Crops Congress, 12-15 September 2011, Vol. II, pp. 1203-1208, Bursa-Turkey.

Panizzi L., Flamini G., Cioni PL., Morelli I. Composition and antimicrobial properties of essential oils of four Mediterranean Lamiaceae. Journal of Ethnopharmacology 1993; 39(3): 167-170.

Paul M., Lador A., Grozinsky-Glasberg S., Leibovici L. Beta lactam antibiotic monotherapy versus beta lactam-aminoglycoside antibiotic combination therapy for sepsis. The Cochrane Database of Systematic Reviews 2014; 2014(1): CD003344.

Rota C., Carramiñana JJ., Burillo J., Herrera A. In vitro antimicrobial activity of essential oils from aromatic plants against selected foodborne pathogens. Journal of Food Protection 2004; 67(6): 1252–1256.

Saraiva CRN., Nonato CDFA., Camilo CJ., de Araújo ACJ., Rodrigues FFG., Coutinho HDM., da Costa JGM. Chemical profile and inhibition of MDR bacteria by the essential oil of *Laurus nobilis* L. and its major compound 1, 8-cineol. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 2021; 36: 102148.

Schürmann M., Oppel F., Gottschalk M., Büker B., Jantos CA., Knabbe C., Hütten A., Kaltschmidt B., Kaltschmidt C., Sudhoff H. The therapeutic effect of 1,8-cineol on pathogenic bacteria species present in chronic rhinosinusitis. Frontiers in Microbiology 2019; 10: 2325.

Seow YX., Yeo CR., Chung HL., Yuk HG. Plant essential oils as active antimicrobial agents. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 2014; 54(5): 625-644.

Sharifi-Rad J., Sureda A., Tenore GC., Daglia M., Sharifi-Rad M., Valussi M., Tundis R., Sharifi-Rad M., Loizzo MR., Ademiluyi AO., Sharifi-Rad R., Ayatollahi SA., Iriti M. Biological activities of essential oils: from plant chemoecology to traditional healing systems. Molecules 2017; 22(1): 70.

Singh N., Singh RK., Bhunia AK., Stroshine RL. Efficacy of chlorine dioxide, ozone, and thyme essential oil or a sequential washing in killing *Escherichia coli* O157:H7 on lettuce and baby carrots. Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie 2002; 35: 720-729.

Sroczyk EA., Berniak K., Jaszczur M., Stachewicz U. Topical electrospun patches loaded with oil for effective gamma linoleic acid transport and skin hydration towards atopic dermatitis skincare. Chemical Engineering Journal 2022; 429: 132256.

Topçu S., Şeker MG. In vitro antimicrobial effects and inactivation mechanisms of 5,8-dihydroxy-1,4-napthoquinone. Antibiotics (Basel, Switzerland) 2022; 11(11): 1537.

Trombetta D., Castelli F., Sarpietro MG., Venuti V., Cristani M., Daniele C., Saija A., Mazzanti G., Bisignano G. Mechanisms of antibacterial action of three monoterpenes. Antimicrobial Agents and Chemotherapy 2005; 49(6): 2474-2478.

Tsuchido TE., Hiraoka T., Takano M., Shibasaki I. Involvement of autolysin in cellular lysis of *Bacillus subtilis* induced by short-and medium-chain fatty acids. Journal of Bacteriology 1985; 162(1): 42-46.

Verdinan-rizi M. Chemical composition and larvicidal activity of the essential oil of *Laurus nobilis* L. from Iranian. Journal of Pharmaceutical Sciences 2009; 5(1): 47-50.

Yalçın H., Anik M., Sanda MA., Cakir A. Gas chromatography/mass spectrometry analysis of *Laurus nobilis* L. essential oil composition of Northern Cyprus. Journal of Medicinal Food 2007; 10(4): 715-719.

Yáñez Rueda XY., Cuadro Mogollón OFC. Chemical composition and antibacterial activity of the essential oil of *Eucalyptus globulus* and *E. camaldulensis* of three zones of Pamplona (Colombia). Bistua: Revista de la facultad de Ciencias Basicas 2012; 10(1): 52-61.

Yang SK., Yusoff K., Mai CW., Lim WM., Yap WS., Lim SH., Lai KS. Additivity vs. synergism: Investigation of the additive interaction of cinnamon bark oil and meropenem in combinatory therapy. Molecules 2017; 22(11): 1733.

Yap PS., Yiap BC., Ping HC., Lim SH. Essential oils, a new horizon in combating bacterial antibiotic resistance. The Open Microbiology Journal 2014; 8: 6.

Yilmaz MT. Minimum inhibitory and minimum bactericidal concentrations of boron compounds against several bacterial strains. Turkish Journal of Medical Sciences 2012; 42(2): 1423-1429.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2133-2150, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2133-2150, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Araştırılması: Bibliyometrik Analiz

Celal MERDANE[1], Kamil ÇÖLBAY[2], Orhan ENGİN[3*]

[1,2,3]Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

[1]https://orcid.org/0009-0005-1203-9759
[2]https://orcid.org/0009-0001-7834-9179
[3]https://orcid.org/0000-0002-7250-0317
*Sorumlu yazar: oengin@ktun.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 29.01.2025
Kabul tarihi:26.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Çizelgeleme
Esnek akış tipi
Bibliyometrik analiz

ÖZ

Akış tipi çizelgelemenin, en az bir aşamasında, birden fazla makinen yer aldığı problem, Esnek akış tipi olarak isimlendirilmektedir. Bu araştırmada, 1995 yılından günümüze kadar, Esnek akış tipi çizelgeleme problemleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinin son 30 yıldaki gelişimi, bibliyometrik analiz yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Bibliyometrik analiz, bilimsel literatürdeki yayınları, atıfları ve diğer ölçümleri inceleyerek bir alanın gelişimini değerlendirir. Bibliyometrik analizde, "Scopus" veri tabanından "Hybrid flow shop scheduling problems" anahtar kelimesiyle sorgu yapılmış ve analizler R-Studio programında Bibliometrix paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Toplam, 766 belge incelenmiş, bu belgelere toplam 20 620 atıf yapıldığı tespit edilmiştir. Yıllık büyüme oranının %3,73 olduğu hesaplanmıştır. Araştırma sonucunda, Çin, ABD ve Avrupa'daki bilim insanları tarafından bu alanda önemli çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları, Esnek akış tipi çizelgeleme problemleri üzerine yapılan araştırmaların geniş bir coğrafi dağılıma sahip olduğunu ve disiplinler arası bir yaklaşımı teşvik ettiğini ortaya koymuştur.

Investigation of the Hybrid Flowshop Scheduling Problems: Bibliometric Analysis

Research Article

Article History:
Received: 29.01.2025
Accepted: 26.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Scheduling
Hybrid flow shop
Bibliometric analysis

ABSTRACT

The problem with more than one machine is involved in at least one stage of the flow type scheduling is called Hybrid flow type. In this study, an analysis is conducted on literature pertaining to Hybrid flow type scheduling issues since 1995. The determination of the evolution of Hybrid flow type scheduling issues over the past 30 years has been attempted through the utilization of bibliometric analysis. Bibliometric analysis evaluates the development of a field by examining publications, citations and other metrics in scientific literature. In the bibliometric analysis, a query was made from the "Scopus" database with the keyword "Hybrid flow shop scheduling problems" and the analysis was performed using the Bibliometrix package in the R-Studio program. A total of 766 documents were analyzed, and it was determined that 20 620 citations were made to these documents. The annual growth rate was calculated to be 3.73%. The results of the research show that significant work has been done in this area by researchers from China, the United States, and Europe. The findings of this study demonstrate that research on scheduling problems of hybrid flow type exhibits a diverse geographical distribution and encourages an interdisciplinary approach.

To Cite: Merdane C., Çölbay K., Engin O. Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Araştırılması: Bibliyometrik Analiz. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2133-2150.

1. Giriş

Üretim çizelgeleme, müşterilerin ürünlere olan ihtiyaç ve beklentilerinin, sınırlı kaynaklar kullanılarak, istenilen miktar ve zamanda karşılanması amacıyla yapılan üretim planının, iş istasyonları ya da makinelerde uygulanması amacıyla gerçekleştirilen bir optimizasyon süreci olarak tanımlanır (Engin ve ark., 2023; Engin ve Sarıcan, 2024).

Akış tipi, Johnson'un 1954 yılında önerdiği ve iki makine için optimum çözüm veren sezgisel algoritmasından, günümüze kadar en çok popüler olan ve günümüzde en yaygın kullanılan çizelgeleme problemidir (Başar ve Engin, 2024). Akış tipi çizelgelemede, *n* adet iş, *m* adet makinede aynı sıra ile işlem görmektedir (Baysal ve ark., 2021). Akış tipi çizelgeleme problemi, 2 ve özel durumlarda 3 makine hariç iyi bilinen bir NP-zor problemdir (Başar ve ark., 2022).

Esnek Akış Tipi Çizelgeleme (EATÇ) akış tipi ile paralel makine çizelgelemenin özelliklerinin birleştirildiği bir problemdir (Engin ve İşler, 2022). EATÇ, ilk olarak 1971 yılında formüle edilmiş ve 1997 yılından itibaren bu problemlerin çözümü için birçok sezgisel ve metasezgisel yöntem önerilmiştir (Vidojević ve ark., 2025). EATÇ problemi, *i* adet iş *(i=1,…,n) a* adet aşama ve her bir aşamasında *k (k=1,…,a)* olan, m_k adet özdeş paralel makineden oluşmaktadır. Her bir iş önce birinci aşamada, sonra ikinci aşamada ve en son da *a.* aşamada işlem görmektedir (Engin ve Yılmaz, 2021). EATÇ problemleri, NP-zor olduğundan çözümü için 1980'li yıllardan günümüze kadar birçok sezgisel ve meta sezgisel yöntemler önerilmiştir (Engin ve ark., 2018). Bu yöntemlerden bir kısmı Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. EATÇ problemlerinin metasezgisel yöntemlerle çözümü: Literatür araştırması

Yazar (lar)	Kullanılan Metasezgisel Yöntem
Engin ve Döyen (2004)	Yapay bağışıklık sistemi
Tang ve ark. (2005)	Sinir ağları modeli
Alaykıran ve ark. (2007)	Karınca kolonileri
Kahraman ve ark. (2008)	Genetik Algoritma
Liao ve ark. (2012)	Parçacık sürü optimizasyonu
Marichelvam ve ark. (2014)	Guguk kuşu arama algoritması
Cui ve Gu (2015)	Yapay arı kolonileri
Akkoyunlu ve ark. (2015)	Harmoni arama algoritması
Bozorgirad ve ark. (2016)	Popülasyon tabanlı lokal arama
Zhang ve ark. (2017)	Değiştirilmiş göçmen kuş optimizasyonu
Zhou ve ark. (2018)	Diferansiyel evrim algoritması
Fan ve ark. (2019)	Mutant ateş böceği algoritması
Yu ve ark. (2020)	Evrimsel algoritmalar
Zhang ve ark. (2021)	Ayrık bir balina sürüsü algoritması
Qin ve ark. (2022)	Yinelemeli açgözlü algoritma
Li ve ark. (2023)	Guguk kuşu arama algoritması
Hajji (2024)	Tavlama Benzetimi
Li ve ark. (2025)	Eş evrimsel algoritma
Ullah ve ark. (2025)	Açgözlü öğretim-öğrenme tabanlı algoritma
Wang ve ark. (2025)	Dinamik yapay arı koloni algoritması

Tablo 1'de görüldüğü gibi EATÇ problemlerinin çözümünde, sürü tabanlı, popülasyon tabanlı birçok metasezgisel yöntem kullanılmıştır. Özellikle 2025 yılında yapılan araştırmalarda, EATÇ problemleri, Endüstri 4.0 süreci de dikkate alınarak, enerji tasarruflu, robotik taşımalı v.d. kısıtlı olarak analiz edilmiştir. Bu problemlerin çözümü için öğrenme tabanlı metasezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

Esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinin bir diğer özel hali de çok işlemcili esnek akış tipi çizelgelemedir. Esnek akış tipi çizelgeleme probleminde herhangi bir aşamada birden fazla işlemci yer almaktadır. Çok işlemcili esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde de son yıllarda metasezgisel yöntemler başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Engin ve Engin, 2018; Engin ve Engin, 2020; Engin ve Yılmaz, 2022).

Esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinde işlem süreleri, teslim tarihlerinin deterministik olduğu ve önceden bilindiği varsayılmaktadır. Son on beş yılda işlem süreleri ve teslim tarihlerin, gerçek atölye ortamında tam olarak bilinemediği bu sürelerin bulanık olduğu değerlendirilmekte ve bulanık işlem ve teslim süreli Esnek akış tipi çizelgeleme problemleri metasezgisel yöntemlerle çözülmektedir (Engin ve İşler, 2022; Engin ve Yılmaz, 2022; İşler ve Engin, 2022).

Bu araştırmada, literatürde ilk defa, parametreleri deterministik olan, Esnek akış tipi çizelgeleme problemleri ile ilgili son otuz yılda yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Bibliyometrik analiz yardımı ile son otuz yılda EATÇ konusunda yapılan araştırmaların yıllık büyüme oranı, etkili olan yazar ve ülkeler, gelecekteki eğilimler belirlenmiştir.

Araştırmanın ikinci bölümünde EATÇ problemlerinin matematiksel modeli açıklanmıştır. Üçüncü bölümde bibliyometrik analiz sonuçları verilmiştir. Dördüncü bölümde, elde edilen bulgular ve gelecekteki çalışmalar sunulmuştur.

2. Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemi

Esnek akış tipi çizelgeleme probleminin matematiksel modeli, bir karma tam sayılı programlama modeli olarak tanımlanır. Model aşağıda sunulmuştur (Kahraman ve ark., 2008).

Model Parametreleri

I: Çizelgelenecek işlerin kümesi, $|I| = n$,

A: Tüm işlerin işlem göreceği aşamalar kümesi, $|A| = a$,

i: i İşini temsil eden alt simge,

a: a Aşamasını temsil eden alt simge,

j: j Makinesini temsil eden alt simge,

m_a: a Aşamasındaki makine sayısı; $\forall a, a \in A$

M: Çok büyük pozitif bir sayı

b_{ia}: a Aşamasındaki i işinin başlangıç zamanı; $\forall i, i \in I, \forall a, a \in A$,

$$x_{iaj} = \begin{cases} 1, a\ aşamasındaki\ i\ işi\ j\ makinesindeyse \\ 0, \quad diğer \end{cases}; \quad \forall i, i \in I, \forall a, a \in A, j = 1, \dots, m_a \tag{1}$$

$$y_{uvaj} = \begin{cases} 1, a\ aşamasındaki\ u\ işi\ v\ işinden\ önce \\ \quad j\ makinesindeyse. \\ 0,\ \ diğer \end{cases} ; \quad \forall i, i \in I, \forall a, a \in A, j = 1, \dots, m_a \tag{2}$$

p_{ia}: a Aşamasındaki i işinin işlem zamanı; $\forall i, i \in I, \forall a, a \in A$

Amaç Fonksiyonu

Min Q

Kısıtlar

$$b_{is} + p_{is} \leq Q;\ \forall i \tag{3}$$

$$b_{ia} + p_{ia} \leq b_{i,a+1};\ \forall i, a, a \neq s \tag{4}$$

$$b_{ua} + p_{ua} \leq b_{va} + M(1 - y_{uvaj});\ \forall a, j, u, v, u \neq v \tag{5}$$

$$y_{uvaj} + y_{vuaj} \leq 1;\ \forall a, j, u, v, u \neq v \tag{3}$$

$$x_{uaj} + x_{vaj} \leq 1 + y_{uvaj} + y_{vuaj};\ \forall a, j, u, v, u \neq v \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{m_a} x_{iaj} = 1\ ;\ \forall j, l \tag{5}$$

$$b_{ia} \geq 0;\ \forall j, l \tag{6}$$

$$x_{iaj}, y_{uvaj} \in \{0,1\} \tag{7}$$

Kısıt (3), a aşamasındaki son işin tamamlanma zamanını Q olduğunu ifade eder. Kısıt (4), i işinin a aşamasındaki i işi tamamlanmadan $a + 1$ aşamasında işlenmesinin mümkün olmadığını ifade eder. Kısıt (5), (6) ve (7); a aşamasındaki ve j makinesinde u ve v işlerinin iş sırasını göstermektedir. Bu kısıtlar, bir makinede herhangi bir zamanda birden fazla işin işlenmesine izin vermez. Kısıt (8), herhangi bir işin aynı anda birden fazla makinede işlenmesine izin vermez. Kısıt (9) ve kısıt (10) değişken kısıtlarıdır.

3. Bibliyometrik Analiz

EATÇ problemleri üzerine yapılan çalışmalar hem teorik modellemelere hem de gerçek dünya uygulamalarına yönelmektedir. Bu kapsamda, bu alandaki araştırma eğilimlerini anlamak ve gelecekteki çalışmalara yön verecek temel çıktılar elde etmek amacıyla, bibliyometrik analiz yöntemi giderek daha

fazla önem kazanmaktadır (Yiğit ve Engin, 2025). Bibliyometrik analiz, belirli bir araştırma alanındaki yayınların özelliklerini, yazarların iş birliklerini ve kullanılan yöntemleri inceleyerek, alandaki araştırma yoğunluğu ve eğilimleri hakkında kapsamlı bilgi sunan güçlü bir araçtır.

3.1. Metodoloji

Bu bibliyometrik analizde, "Scopus" veri tabanından ve "RStudio" yazılımından yararlanılmıştır. "Scopus", bilimsel literatürün geniş bir yelpazesini kapsayan, atıf ve dergi indeksleme veri tabanıdır. Araştırmacılar, bu platformu kullanarak EATÇ ile ilgili makalelere erişim sağlamış, makalelerin atıf sayısını ve diğer bibliyometrik verilerini analiz etmiştir. "Scopus", araştırma eğilimlerini ve belirli konulardaki literatürün kapsamını anlamak için önemli bir kaynak sağlamaktadır.

"RStudio", istatistiksel analiz ve veri görselleştirme için kullanılan bir yazılımdır. Bu analizde, "RStudio" kullanılarak veriler işlenmiş ve çeşitli grafikler oluşturulmuştur. "RStudio", verilerin analizini kolaylaştıran güçlü bir araçtır ve araştırmanın görsel yönlerini daha etkili bir şekilde sunmaya yardımcı olmuştur.

3.2. Bulgular

Bu çalışmada "Scopus" veri tabanı kullanılarak "Hybrid flow shop scheduling problems" anahtar kelimesiyle sorgu yapılmıştır. "Scopus"'un tercih edilme nedeni, geniş veri kapsamı sunması ve bilimsel literatürdeki güvenilirliği ile farklı disiplinlerdeki makalelere erişim sağlamasıdır. Bu sayede, EATÇ alanındaki literatür kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Analizler "RStudio" programında "Bibliometrix" paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. "Bibliometrix", özellikle bibliyometrik analizler için geliştirilmiş bir araç olup, verilerin istatistiksel olarak detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. "RStudio""nun geniş veri işleme ve görselleştirme yetenekleri sayesinde, çalışmanın kapsamı hakkında derinlemesine analizler yapılmıştır. EATÇ alanındaki ana bilgiler, Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. EATÇ ile ilgili ana bilgiler

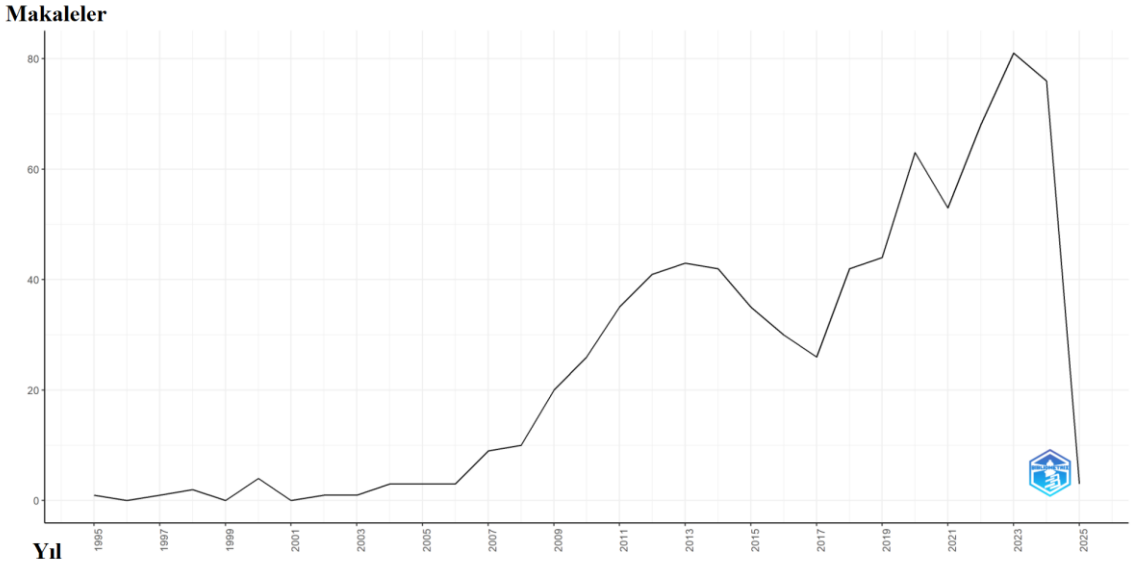
Kategori	**Değer**
Zaman Aralığı	1995-2024
Kaynaklar	304
Çalışmalar	766
Yıllık Büyüme Oranı	%3,73
Yazarlar	1262
Tek Yazarları Çalışmaların Yazarları	31
Uluslararası Ortak Yazarlık	%13,45
Belge Başına Ortak Yazar	3,38
Atıf Sayısı	20620
Ortalama Belge Yaşı	6,62
Belge Başına Ortalama Alıntı	23,68

Tablo 2'de araştırmanın kapsadığı süre, 1995-2024 yılları arasında belirlenmiştir. Bu süreçte toplamda 304 kaynak ve 766 belge bulunmaktadır. Ayrıca, 1.262 yazarın katkısı ile tek yazarlı belgelerin sayısı

31 olarak belirtilmiştir. Uluslararası iş birliği oranı, %13,45 olup, bu oran, alanın küresel bir çalışma alanı olduğunu göstermektedir. Diğer önemli bilgiler arasında, belgelerin ortalama yaşı 6,62 yıl ve belge başına ortalama alıntı sayısı 23,68'dir.

3.3. Tartışma

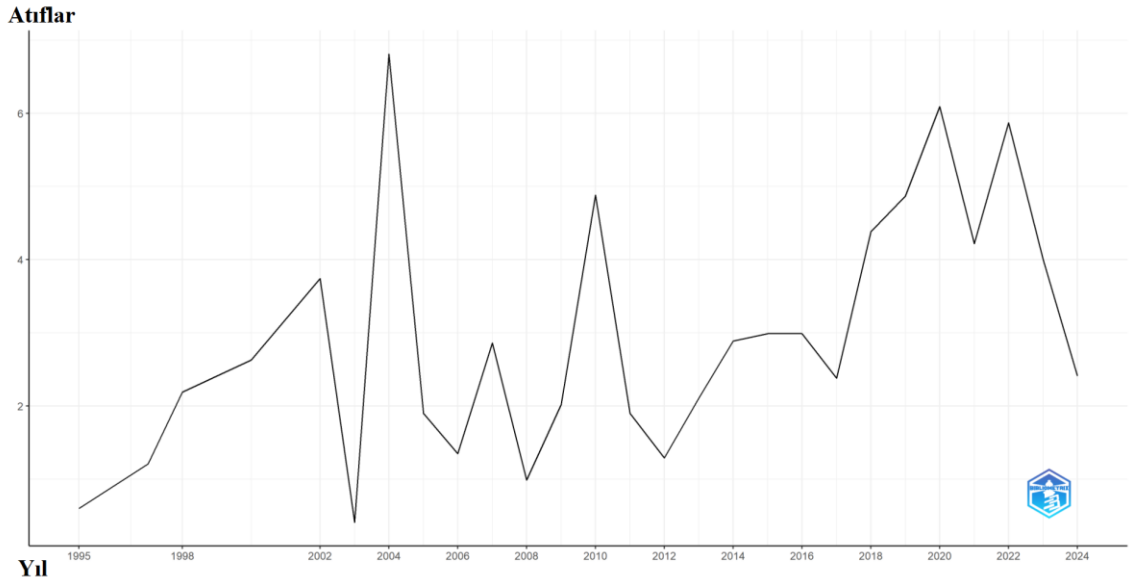
Bibliyometrik analiz ile elde edilen veriler, alandaki literatürün zaman içinde nasıl evrildiğini ve hangi çalışmaların daha fazla dikkat çektiğini anlamak için değerlidir. Şekil 1'de, EATÇ alanındaki yıllık bilimsel üretim gösterilmiştir. Bu grafik, yayın sayısındaki önemli değişiklikleri vurgulamak amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 1. Yıllık Bilimsel Üretim

Şekil 1'de, 1995-2024 yılları arasında EATÇ üzerine yapılan makalelerin yıllara göre dağılımı görülmektedir. 2007 yılından itibaren makale sayısında belirgin bir artış yaşanmıştır, bu da EATÇ araştırmalarına olan ilginin bu dönemde arttığını göstermektedir. Özellikle 2013-2019 yılları arasında yüksek bir üretim seviyesi gözlemlenirken, 2020 yılından sonra makale sayısında sürekli bir artış gözlemlenmektedir. Bu durum, EATÇ alanındaki araştırma trendlerinin gelişmeye devam ettiğini göstermektedir.

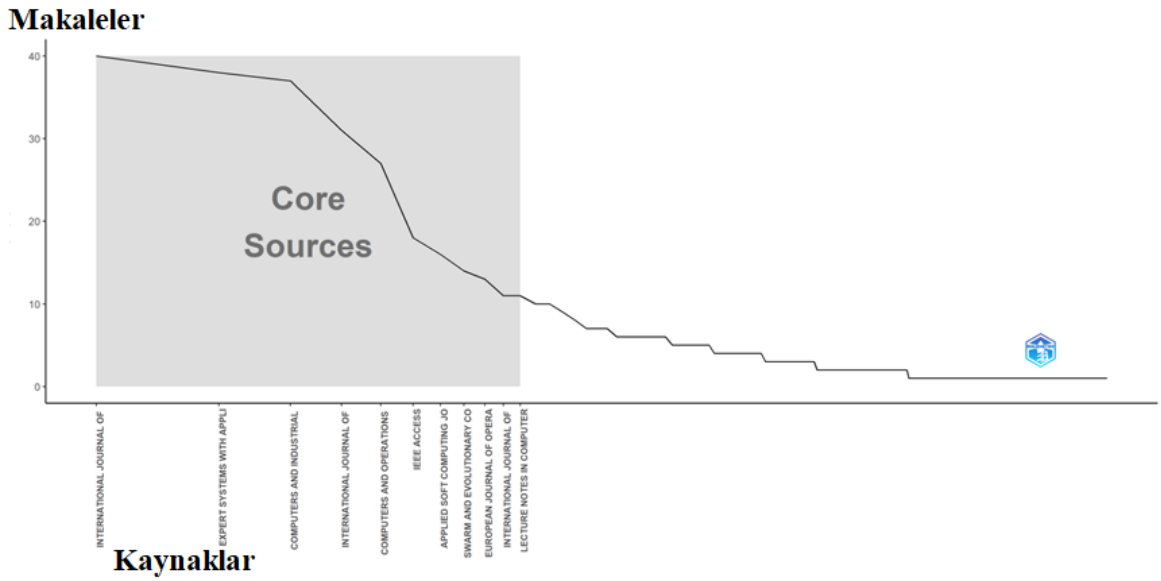
Şekil 2'de, EATÇ alanındaki makalelerin yıllık ortalama atıf sayısı gösterilmiştir.



Şekil 2. Yıllık ortalama atıf sayısı

Şekil 2'de, yıllık ortalama atıf sayısının, 1995'ten itibaren dalgalı bir seyir izlediği görülmektedir. 2004 ve 2010 yıllarında önemli zirveler vardır. Bu durum, bu yıllarda yapılan çalışmaların dikkat çektiğini göstermektedir. Atıf sayısı zamanla oluşan bir birikim olduğundan, özellikle 2021 sonrası çalışmaların atıflarının her geçen yıl artması beklenmektedir. 2023 yılındaki çalışmaların aldığı ortalama atıf sayısı, yalnızca 1 yıl geçmiş olmasına rağmen, zirve noktası olarak belirtilen, 2010 yılının biraz altında kalmıştır. Bu durum, yeni yapılan çalışmaların ilerleyen yıllarda daha fazla atıf alabileceğini ve atıf sayılarının zamanla artma eğiliminde olduğunu göstermektedir.

Şekil 3'te, EATÇ alanında en fazla makale yayınlayan dergiler ifade edilmiştir. Bu grafik, en önemli kaynakları belirlemektedir.

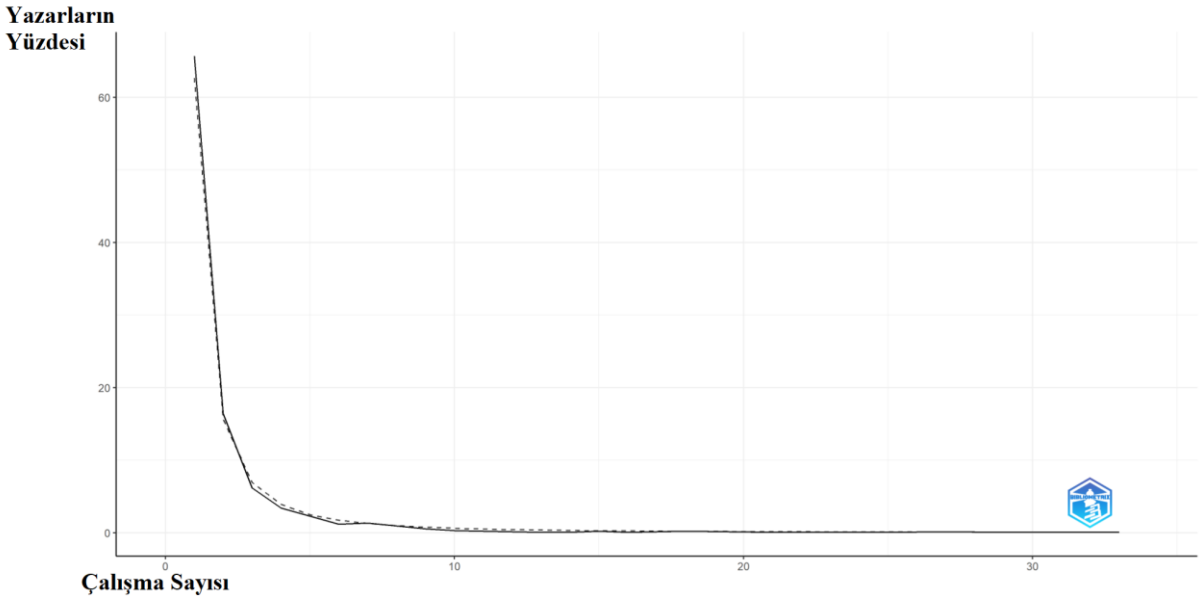


Şekil 3. Bradford kuralına göre çekirdek kaynaklar

Şekil 3, Bradford kuralına göre çekirdek dergileri göstermektedir. Bradford kuralı, dergilerin üretkenliğini ifade eder. Buna göre dergiler, içerdikleri yayın sayısına göre sıralanırlar. Bradford kuralına göre dergiler, makale sayısına göre üç gruba ayrılırlar. Her gruptaki dergi sayısı, 1: n: n^2 ile orantılıdır. En üretken dergiler, çekirdek grupta yer alır. Diğer gruplarda dergi sayısı artarken, yayın sayısı çekirdek grupla aynı kalır. Diğer bir ifade ile diğer gruplarda üretkenlik düşer (Güler, 2023).

Şekil 3'te koyu gri alan, en çok makale yayınlayan dergileri temsil etmektedir. Bu dergiler arasında "International Journal of Production Research "Expert Systems with Applications" ve "Computers and Industrial Engineering" gibi önemli kaynaklar var. Diğer dergiler ise daha az makale yayınlayarak bu alana katkıda bulunmaktadır.

Şekil 4'te, yazarların üretkenliğine yer verilmiştir.

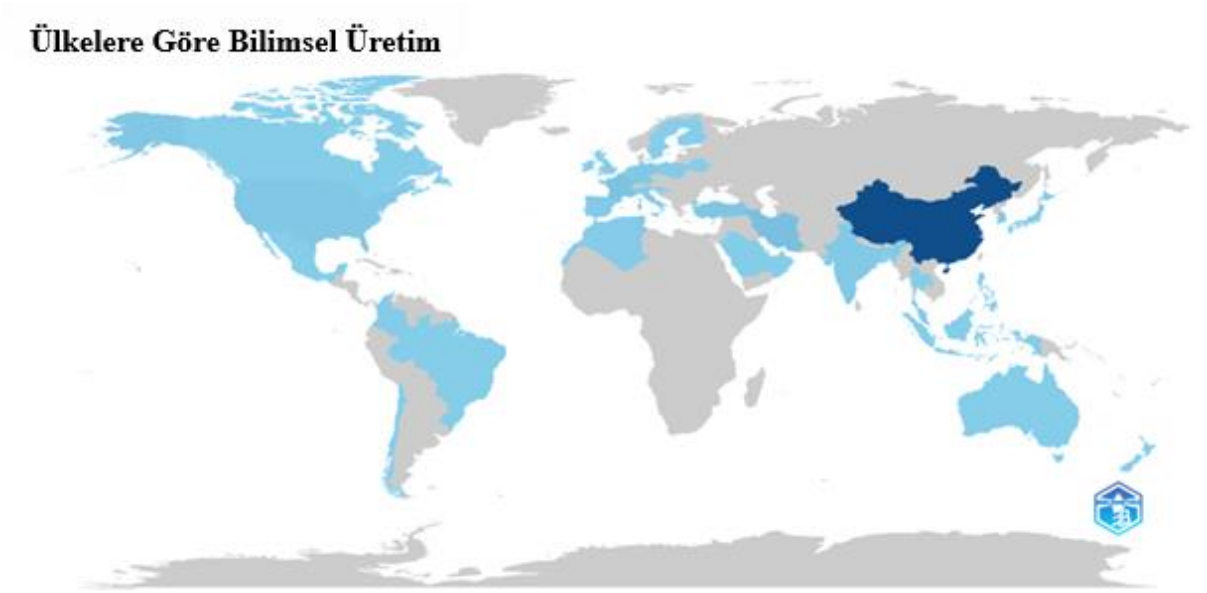


Şekil 4. Lotka yasasına göre yazar üretkenliği

Şekil 4'te yazarların lotka yasasına göre üretkenliği görselleştirilmiştir. Lotka yasası, belirli bir alanda eser üreten yazarların, belirli bir zaman diliminde, literatüre katkılarının niceliksel dağılımını gösterir. Lotka yasası ile bilimsel verimlilik süreci tahmin edilmeye çalışılır.

Şekil 4'te, yazarların çoğu (yaklaşık %60-70) yalnızca 1 veya 2 makale yayımlamıştır. Az sayıda yazar ise 10 veya daha fazla makale yayımlayarak önemli katkılar sağlamıştır. Bu durum, EATÇ alanında belirli yazarların etkili olduğunu göstermektedir.

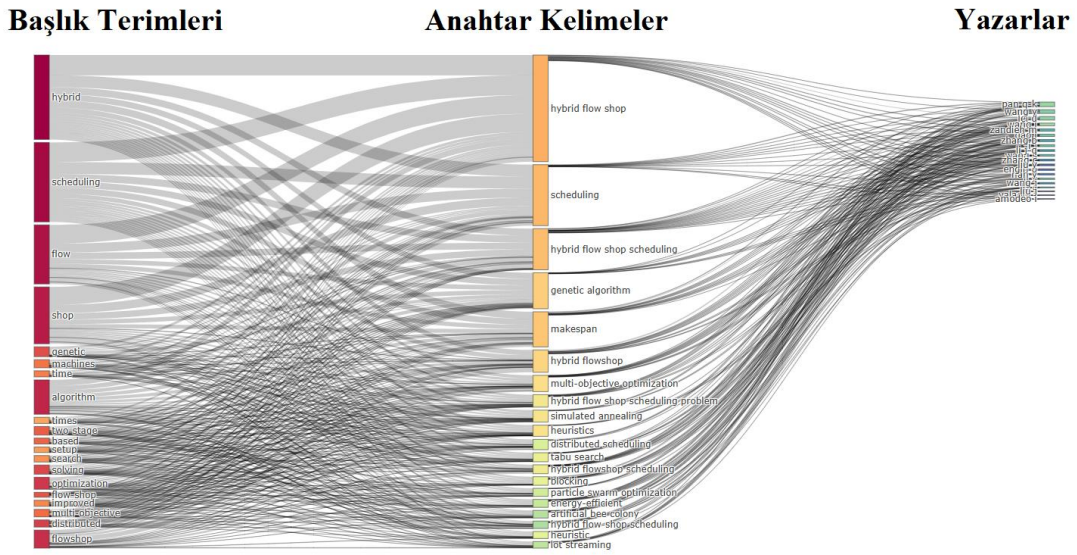
Şekil 5'teki harita, EATÇ alanındaki bilimsel üretimin, hangi ülkelerde yoğunlaştığını göstermektedir.



Şekil 5. Ülkelerin bilimsel üretimi

Şekil 5'te koyu mavi ile gösterilen alan, en yüksek bilimsel üretimi temsil etmektedir. Özellikle Çin, bu alandaki en fazla makaleyi üreten ülke olarak dikkat çekmektedir. Diğer Asya ülkeleri de önemli ama daha düşük bir üretim seviyesine sahiptir. Avrupa ve Amerika'nın bazı bölgeleri ise daha az bilimsel üretim gözlemlenmektedir.

Şekil 6'da EATÇ alanındaki anahtar kelimeler, konular ve yazarlar arasındaki ilişkileri gösteren Üç Alan Grafiği yer almaktadır.



Şekil 6. 3 Alan grafiği

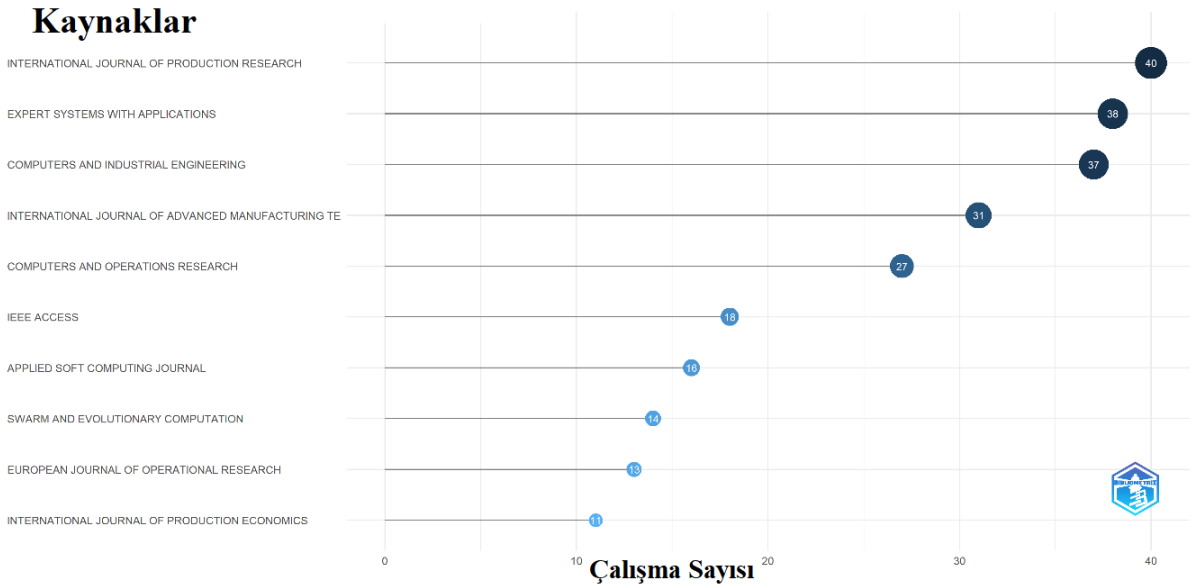
Şekil 6'daki Grafik, üç ana bilgi alanı arasında ilişki kurarak, literatürdeki yaygın kavramları ve bu kavramlarla ilişkilendirilen yazarları göstermektedir. Alanlar aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

- *Sol sütun (TI_TM):* Makale başlıklarında en çok geçen terimleri ifade etmektedir. En çok tekrar eden başlık kelimeleri arasında "hybrid", "scheduling", "flow", "shop" ve "genetic" gibi terimler öne çıkmaktadır. Bu, çalışmaların büyük çoğunluğunun hibrit akış tipi çizelgeleme problemleri üzerine yoğunlaştığını göstermektedir.
- *Orta sütun (DE):* Yazarların belirttiği anahtar kelimeleri göstermektedir. Bu sütunda öne çıkan terimler arasında "hybrid flow shop", "scheduling", "hybrid flow shop scheduling", "genetic algorithm", "makespan", "multi-objective optimization", "heuristics", "simulated annealing" gibi kavramlar yer almaktadır. Bu da araştırmalarda hem klasik hem de sezgisel (heuristic) ve meta-sezgisel (metaheuristic) yöntemlerin sıkça kullanıldığını gösterir.
- *Sağ sütun (AU):* Yazar adlarını göstermektedir. En çok katkı sağlayan yazarlar arasında *Pang, Wang, Zandieh, Zhang, Ruiz, Amodeo* gibi isimler öne çıkmaktadır. Bu yazarlar alanda en fazla yayın yapmış veya sıkça atıf almış araştırmacılardır.

Şekil 6'da veril grafikte yer alan çizgiler, başlık terimleri ile anahtar kelimeler ve bunların yazarlarla olan bağlantılarını temsil etmektedir. Örneğin, "hybrid" başlık terimi "hybrid flow shop" anahtar kelimesiyle ve bu konularda çalışan birçok yazarla bağlantılıdır. Aynı şekilde "genetic algorithm" anahtar kelimesi de birden fazla başlıkla ve yazarla bağlantılıdır.

Şekil 6'daki grafik sayesinde araştırma alanında hangi konuların öne çıktığı, hangi anahtar kelimelerle çalışıldığı ve bu çalışmalarda hangi yazarların aktif olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Bu da literatürdeki eğilimleri, odak noktalarını ve iş birliklerini belirlemek açısından oldukça değerlidir.

Şekil 7'de, EATÇ alanındaki en önemli dergiler ve bu dergilerde yayınlanan makale sayısı gösterilmiştir.

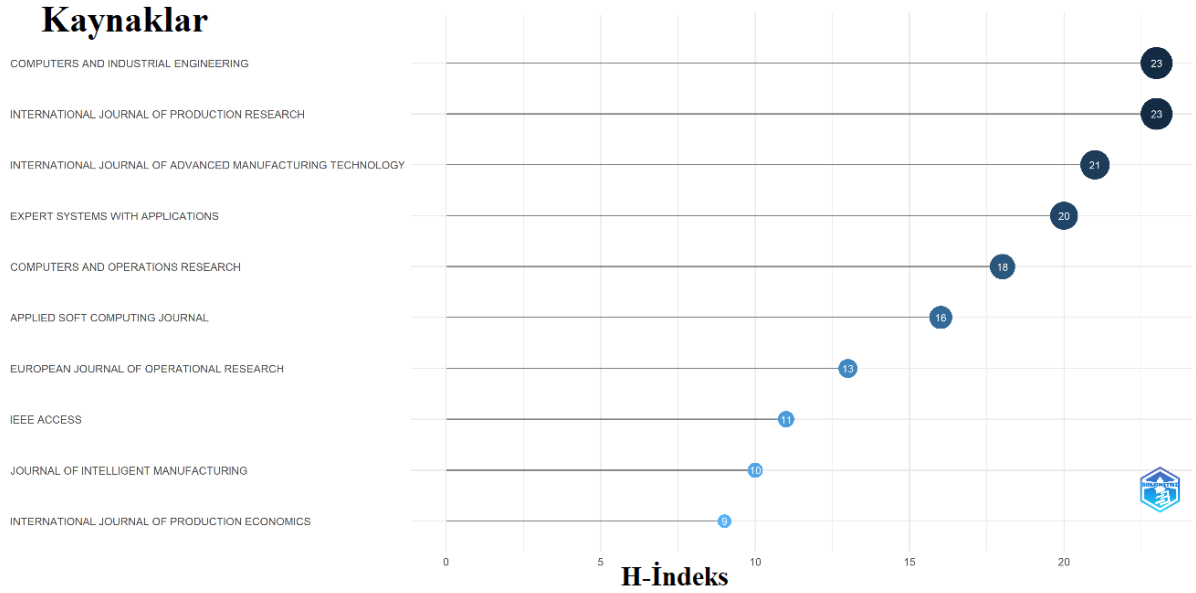


Şekil 7. En alakalı kaynaklar

Şekil 7'de, öne çıkan dergiler arasında "*International Journal of Production Research*", "*Expert Systems with Applications*", ve "*Computers and Industrial Engineering*" gibi önemli kaynaklar yer almaktadır.

Bunlar, EATÇ konusundaki en fazla makaleyi yayımlayan dergiler olarak dikkat çekmektedir. Dergilerin yanında bulunan sayılar, her bir dergide kaç makalenin yayınlandığını göstermektedir. Örneğin, "*International Journal of Production Research*" dergisinde 40 makale bulunurken, "*Expert Systems with Applications*" dergisinde 38 makale vardır. Bu, bu dergilerin ilgili alandaki literatüre sağladığı katkıyı vurgulamaktadır.

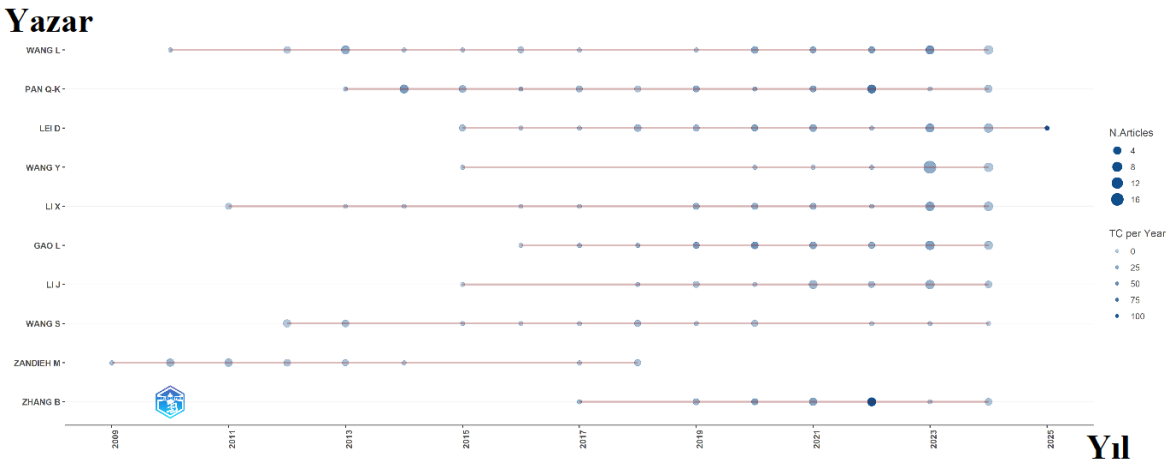
Şekil 8, EATÇ alanındaki dergilerin, yerel etkisini *H-indeksi (H-index)* ölçütüne göre sıralamalarını göstermektedir.



Şekil 8. Kaynakların H indekse göre yerel etkisi

Şekil 8'de, dergilerin yanında yer alan sayılar, her bir dergide kaç makalenin yayınlandığını ve H-indeksine göre etki ölçüsünü göstermektedir. Örneğin, "*Computers and Industrial Engineering*" dergisi 23 H-indeksine sahipken, "*International Journal of Production Research*" da aynı H-indeksi değeri olan 23 ile dikkat çekmektedir. Diğer önemli dergiler arasında "*Expert Systems with Applications*", "IEEE Access" ve "*Applied Soft Computing Journal*" yer almaktadır.

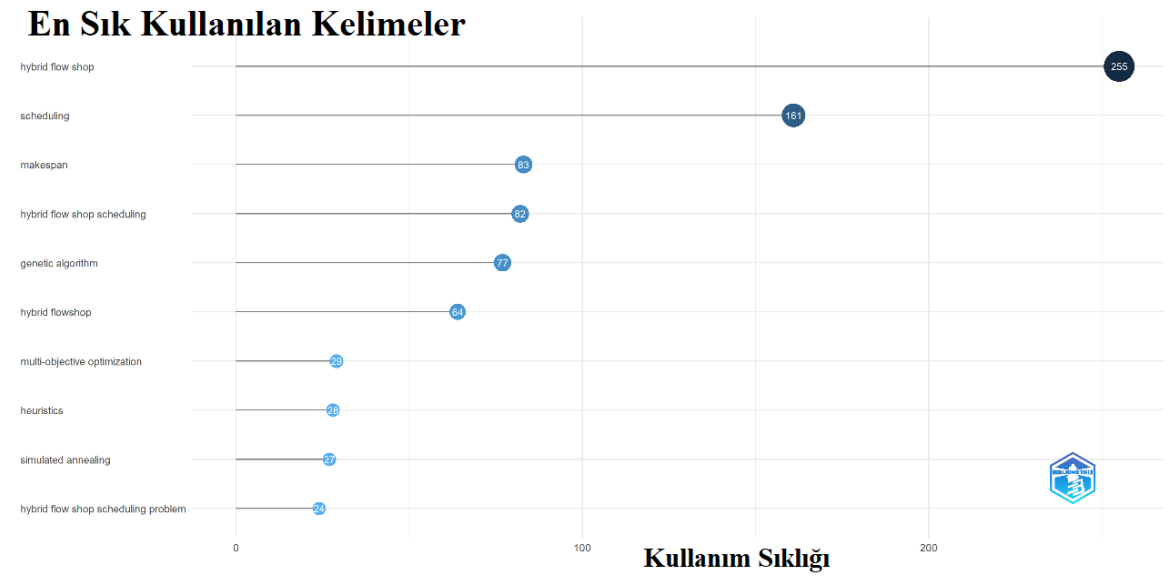
Şekil 9'da EATÇ alanındaki yazarların zaman içindeki üretimleri ifade edilmiştir.



Şekil 9. Yazarların zamana göre üretimi

Şekil 9'da farklı renklerdeki çizgiler, belirli yazarların yıllık makale sayılarını temsil etmektedir. Her bir nokta, o yıl içinde yazarın yayınladığı makale sayısını göstermektedir. Örneğin, Wang L., Pan Q-K., ve Zandieh M. gibi yazarların zaman içinde daha fazla makale yayımladığı gözlemlenmektedir. Grafikteki çizgilerin yükseldiği yıllar, bu yazarların o yıllarda daha fazla çalışma yaptığını göstermektedir. Bu yıllarda EATÇ konusuna olan ilginin arttığını ve bu yazarların aktif olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 10'da EATÇ alanındaki en sık kullanılan kelimelere ve bu kelimelerin kaç kez geçtiğine yer verilmiştir.



Şekil 10. En alakalı kelimeler

Şekil 10'da yer alan kelimeler arasında *'hybrid flow shop'*, *'scheduling'*, 'makespan' ve 'genetic algorithm' gibi önemli terimler bulunmaktadır. Bu terimlerin yanındaki sayılar, her bir kelimenin toplam kaç kez kullanıldığını göstermektedir. Örneğin, *'hybrid flow shop'* terimi 255 kez kullanılırken, '*scheduling*' 161 kez kullanılmıştır.

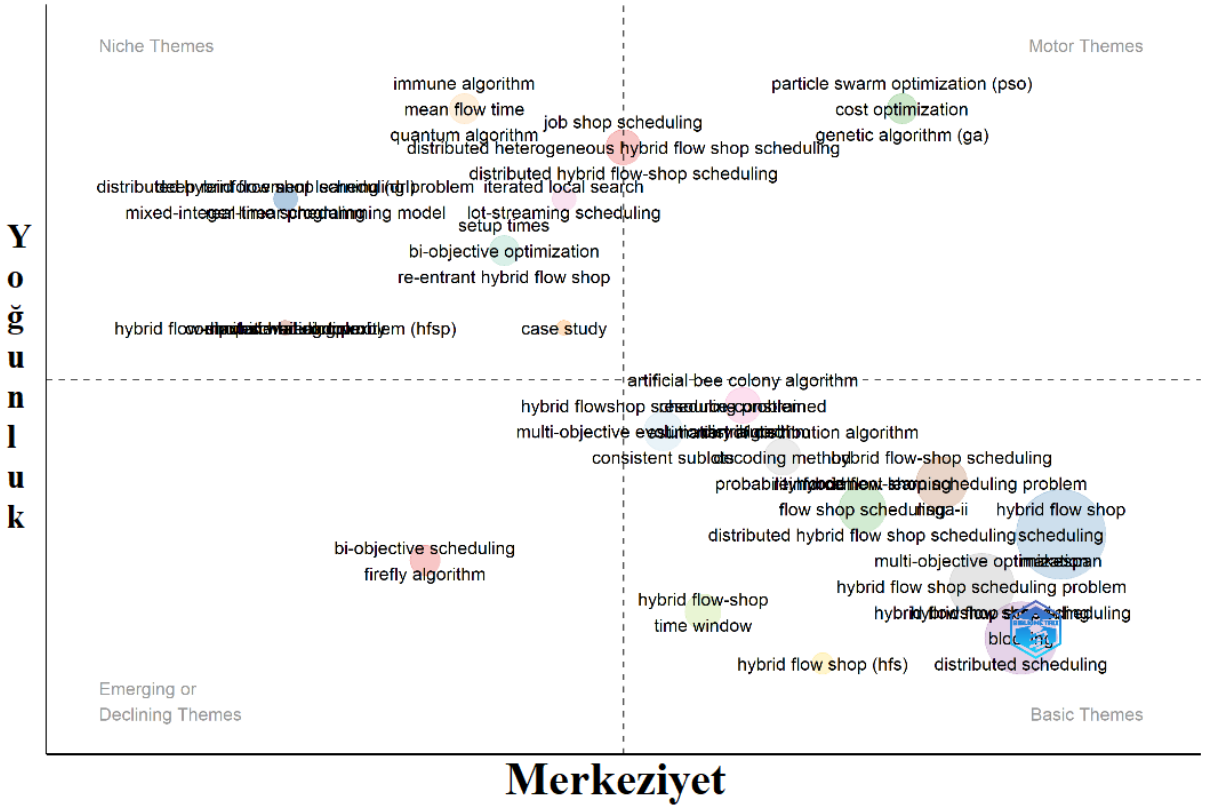
Şekil 11, EATÇ alanında en sık kullanılan kelimeleri görselleştiren bir kelime bulutunu göstermektedir.



Şekil 11. Kelime bulutu

Şekil 11'deki bulutta yer alan kelimelerin büyüklüğü, o kelimenin ne kadar sık kullanıldığını göstermektedir. Örneğin, *'hybrid flow shop'*, '*scheduling*' ve *'machine shop practice*' gibi terimler, bu alanda en fazla kullanılan kavramlar arasında yer almaktadır. Bu da bu terimlerin araştırmalarda ne kadar önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Şekil 12'de, EATÇ alanındaki temaların evrimi gösterilmektedir.



Şekil 12. Tematik evrim haritası

Şekil 12'de yer alan farklı renklerdeki alanlar, farklı temaları temsil etmektedir. Temaların büyüklüğü, o konunun ne kadar sıklıkla araştırıldığını göstermektedir. Örneğin, *'hybrid flow shop scheduling'* teması, zaman içinde belirgin bir artış göstermiş ve araştırmalarda önemli bir yer edinmiştir. Eksenler, temaların merkeziyetini (yatay eksen) ve gelişim düzeyini (dikey eksen) göstermektedir. Temaların konumları, o temanın araştırmalardaki önem derecesini ve gelişim aşamasını yansıtır. Örneğin, yukarıda ve sağda bulunan temalar hem yoğun hem de merkezi olan temalardır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, esnek akış tipi çizelgeleme problemleri üzerine yapılan araştırmaların bibliyometrik analizi gerçekleştirilmiştir. Esnek akış tipi çizelgeleme problemleri, üretim sistemlerindeki karmaşıklıkları ve gerçek dünya koşullarını daha iyi temsil eden yapısıyla literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Bibliyometrik analiz yöntemiyle bu alandaki literatürün temel özellikleri, araştırma eğilimleri ve kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, esnek akış tipi çizelgeleme problemleri üzerine yapılan çalışmaların özellikle 2000'li yıllardan itibaren hız kazandığı ve yapay zekâ ile meta-sezgisel algoritmaların bu alandaki çözümler için vazgeçilmez hale geldiği görülmüştür. Optimizasyon yöntemlerinin, artan veri miktarı ve teknolojik ilerlemelerle birlikte daha karmaşık problemlerde başarıyla uygulandığı tespit edilmiştir.

"*Scopus*" veri tabanından elde edilen veriler, bu alanda yayın yapan ülkeler, önde gelen araştırmacılar, en etkili dergiler ve kullanılan yöntemler hakkında kapsamlı bilgi sağlamıştır. Özellikle Çin, ABD ve

Avrupa ülkelerinin bu alanda önemli bilimsel üretim yaptığı görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, esnek akış tipi çizelgeleme problemleri üzerine yapılan araştırmaların geniş bir coğrafi dağılıma sahip olduğunu ve disiplinler arası bir yaklaşımı teşvik ettiğini ortaya koymuştur.

Bu araştırma, literatürdeki eğilimlerin görselleştirilmesi ve bu alanda yapılacak yeni çalışmalara rehberlik etmesi açısından önemlidir. Esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümüne yönelik yeni yöntemlerin geliştirilmesi ve mevcut tekniklerin iyileştirilmesi için gelecekteki çalışmalara ışık tutmaktadır. Elde edilen bulgular, araştırmacılara potansiyel araştırma alanları ve odaklanılması gereken konular hakkında bilgi sunmaktadır.

Sonuç olarak, esnek akış tipi çizelgeleme problemleri üzerine yapılan bu bibliyometrik analiz hem teorik hem de uygulamalı araştırmalar için yol gösterici olma potansiyeline sahiptir.

Gelecekteki çalışmalarda, Endüstri 4.0 sürecinde, EATÇ problemleri için, gerçek atölye ortamındaki kısıtlar dikkate alınarak, öğrenme tabanlı algoritmalarla çözümler elde edilmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Akkoyunlu MC., Engin O., Büyüközkan K. A harmony search algorithm for hybrid flow shop scheduling with multiprocessor task problems. Proceedings of the 6th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO), 27-29 Mayıs 2015, 1-3., İstanbul. DOI:10.1109/ICMSAO.2015.7152245

Alaykıran K., Engin O., Döyen A. Using ant colony optimization to solve hybrid flow shop scheduling problems. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2007; 35: 541-550. https://doi.org/10.1007/s00170-007-1048-2

Başar R., Büyüközkan K., Engin O. Distributed no-wait flow shop with fuzzy environment. In: Kahraman C., Tolga AC., Cevik Onar S., Cebi S., Oztaysi B., Sari IU. (eds) Intelligent and Fuzzy Systems. INFUS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 504. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09173-5_35

Başar R., Engin O. A hybrid scatter search method for solving fuzzy no-wait flow-shop scheduling problems. Engineering Optimization 2024; 1-34. https://doi.org/10.1080/0305215X.2024.2367600

Baysal ME., Sarucan A., Büyüközkan K., Engin O. Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective distributed fuzzy permutation flow shop problem. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems 2021; 42(1): 439-449. https://doi.org/10.3233/JIFS-219202

Bozorgirad MA., Logendran R. A comparison of local search algorithms with population-based algorithms in hybrid flow shop scheduling problems with realistic characteristics. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2016; 83: 1135-1151.

Cui Z., Gu X. An improved discrete artificial bee colony algorithm to minimize the makespan on hybrid flow shop problems. Neurocomputing 2015; 148: 248-259. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.07.056

Engin BE., Engin O. A new memetic global and local search algorithm for solving hybrid flow shop with multiprocessor task scheduling problem. SN Applied Sciences 2020; 2: 2059.

Engin O., Döyen A. A new approach to solve hybrid flow shop scheduling problems by artificial immune system. Future Generation Computer Systems 2004; 20: 1083-1095. https://doi.org/10.1016/j.future.2004.03.014

Engin O., Durmaz T., Baysal ME., Sarucan A. Çok kademeli montaj operasyonlu esnek akış tipi çizelgeleme probleminin çözümü için bir paralel kanguru algoritması. 6th International GAP Engineering Congress, 23-25 Ekim 2018, 325-329, Şanlıurfa.

Engin O., Engin B. Hybrid flow shop with multiprocessor task scheduling based on earliness and tardiness penalties. Journal of Enterprise Information Management 2018; 31(6): 925-936.

Engin O., İşler M. An efficient parallel greedy algorithm for fuzzy hybrid flow shop scheduling with setup time and lot size: A case study in apparel process. Journal of Fuzzy Extension and Applications 2022; 3(3): 249-262. https://doi.org/10.22105/jfea.2021.314312.1169

Engin O., Özmete A., İpek S., Karaoğlu YE. Çizelgeleme problemlerinin çözümünde hibrit biyocoğrafya tabanlı optimizasyon algoritmasının kullanımı. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi 2023; 8(1): 68-77. https://doi.org/10.46578/humder.1256671

Engin O., Sarıcan B. Makine çizelgeleme problemlerinin çözümünde pekiştirmeli öğrenme eksinin analizi. ALKU Journal of Science 2024; 6(2): 116-140. https://doi.org/10.46740/alku.1390397

Engin O., Yılmaz MK. A fuzzy logic based methodology for multi-objective hybrid flow shop scheduling with multi-processor tasks problems and solving with an efficient genetic algorithm. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems 2021; 42(1): 451-463. https://doi.org/10.3233/JIFS-21920

Fan B., Yang W., Zhang Z. Solving the two-stage hybrid flow shop scheduling problem based on mutant firefly algorithm. J Ambient Intell Human Comput 2019; 10: 979-990. https://doi.org/10.1007/s12652-018-0903-3

Güler G. A bibliometric analysis of power analysis studies. Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology. 2023. 14(3): 235-248. https://doi.org/10.21031/epod.1343984

Hajji MK., Hamlaoui O., Hadda H. A simulated annealing metaheuristic approach to hybrid flow shop scheduling problem. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering 2024; 9. https://doi.org/10.1016/j.aime.2024.100144

İşler M., Engin O. Fuzzy hybrid flow shop scheduling problem: an application. In: Kahraman C., Cebi S., Cevik Onar S., Oztaysi B., Tolga AC., Sari I.U. (ed) Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation INFUS 2021 Lecture Notes in Networks and Systems. Springer 2022; 307. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85626-7_73

Kahraman C., Engin O., Kaya I., Yılmaz MK. An application of effective genetic algorithms for solving hybrid flow shop scheduling problems. International Journal of Computational Intelligence Systems 2008; 1: 134-147. https://doi.org/10.2991/ijcis.2008.1.2.4

Liao CJ., Tjandradjaja E., Chung TP. An approach using particle swarm optimization and bottleneck heuristic to solve hybrid flow shop scheduling problem. Applied Soft Computing 2012; 12: 1755-1764. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.01.011

Li X., Guo X., Tang H., Wu R., Liu J. An improved cuckoo search algorithm for the hybrid flow-shop scheduling problem in sand casting enterprises considering batch processing. Computers & Industrial Engineering 2023; 176. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108921

Li JK., Li RH., Li JQ., Yu X., Xu Y. A multi-dimensional co-evolutionary algorithm for multi-objective resource-constrained flexible flowshop with robotic transportation, Applied Soft Computing 2025, 170: 1- 23. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112689.

Marichelvam MK., Prabaharan T., Yang XS. Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop scheduling problems to minimize makespan. Applied Soft Computing 2014; 19: 93-101.

Qin HX., Han YY., Zhang B., Meng LL., Liu YP., Pan QK., Gong DW. An improved iterated greedy algorithm for the energy-efficient blocking hybrid flow shop scheduling problem. Swarm and Evolutionary Computation 2022; 69. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100992.

Tang L., Liu W., Liu J. A Neural network model and algorithm for the hybrid flow shop scheduling problem in a dynamic environment. J. Intell. Manuf. 2005; 16: 361-370. https://doi.org/10.1007/s10845-005-7029-0

Ullah W., Ab Rashid MFF., Mu'tasim MAN. Greedy-assisted teaching-learning-based optimization algorithm for cost-based hybrid flow shop scheduling. Expert Systems with Applications 2025; 273, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126955

Vidojević F., Džamić A., Džamić D., Marić M. A novel artificial intelligence search algorithm and mathematical model for the hybrid flow shop scheduling problem. J Big Data 2025; 12, 23.

Wang J., Lei D., Li D., Li X., Tang H. A dynamic artificial bee colony for fuzzy distributed energy-efficient hybrid flow shop scheduling with batch processing machines. Journal of Manufacturing Systems, 2025; 78: 94-108. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.10.019

Yiğit G., Engin O. Endüstri 5.0 ile sürdürülebilirliğin sağlanması: bir bibliyometrik analiz. İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2025; 17(1): 23-46.

Yu C., Andreotti P., Semeraro Q. Multi-objective scheduling in hybrid flow shop: Evolutionary algorithms using multi-decoding framework. Computers & Industrial Engineering 2020; 147. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106570

Zhang B., Pan Q., Gao L., Zhang X., Sang H., Li J. An effective modified migrating birds optimization for hybrid flow shop scheduling problem with lot streaming. Applied Soft Computing 2017; 52: 14-27. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.021

Zhang C., Tan J., Peng K., Gao L., Shen W., Lian K. A discrete whale swarm algorithm for hybrid flow-shop scheduling problem with limited buffers. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 2021; 68. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102081

Zhou B., Hu L., Zhong Z. A hybrid differential evolution algorithm with estimation of distribution algorithm for reentrant hybrid flow shop scheduling problem. Neural Computing and Applications 2018; 30: 193-209. https://doi.org/10.1007/s00521-016-2692-y

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2151-2164, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2151-2164, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Domateste *Meloidogyne incognita* ve *Fusarium oxysporum f.sp. radicis lycopersici* Hastalık Kompleksinin Abamektin, *Bacillus thuringiensis ve Bacillus subtilis* Kullanılarak Mücadelesi

Harun ÇİMENKAYA[1*], Fatma Gül GÖZE ÖZDEMİR[2], Şerife Evrim ARICI[3]

[1,2,3]Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, 32200, Isparta

[1]https://orcid.org/0009-0001-3211-2045
[2]https://orcid.org/0000-0003-1969-4041
[3]https://orcid.org/0000-0001-5453-5869
*Sorumlu yazar: hrncmnky482@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 04.02.2025
Kabul tarihi: 26.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Kök-ur nematodu
Kök çürüklüğü
Entegre mücadele
Hastalık kompleksi

ÖZ

Kontrollü koşullarda yürütülen bu çalışmada domateste *Meloidogyne incognita* ve *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis lycopersici* **(**FORL**)** hastalık kompleksinin mücadelesinde ticari abamektin (Abamax 50 SC®), *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı (Dipel® 54% DF) ve *Bacillus subtilis* IAB/BS03 ırkı (Fungisei® SL) pestisitlerinin tek başlarına veya kombinasyon halinde etkisini değerlendirmek amacıyla saksılarda yürütülmüştür. Çalışma eş zamanlı nematod ve fungus inokülasyonuna yapılan tekli ve üç adet kombinasyon uygulamaları ile oluşturulmuştur. Nematod ve fungus inokulasyonundan bir gün sonra pestisitler toprağa uygulanmıştır. Altmış gün sonra deneme sonlandırılarak 1-9 kök gallenme ve yumurta paketi indeksi ile 0-4 hastalık şiddeti skalası kullanılarak değerlendirilmiştir. Tek başına yapılan uygulamalar değerlendirildiğinde en yüksek baskılayıcı etkinin nematod parametrelerinde Abamektin uygulamasında olduğu belirlenirken, hastalık şiddetinde ise *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı uygulamasında saptanmıştır. Abamektin ile yapılan *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı kombinasyonlarında gal indeks değeri sırasıyla 1,4 ve 1,8 bulunurken, hastalık şiddeti skala ortalaması sırasıyla 1,8 ve 1,4 tespit edilerek denemede en düşük değerler olduğu saptanmıştır. Abamektin ve biyolojik kontrol etmenleri olan bakteriler ile yapılan kombinasyon uygulamalarda nematod ve fungus üzerindeki baskılayıcı etki artmıştır. *Meloidogyne incognita* ve FORL hastalık kompleksinde Abamektin ile yapılan kombinasyon uygulamaların daha başarılı olacağı düşünülmektedir.

Control of *Meloidogyne incognita* and *Fusarium oxysporum f.sp. radicis lycopersici* Disease Complex in Tomato Using Abamectin, *Bacillus thuringiensis* and *Bacillus subtilis*

Research Article

Article History:
Received: 04.02.2025
Accepted: 26.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Root knot nematode
Root rot
Integrated management
Disease complex

ABSTRACT

In this controlled study, commercial abamectin (Abamax 50 SC®), *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* strain ABTS-351 (Dipel® 54% DF) and *Bacillus subtilis* strain IAB/BS03 (Fungisei® SL) pesticides were used alone or in combination to control *Meloidogyne incognita* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis lycopersici* (FORL) disease complex in tomato. The study consisted of single and three combination treatments to simultaneous nematode and fungus inoculation. One day after nematode and fungus inoculation, pesticides were applied to the soil. Sixty days later, the experiment was terminated and evaluated using a scale of 1-9 root galling and egg masses index and 0-4 disease severity. When the single treatments were evaluated, the highest suppressive effect was found in the Abamectin treatment in nematode parameters, while the highest suppressive effect was found in the *B. subtilis* IAB/BS03 strain treatment in disease severity. In the combinations of *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 strain and *B. subtilis* IAB/BS03 strain with abamectin, the gal index value was

found to be 1.4 and 1.8, respectively, while the disease severity scale average was found to be 1.8 and 1.4, respectively, which were the lowest values in the experiment. The suppressive effect on nematodes and fungi increased in combination applications with abamectin and biological control agents, bacteria. It is thought that combination applications with Abamectin will be more successful in the *Meloidogyne incognita* and FORL disease complex.

To Cite: Çimenkaya H., Göze Özdemir FG., Arıcı ŞE. Domateste *Meloidogyne incognita* ve *Fusarium oxysporum f.sp. radicis lycopersici* Hastalık Kompleksinin Abamektin, *Bacillus thuringiensis ve Bacillus subtilis* Kullanılarak Mücadelesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2151-2164.

1. Giriş

Domates, üretim kalitesini ve miktarını düşüren belirli zararlı ve hastalık türlerinden etkilenen bir üründür. Domates ürünündeki başlıca zararlılardan biri, küresel olarak domateste %27'den fazla verim kaybına neden olan kök-ur nematodları *Meloidogyne* spp.'dir (Sharma ve Sharma, 2015). Kök-ur nematodlarının şu ana kadar 105 türü bildirilmiş olmakla birlikte, dünyada ve Türkiye'de sebze yetiştirme alanlarında en yaygın bulunan türler *Meloidogyne incognita, M. javanica, M. arenaria* ve *M. hapla*'dır (Jones ve ark., 2013). Kök-ur nematodları beslendiği bitkilerde su ve besin akışını bozar ve enfekteli bitkilerde yavaş büyüme, yaprakların sararması, solma ve erken bitki ölümü gibi belirtiler gösterir (Asaturova ve ark., 2022). *Meloidogyne incognita* ve Fusarium hastalık kompleksleri dünya çapında bahçecilik ve sebze ürünlerinde ciddi kayıplara neden olur (Patil ve ark., 2021). *Fusarium oxysporum f.sp. radicis lycopersici* (FORL), domates kök çürüklüğüne neden olan, açık alan ve sera domates üretiminde %60'ın üzerinde verim kaybına neden olan önemli bir patojen türüdür (Hibar ve ark., 2007). Ülkemizde ilk olarak Can ve ark. (2004) tarafından tespit edilen bu patojen, domates yetiştirilen bölgelerde önemli verim kayıplarına neden olmaktadır (Çolak ve Biçici, 2013). Domates fidelerinde bodurlaşma ve sararmaya neden olurken, ilerleyen dönemlerde bitkilerde kök çürüklüğü, solgunluk ve ölüm görülmektedir. Kök bölgesinde çürüme ve gövde iletim demetlerinde nekroz toprak yüzeyinden en fazla 15-30 cm yükseklikte görülmektedir (Singh ve ark., 2022).

Nematod-fungal hastalık etkileşimlerini inceleyen birçok çalışmada, nematodların varlığında patojenler bitkilerde daha erken görülmekte, hastalık şiddeti artmakta ve bitki tamamen ölmektedir (Göze Özdemir ve ark., 2022a). *Fusarium* türlerinin neden olduğu solgunluk ve kök çürüklüğü hastalıkları çoğunlukla dayanıklı çeşitler, yetiştirme yöntemleri ve kimyasal mücadele programları ile mücadele edilmektedir (Bilici ve ark., 2021). Ancak saprofit canlılığın yüksek olması ve dayanıklı çeşitlerin sınırlı gelişmesi nedeniyle kültürel yöntemler yetersiz kalmaktadır (Jiménez-Díaz ve ark., 2015). Bazı çalışmalarda kök-ur nematodlarının Fusarium solgunluğuna karşı geliştirilen dayanıklı çeşitlerde bile bitkinin direncini kırdığı bulunmuştur (Göze Özdemir ve ark., 2022a). Kök-ur nematodları ve fungusların oluşturduğu hastalık komplekslerinin kontrolünde genel yaklaşım nematisitlerin kullanılmasıdır. Ancak nematisitlerin her iki patojene karşı da çok etkili olmadığı görülmektedir (Nicolopoulou-Stamati ve ark., 2016). Ayrıca nematisitlerin yüksek maliyeti, direnç geliştirmesi, sağlık ve çevresel tehlikeleri, kalıntı bırakması, toprak faunası ve yararlı mikroflora üzerindeki olumsuz etkileri ve bitkiler üzerindeki fitotoksik etkileri kullanımını sınırlayan faktörlerdir

(Haydock ve ark., 2013). Biyolojik kontrol, *M. incognita* ve *F. oxysporum*'un kontrolünde etkili olabilir ve bu arada çevreye yönelik riski azaltabilir (El-Nagdi ve ark., 2011). Ancak biyolojik kontrolün etkinliği hastalık kontrolü için yeterli değildir ve genellikle saha koşullarında dengesizdir. Bu nedenle, sentetik nematisitlerin ve fungisitlerin uygulanması, sırasıyla *M. incognita* ve *F. oxysporum*'un kontrolünde şu anda mevcut olan birincil strateji olmaya devam etmektedir (Wram ve Zasada, 2019). Abamektin ve fludioksonil'in sırasıyla *M. incognita* ve *F. oxysporum*'a karşı oldukça etkili birer nematisit ve fungisit olduğu ortaya konmuştur (Shi ve ark., 2019). Abamektin, omurgalı ve omurgasızlarda gama-aminobütirik asit (GABA) reseptörleri ve omurgasız klorür kanallarındaki glutamaterjik reseptörler üzerinde etkili olan bir avermektin insektisittir ve akarların ve hedeflenen diğer omurgasızların kaslarını felç eder (Novelli ve ark., 2016). Avermektinler, doğal fermantasyon süreçleri sırasında *Streptomyces avermitilis*'ten türetilir (Crump ve Omura, 2011). *Bacillus thuringiensis* Berliner, özellikle kök-ur nematodları olmak üzere farklı bitki nematod cinslerine karşı kullanılan mikroorganizmalardan biridir (Khalil ve Abd El-Naby, 2018). *B. thuringiensis*, parazitik nematodlar için toksik olan parasporal kristalin proteinli kapanımlar veya δ-endotoksinler üretir (Iatsenko ve ark., 2014). Bazı Cry proteinleri nematodlar için de toksiktir (Feitelson ve ark., 1992). Bir dizi serbest yaşayan ve parazitik nematod larvaları için toksik olduğu bilinen beş Cry proteini (Cry5B, Cry6A, Cry13, Cry14A, Cry21A) vardır (Kotze ve ark., 2005). Ayrıca, *B. thuringiensis* tarafından üretilen Cry5, Cry6, Cry12, Cry13, Cry14, Cry21, 149 Cry55 gibi belirli Cry proteinlerinin nematod öldürücü aktiviteye sahip olduğu tanımlanmıştır (Iatsenko ve ark., 2014). *Bacillus subtilis*, bitki hastalık ve zararlı yönetiminde bir biyo-kontrol ajanı olarak küresel ilgi gören bitki büyümesini teşvik eden rizobakterilerden (PGPR) biridir (Arici ve Tuncel, 2020). *B. subtilis*'in bitki büyüme endekslerini önemli ölçüde iyileştirdiği bulunmuştur (Khalil ve ark., 2012). Bu fitohormon üretimi, mineral çözünürlüğü, yumurta çıkarma faktörlerinin aktivitesinin azalması, kök eksüdatlarının değişmesi ve köklere nüfuz etmenin engellenmesi gibi çeşitli mekanizmalara atfedilebilir (Karanja ve ark., 2007). Ayrıca, birkaç rapor *B. subtilis*'in temel mekanizmalarının doğrudan parazitlik, hücre dışı antibiyotik veya diğer maddelerin üretimi, bitki büyümesinin artırılması, bitkilerde sistemik direnç oluşturulması, bitki hastalıklarının yönetilmesi ve uçucu nematisidal bileşiklerin salgılanması olduğunu açıklığa kavuşturmuştur (Huang ve ark., 2010).

Bu nedenle, bu çalışma, domatesteki kimyasal kontrol sorununa alternatif çözümler olarak ticari olarak satılan abamektin (Abamax 50 SC®), *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı (Dipel® 54% DF) ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı (Fungisei® SL) pestisitlerinin tek başına ve kombinasyon halinde *M. incognita* ve FORL hastalık kompleksine karşı etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan FORL izolatı daha önce teşhisi yapılmış (Göze Özdemir ve ark., 2022a) ve kültürü devam ettirilmektedir. Kök-ur nematodu materyali olarak, önceki çalışmada morfolojik ve

moleküler olarak tanımlanmış olan ve iklim odası koşullarında (24 ± 1 °C, %60 ± 5 nem) üretimi devam eden *M. incognita* ISP izolatı kullanılmıştır (Göze Özdemir ve ark., 2022b). Çalışma, kök-ur nematoduna ve FORL'a duyarlı olduğu bilinen Gulizar F1 domates çeşidi üzerinde yürütülmüştür (Göze Özdemir ve ark., 2022a). Abamectin (Abamax 50 SC®, PROFAGRO Tarım Turizm İnşaat Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.), *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı (Dipel® 54% DF, 32.000 clu/mg, SUMITOMO CHEMICAL, Türkiye Kimya Sanayi ve Tic. A.Ş.) ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı (Fungisei® SL,1x 10^7 cfu/ml, ADAGRO Zirai İlaç Hayvancılık Tarım San. ve Tic. Ltd. Şti.) ticari olarak temin edilmiştir. Uygulama dozları etiket bilgilerinden yararlanılarak tavsiye doz üzerinden ayarlanmıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Fungus İnokulumunun Hazırlanması

FORL izolatı, patates dekstroz agar ortamı (PDA) içeren steril petri kaplarında (9 cm) 25 °C'de 7 gün inkübe edilmiştir. Daha sonra, 5 fungus disk parçası (1 cm^2), 50 ml PDB (patates dekstroz broth agar) içeren otoklavlanmış 250 ml'lik şişelerde kültüre edilmiş ve 10 gün boyunca karanlıkta 25 °C'de inkübe edilmiştir. İnkübasyon süresi boyunca her gün elle çalkalanmıştır. Yedi gün sonra, kültür filtratı önce iki kat filtre kâğıdından (Whatman No. 1) filtrelenmiş ve ardından sporlarını ve miselyumu gidermek için 0,45 µm gözenek boyutlu bir filtreden tekrar süzülmüştür. Filtrat, deney kurulana kadar +4 °C'de tutulmuştur (Lobna ve ark., 2016).

2.2.2. Nematod İnokulumunun Hazırlanması

Meloidogyne. incognita'nın yaklaşık 1000 adet ikinci dönem larvası (L2) nematod inokulumu olarak kullanılmıştır. Tueza F1 domates çeşidinde kitle üretimi yapılan *M. incognita* için galli domates kökleri topraktan ayrıldıktan sonra musluk suyunda yıkanmış ve yumurta paketleri stereo mikroskop altında çıkartılmıştır. Daha sonra 3 cm çapında steril bir elek içeren bir petri kabında üç gün boyunca 25±2 ºC'de suda inkübe edilmiştir. Üç gün sonra, yumurtalardan çıkan L2'ler ışık mikroskobu altında sayılmış ve deneyde kullanılacak sayıya ayarlanan 1 ml'lik tüplere yerleştirilmiştir (Lobna ve ark., 2017).

2.2.3. Deneme Dizaynı

Bu çalışmada, Gülizar F1 domates çeşidinde *M. incognita* (Minc) ve FORL'nin eş zamanlı inokulasyonunda Abamektin, *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkının nematod ve fungus üzerindeki etkileri Nisan-Temmuz 2024 tarihleri arasında araştırılmıştır. Çalışma, kontrollü koşullar altında (24 ± 1 °C, %60 ± %5 nem) bir iklim odasında plastik saksılarda 7 uygulama ile yürütülmüştür (Tablo 1). Çalışma her bir uygulama için tesadüf parselleri deneme deseninde 5 tekrarlı olarak kurulmuştur. Üç haftalık domates fideleri yaklaşık 1500 g steril toprak (%68 kum, %21 silt ve %11 kil) içeren 14 cm çapındaki plastik saksılara dikilmiştir. Sadece *M.*

incognita ve FORL'nin eş zamanlı uygulandığı bitkiler kontrol olarak değerlendirilmiştir. Saksı başına başlangıç inokulum yoğunluğu olarak 1000 adet *M. incognita* L2/1ml ve $3X10^6$/10 ml FORL kullanılmış ve eş zamanlı inokulasyon yapılmıştır. Nematod inokulumu, fide sapının etrafına açılan ve topraktaki köklere temas edecek kadar derin olan üç adet 2-3 cm derinliğindeki deliğe pipet yardımıyla eşit şekilde dağıtılmıştır. Fungus inokulasyonu, bir mezür yardımıyla saksıların toprak yüzeyinde açılan bu deliklere dökülmüştür (Lobna ve ark., 2016; 2017). Nematod ve fungus inokulasyonundan bir gün sonra Abamektin, *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı saksı başına sırasıyla 0,08 ml, 5 g ve 5 ml olacak şekilde toprağa uygulanmıştır (Khalil ve Abd El-Naby, 2018).

Tablo 1. Uygulamalar

	Uygulamalar
1	Minc+FORL (Kontrol)
2	Minc+FORL+Abamektin
3	Minc+FORL+*Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı
4	Minc+FORL+*Bacillus subtilis* IAB/BS03 ırkı
5	Minc+FORL+Abamektin+*Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı
6	Minc+FORL+Abamektin+*Bacillus subtilis* IAB/BS03 ırkı
7	Minc+FORL+ *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı+*Bacillus subtilis* IAB/BS03 ırkı

Çalışma, uygulamalarından 60 gün sonra sonlandırılmıştır. Her uygulamaya ait domates bitkileri dikkatlice topraktan çıkarılmış ve toprakları musluk suyu ile yıkanmıştır. Değerlendirmede nematodlar için 1-9 kök gal ölçeği ve (1= gal yok, 2= %5 kök gallenmesi, 3= %6-10 kök gallenmesi, 4= %11-18 kök gallenmesi, 5= %19-25 kök gallenmesi, 6= %26-50 kök gallenmesi, 7= %51-65 kök gallenmesi, 8= %66-75 kök gallenmesi, 9= %76-100 kök gallenmesi) ve yumurta paketi üretim oranı ölçeği kullanılmıştır (1= yumurta paketi yok, 2 = 1 veya 2 yumurta paketi, 3= 3-6 yumurta paketi, 4= 7-10 yumurta paketi, 5= 11-20 yumurta paketi, 6= 21-30 yumurta paketi, 7= 31-60 yumurta paketi, 8= 61-100 yumurta paketi, 9= 100'den fazla yumurta paketi) (Mullin ve ark., 1991). FORL'nin neden olduğu hastalığın şiddeti, Chandler ve Santelmann (1968)'ın 0-4 skalasına göre değerlendirilmiştir (0: Fidanda zarar yok, 1: Fidan ile toprak yüzeyinin birleştiği yerde renk bozulması ve küçük lezyonlar, 2: Daha büyük lezyonlar gövdeyi çevreledi, 3: Gövdeyi çevreleyen ve içbükey görünüme neden olan büyük lezyonlar, 4: Fungal hasar nedeniyle ölü bitki) (Erol ve Tunalı, 2007).

2.2.4. İstatistik Analiz

Çalışma sonucunda elde edilen tüm veriler SPSS 20 paket programı kullanılarak istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Elde edilen verilerin ortalamaları arasındaki farkları test etmek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Ortalamalar, $P \leq 0,05$'te Tukey HSD testi ile karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular

Çalışmada en yüksek gal (8,6/1-9 indeks) ve yumurta paketi indeks (7,6/1-9 indeks) ortalaması Minc+FORL uygulamasında bulunmuştur. Diğer uygulamaların gal indeks ortalamasının değerleri 1,4-5,8/1-9 indeks arasında değişim gösterirken, yumurta paketi indeks ortalaması değerlerinin 1,2-5,0/1-9 indeks arasında değiştiği saptanmıştır. Minc+FORL uygulaması ile karşılaştırıldığında Abamektin, *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı uygulamasının tek başına veya kombinasyonlarının nematodun gal (df=6, F=79,44, p=0,00) ve yumurta paketi üretimini (df=6, F=72,59, p=0,00) önemli oranda baskıladığı belirlenmiştir. En düşük gal indeks ortalaması Minc+FORL hastalık kompleksine tek başına Abamektin (1,8/1-9 gal indeks) ve Abamektin+*B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı (1,4/1-9 indeksi) ile Abamektin+ *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı (1,8/1-9 indeks) kombinasyon uygulamalarında saptanmıştır. Gal ve yumurta paketi skalası ortalaması değerlendirildiğinde Minc+FORL+*B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı uygulaması ile Minc+FORL+ *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı+*B. subtilis* IAB/BS03 ırkı uygulaması aynı istatistiksel grupta yer almıştır ($p \leq 0,05$) ve Minc+FORL+*B. subtilis* IAB/BS03 ırkı uygulamasından daha düşük değer aldıkları tespit edilmiştir. Minc+FORL+Abamektin, Minc+FORL+Abamektin+B. *thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı ve Minc+FORL+Abamektin+*B. subtilis* IAB/BS03 ırkı uygulamalarının yumurta paketi indeks ortalamaları benzer bulunmuş ve diğer uygulamalardan önemli oranda düşük saptanmıştır ($p \leq 0.05$) (Tablo 2).

Hastalık şiddeti 3,4/0-4 skalası değeri ile en yüksek Minc+FORL uygulamasında bulunmuştur. Diğer uygulamalarda yapılan Abamektin, *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı'nın tek başına ve kombinasyon uygulamaları hastalık şiddetini önemli oranda düşürmüştür (df=6, F=6,5; p=0,05). Hastalık kompleksine tek başına Abamektin (2,4/ 0-4 skalası) ve tek başına B. *thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı (2,4/ 0-4 skalası) uygulaması yapılması hastalık şiddetine benzer etki yapmış ve aynı istatistiksel grupta saptanmıştır ($p \leq 0,05$). Ancak bu 2 uygulamanın hastalık şiddeti tek başına *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı (1,6/ 0-4 skalası) uygulamasından daha yüksek belirlenmiştir. Kombinasyon uygulamalarda hastalık şiddeti tek başına yapılan uygulamalara göre daha düşük belirlenmiştir. Minc+FORL+*B. subtilis* IAB/BS03 ırkı, Minc+FORL+Abamektin+B. *thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı, Minc+FORL+Abamektin+*B. subtilis* IAB/BS03 ırkı ve Minc+FORL+*B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı+*B. subtilis* IAB/BS03 ırkı uygulamaları aynı istatistiksel grupta saptanmış ($p \leq 0.05$) ve hastalık skala değeri ortalaması 1,4-2,2/0-4 skala arasında değişim göstermiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Domateste *Meloidogyne incognita* ve *Fusarium oxysporum f.sp. radicis lycopersici* hastalık kompleksinde uygulamaların etkisi

Uygulamalar	Gal Indeks (1-9) Ortalaması±Standart Hata[1]	Yumurta paketi Indeks (1-9) Ortalaması±Standart Hata[2]	Hastalık Şiddeti Skalası (0-4)±Standart Hata[3]
Minc+FORL	8,6±0,2 a*	7,6±0,4 a	3,4±0,2 a
Minc+FORL+Abamektin	1,8±0,3 d	1,6±0,2 d	2,4±0,2 ab
Minc+FORL+*Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı	4,0±0,3 c	3,6±0,2 c	2,4±0,2 ab
Minc+FORL+*Bacillus subtilis* IAB/BS03 ırkı	5,8±0,3 b	5,0±0,3 b	1,6±0,4 b
Minc+FORL+Abamektin+*Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı	1,4±0,2 d	1,2±0,2 d	1,8±0,2 b
Minc+FORL+Abamektin+*Bacillus subtilis* IAB/BS03 ırkı	1,8±0,2 d	1,4±0,2 d	1,4±0,2 b
Minc+FORL+*Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı+*Bacillus subtilis* IAB/BS03 ırkı	3,6±0,2 c	3,2±0,2 c	1,6±0,4 b

[1] 1-9 gal indeksi; 1= gal yok, 2= %5 kök gallenmesi, 3= %6-10 kök gallenmesi, 4= %11-18 kök gallenmesi, 5= %19-25 kök gallenmesi, 6= %26-50 kök gallenmesi, 7= %51-65 kök gallenmesi, 8= %66-75 kök gallenmesi, 9= %76-100 kök gallenmesi (Mullin ve ark., 1991)

[2] 1-9 yumurta paketi indeksi; 1= yumurta paketi yok, 2 = 1 veya 2 yumurta paketi, 3= 3-6 yumurta paketi, 4= 7-10 yumurta paketi, 5= 11-20 yumurta paketi, 6= 21-30 yumurta paketi, 7= 31-60 yumurta paketi, 8= 61-100 yumurta paketi, 9= 100'den fazla yumurta paketi (Mullin ve ark., 1991)

[3] 0-4 hastalık şiddeti skalası; 0=Fidanda zarar yok, 1=Fidan ile toprak yüzeyinin birleştiği yerde renk bozulması ve küçük lezyonlar, 2=Daha büyük lezyonlar gövdeyi çevirdi, 3=Gövdeyi çevreleyen ve içbükey görünüme neden olan büyük lezyonlar, 4=Fungal hasar nedeniyle ölü bitki) (Chandler ve Santelmann, 1968)

*Aynı sütundaki küçük harfler uygulamaların arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir ($p \leq 0,05$).

4. Tartışma

Tek başına yapılan uygulamalar değerlendirildiğinde nematod parametrelerinde en yüksek baskılayıcı etkinin Abamektin uygulamasında olduğu belirlenirken, bunu *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı takip etmiştir. Hastalık şiddetinde ise tek başına yapılan uygulamalarda en yüksek baskılayıcı etki *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı uygulamasında saptanmıştır. Kombinasyon uygulamalarda nematod ve fungus üzerindeki baskılayıcı etki artmıştır. Abamektin ile yapılan *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı kombinasyonlarında gal ve yumurta paketi indeks değeri ile hastalık şiddeti skala ortalaması denemede en düşük tespit edilmiştir. Hastalık kompleksinde *B. thuringiensis* var. *kurstaki* ABTS-351 ırkı ve *B. subtilis* IAB/BS03 ırkı kombinasyonunun gal, yumurta paketi ve hastalık şiddeti skala ortalaması diğer Abamektin ile olan kombinasyon uygulamalardan daha yüksek belirlenmiştir. Hastalık kompleksini yönetirken 2 etmeni de etkileyecek uygulamaların seçilmesi gerekmektedir. *Meloidogyne incognita* ve FORL hastalık kompleksinde Abamektin ile yapılan kombinasyon uygulamaların daha başarılı olacağı öngörülmektedir. Abamektin, farklı mahsullerde kök-ur nematodlarına karşı etkili bir nematisittir (Saad ve ark., 2017). Ayrıca, abamektinin bir nematisit olarak etkisi, toprak parçacıklarına güçlü adsorpsiyonuna ve topraktaki hareketsizliğine atfedilmektedir (Muzhandu ve ark., 2014). Çiftçiler hızlı etki görülmesi nedeniyle kimyasal nematisitleri daha çok tercih etse de artan çevre bilinciyle daha güvenilir nematisitlere de

yönelim artmıştır. Abamektin yeni nesil nematisitler arasında yer almakta ve daha çevreci kabul edilmektedir. Abamektin'in topraktaki yarı ömrünün 1,1-46,5 gün arasında olduğu bildirilmiştir (Dionisio ve Rath, 2016). Abamektin pH 4-7'de hidrolitik olmasa da 2020 yılında EFSA (Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi) tarafından doğal ışık altında kolayca fotolize edildiği bildirilmiştir (Jiang ve ark., 2024).

Farklı araştırmalarda *B. thuringiensis*'in kök-ur nematodu üzerindeki etkinliği ortaya konmuştur (Ashoub ve Amara, 2010). Ayrıca, *B. subtilis, B. thuringiensis* ve *B. cereus*'un *M. javanica*'ya (Dawar ve ark., 2008) ve *Heterodera avenae*'ye (Ahmed ve ark., 2018) karşı etkili olduğu kanıtlanmıştır. Radwan (2007), *B. thuringiensis*'in farklı ticari preparat ve konsantrasyonlarını (Dipel 2x®, Delfin®, Ecotech Bio®, Turex® ve Xentari®) *M. incognita*'ya karşı test etmiş ve gallenmenin %49,3 ila %78,2 arasında değişen oranlarda baskılandığını bulmuştur. Mohamedova ve Samaliev (2011), farklı zaman aralıklarında toprağa uygulanan iki yerel *B. subtilis* suşunun nematisidal aktivitesini test etmiştir. *B. subtilis*'in uygulanması, patates bitkilerinin köklerindeki *M. arenaria*'nın dişilerini ve yumurta paketlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Khalil ve Abd El-Naby (2018), domates bitkilerinde *M. incognita*'ya karşı abamektin, *B. thuringiensis* ve *B. subtilis'*in tek başına veya kombinasyon halinde etkisini değerlendirmiş, Abamektin, gallenmeyi %85 oranında azaltan en etkin uygulama olarak bulunurken, *B. thuringiensis* ve *B. subtilis*'in tekli uygulamaları, gallenmede %66,22 ila %78,88 arasında azalmalar sağlamıştır.

Dört *B. subtilis* suşu avokadodan izole edilmiş olsa da, glukanazlar veya proteazlar ve antibiyotik lipopeptitler surfaktin, fengycin ve/veya iturin gibi hidrolitik enzimler üreterek FORL ve *R. necatrix*'e karşı bir inhibitör etki bildirilmiştir (Cazorla ve ark., 2007). Ayrıca, *Bacillus* tedavisiyle spesifik olarak indüklenen genleri belirlemek amacıyla cDNA-AFLP analizleri ile konakçı bitkideki gen transkripsiyonunda önemli değişiklikler ortaya çıkarılmıştır (Ongena ve ark., 2005). Baysal ve ark. (2008) 16s RNA bölge kod geni tarafından tanımlanan *B. subtilis'*in (EU07) izolatının 10^6 CFU ml−1'deki yoğunlukta uygulandığında hastalık insidansını %75 oranında azaltabildiğini bildirmektedirler. Kontrol ve in vivo inhibisyon oranı sadece %52 olan QST 713 (AgraQuest, Davis, CA) ile karşılaştırıldığında FORL'yi etkili bir şekilde inhibe etmiştir. Constantinescu ve ark. (2010), in vitro ve in vivo deneyler, *B. subtilis* B49b suşunun FORL'un biyolojik kontrolüne karşı antagonistik aktivitesini göstermiştir. B49b, proteaz ve laktonaz salgılanması, hareketlilik ve antifungal metabolitlerin üretimi gibi biyolojik kontrol aktivitesinde rol oynayabilecek yetenekler açısından karakterize edilmiştir. TLC ve HPLC analizleri, B49b suşunun Iturin A ve surfaktin antibiyotiklerini ürettiğini göstermiştir. Fide çıkışından 15 gün sonra, bitkiler *B. subtilis* V26 spor süspansiyonu (10^8 CFU/mL) ile sulandığında, Fusarium solgunluk şiddetinin %54,8-60,8 oranında azaldığı ve inokulasyondan 60 gün sonra hıyarda büyüme parametrelerinin kontrole kıyasla daha iyi olduğu belirlenmiştir (Khedher ve ark., 2021). İki *B. subtilis* suşu (BS 10-4 ve BS 26D), patates depolaması sırasında *F. oxysporum* büyümesini sırasıyla %50 ve %25 oranında azaltmıştır (Lastochkina ve ark., 2020). *Bacillus subtilis* SQR 9 suşunun antifungal bileşikleri *F. oxysporum*'un miselyal büyümesini

önemli ölçüde engellemiş ve kontrol uygulamasıyla karşılaştırıldığında çimlenen spor sayısında %13,4-83,6 oranında azalmaya neden olmuştur (Cao ve ark., 2012). Araştırıcıların farklı bitkilerde yürüttükleri çalışmalarda *Fusarium* türleri üzerinde *B. subtilis* ile ilgili çalışmaların da olduğu görülmektedir. *Bacillus subtilis* CE1 suşunun, kök seviyesinde *F. verticillioides*'e karşı potansiyel bir biyolojik kontrol ajanı olabileceği ortaya konmuştur (Cavaglieri ve ark., 2005). Zhao ve ark. (2014) *B. subtilis* SG6'nın *F. graminearum*'un miselyum büyümesi, sporlanması ve DON üretimi üzerinde sırasıyla %87,9, %95,6 ve %100 inhibisyon oranlarıyla yüksek antifungal etki gösterdiğini raporlamışlardır. Baard ve ark. (2023), farklı tohumlardan elde edilen bakteriyel endofit izolatlarının *F.oxysporum, F. proliferatum, F. culmorum* ve *F. verticillioides*'e karşı biyokontrol potansiyelini araştırmış ve filogenetik analiz sonucu, bakteri izolatlarının *B. subtilis* (B1) ve *B. tequilensis* (B2–B4) ile yakından ilişkili olduğunu ve kimlik skorunun %98'in üzerinde olduğunu ortaya koymuşlardır. Tüm bakteri izolatları önemli miktarda ($p < 0,05$) indol asetik asit (IAA), siderofor ve proteaz aktivitesi üretmiştir. Bu izolatların in vitro antagonistik analizleri, kontrol ile karşılaştırıldığında, fungal miselyumlarının inhibisyonunun *F. proliferatum* > *F. culmorum* > *F. verticillioides* > *F. oxysporum* olacak şekilde baskılandığı bulunmuştur. Depolanmadan önce yumruların *B.subtilis* V26 ile uygulanması ürün hasadı sırasında oluşan yaralanmalar yoluyla oluşan fitopatojenik fungus penetrasyonunu engellemek için önleyici olarak kullanılabilir (Wharton ve Kirk 2014). Abdelmoteleb ve ark. (2023), *B. subtilis*'in üç bakteri suşu (yani, LDA-1, LDA-2 ve LDA-3)'nun pamukta *F. solani* için biyolojik kontrol ajanları olarak ümit verici olduğunu ve dolayısıyla sürdürülebilir tarım sistemlerinde biyo-fertilizatör olarak kullanılabileceğini ileri sürmüşlerdir.

5. Sonuç

Abamektin bitki paraziti nematodları kontrol etmek için kullanılan etkili bir nematisittir. Çalışmada Abamektin'in tek başına ve kombinasyon uygulamalarının, nematod ve fungal hastalık kompleksinin kontrolünde daha etkili olduğu bulunmuştur. Bu çalışma sonuçları ile domates kök ve kök boğazı çürüklüğü hastalığı ile mücadelede tek başına bir uygulama yapmaktan ziyade; toprakta nematod ve fungusu baskılayacak şekilde yöntemleri entegre eden bir mücadele programının başarıyı artırdığı sonucuna varılmıştır. Abamektin ile *B. thuringiensis* ve *B. subtilis* gibi alternatif araçları tek başına veya kombinasyonlar halinde kullanarak insan ve çevre sağlığı için güvenli ve etkili öneriler oluşturulabilir. Özellikle hastalık komplekslerinde hastalık şiddetini azaltabilmek için Abamektin ile *B. subtilis* uygulaması daha ön plana çıkarılabilir. Çalışmanın arazi sonuçları ile desteklenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Materyal temini sağlayan Ziraat Yüksek Mühendisi Harun Burak GÖZE'ye (Beylerbeyi Tarım, Altınova, Antalya, Türkiye) desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Ahmed S., Liu Q., Jian H. Biocontrol potential of *Bacillus* isolates against cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*). Pakistan Journal of Nematology 2018; 36(2): 163-176.

Arici SE., Tuncel ZN. Antifungal activity of useful microorganisms against a phytopathogenic fungus on maize. Emerging Materials Research 2020; 9(3): 743-749.

Asaturova AM., Bugaeva LN., Homyak AI., Slobodyanyuk GA., Kashutina EV., Yasyuk LV., Sidorov NM., Nadykta VD., Garkovenko AV. *Bacillus velezensis* strains for protecting cucumber plants from root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in a greenhouse. Plants 2022; 11(3): 275.

Ashoub AH., Amara MT. Biocontrol activity of some bacterial genera against root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*. Journal of American Science 2010; 6(10): 321-328.

Baard V., Bakare OO., Daniel AI., Nkomo M., Gokul A., Keyster M., Klein A. Biocontrol potential of *Bacillus subtilis* and *Bacillus tequilensis* against four *Fusarium* species. Pathogens 2023; 12(2): 254.

Baysal Ö., Çalışkan M., Yeşilova Ö. An inhibitory effect of a new *Bacillus subtilis* strain (EU07) against *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. Physiological and Molecular Plant Pathology 2008; 73(1-3): 25-32.

Bilici S., Demir S., Boyno G. The effects of essential oils and Arbuscular Mycorrhizal fungi on decay disease (*Fusarium oxysporum f. sp. radicis lycopersici* Jarvis & Shoemaker) of root and root collar of tomato. Journal of The Institute of Science and Technology 2021; 11(2): 857-868.

Can C., Yucel S., Korolev N., Katan T. First report of *Fusarium* crown and root rot of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis-lycopersici* in Turkey. Plant Pathology 2004; 53(6): 814.

Cazorla FM., Romero D., Pérez-García A., Lugtenberg BJJ., Vicente AD., Bloemberg G. Isolation and characterization of antagonistic *Bacillus subtilis* strains from the avocado rhizoplane displaying biocontrol activity. Journal of Applied Microbiology 2007; 103(5): 1950-1959.

Cao Y., Xu Z., Ling N., Yuan Y., Yang X., Chen L., Shen Q. Isolation and identification of lipopeptides produced by B. subtilis SQR 9 for suppressing *Fusarium* wilt of cucumber. Scientia Horticulturae 2012; 135: 32-39.

Cavaglieri L., Orlando JRMI., Rodriguez MI., Chulze S., Etcheverry M. Biocontrol of *Bacillus subtilis* against *Fusarium verticillioides* in vitro and at the maize root level. Research in Microbiology 2005; 156(5-6): 748-754.

Chandler JM., Santelmann PW. Interactions of four herbicides with *Rhizoctonia solani* on seedling cotton. Weed Science 1968; 16(4): 453-456.

Constantinescu F., Sicuia OA., Zamfiropol R., Dinu S., Oancea F. Beneficial characteristics of some bacterial strains isolated from rhizosphere. Romanian Journal of Plant Protection 2010; 3: 6-11.

Crump A., Omura S. Ivermectin,'wonder drug'from Japan: the human use perspective. Proceedings of the Japan Academy 2011; 87(2): 13-28.

Çolak A., Biçici M. PCR detection of *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* and races of *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* of tomato in protected tomato-growing areas of The Eastern Mediterranean Region of Turkey. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 2013; 37(4): 457-467.

Dawar S., Tariq M., Zaki MJ. Application of *Bacillus* species in control of *Meloidogyne javanica* (treub) Chitwood on cowpea and mash bean. Pakistan Journal of Botany 2008; 40(1): 439-444.

Dionisio AC., Rath S. Abamectin in soils: analytical methods, kinetics, sorption and dissipation. Chemosphere 2016; 151: 17-29.

El-Nagdi WMA., Haggag KHE., Abd-El-Fattah AI., Abd-El-Khair H. Biological control of *Meloidogyne incognita* and *Fusarium solani* in sugar beet. Nematologia Mediterranea 2011; 39(1): 59-71.

Erol FY., Tunalı B. Determination of root and crown rot diseases in tomato growing area of Samsun Province. I. International Symposium on Tomato Diseases, 2007 October, 65-70, Kuşadası, Turkey, 808 pp.

Feitelson JS., Payne J., Kim L. *Bacillus thuringiensis*: insects and beyond. Biotechnology 1992*;* 10(3): 271-275.

Göze Özdemir FG., Arıcı ŞE., Elekcioğlu İH. Interaction of *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White, 1919) (Nemata: Meloidogynidae) and *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* Jarvis & Shoemaker in tomato f1 hybrids with differing levels of resistance to these pathogens. Turkish Journal of Entomology 2022a; 46(1): 63-73.

Göze Özdemir FG., Tosun B., Şanlı A., Karadoğan T. Bazı Apiaceae uçucu yağlarının *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White, 1919) Chitwood, 1949 (Nematoda: Meloidogynidae)'ya karşı nematoksik etkisi. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2022b; 59(3): 529-539.

Haydock PPJ., Woods SR., Grove IG., Hare MC. Chemical control of nematodes. In: Plant Nematology, 2nd Edition. Perry R.N., Moens M. (Eds.). Cab International, Wallingford 2013; 459-479.

Hibar K., Edel-Herman V., Steinberg C., Gautheron N., Daami-Remadi M., Alabouvette C., El Mahjoub M. Genetic diversity of *Fusarium oxysporum* populations isolated from tomato plants in Tunisia. Journal of Phytopathology 2007; 155(3): 136-142.

Huang Y., Xu C., Ma L., Zhang K., Duan C., Mo M. Characterisation of volatiles produced from *Bacillus megaterium* YFM3. 25 and their nematicidal activity against *Meloidogyne incognita*. European Journal of Plant Pathology 2010; 126: 417-422.

Iatsenko I., Boichenko I., Sommer, RJ. *Bacillus thuringiensis* DB27 produces two novel protoxins, Cry21Fa1 and Cry21Ha1, which act synergistically against nematodes. Applied and Environmental Microbiology 2014; 80(10): 3266-3275.

Jiang J., Liu X., Liu D., Zhou Z., Pan C., Wang P. The combination of chemical fertilizer affected the control efficacy against root-knot nematode and environmental behavior of abamectin in soil. Pesticide Biochemistry and Physiology 2024; 199: 105804.

Jiménez-Díaz RM., Castillo P., Del Mar Jiménez-Gasco M., Landa BB., Navas-Cortés JA. *Fusarium* wilt of chickpeas: biology, ecology and management. Crop Protection 2015; 73: 16-27.

Jones JT., Haegeman A., Danchin EGJ., Gaur HS., Helder J., Jones MGK., Kikuchi T., Manzanilla-López R., Palomares-Rius JE., Wesemael WML., Perry RN. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. Molecular Plant Pathology 2013; 14(9): 946-961.

Karanja NK., Mutua GK., Kimenju JW. Evaluating the effect of *Bacillus* and *Rhizobium* bio-inoculant on nodulation and nematode control in *Phaseolus vulgaris* L. In: Advances in Integrated Soil Fertility Research in SubSaharan Africa: Challenges and Opportunities, (Bationo, A., Waswa B., Kihara J. and Kimetu J. eds.) Netherlands, 2007, Springer, 865-871.

Khalil MS., Abd El-Naby SSI. The integration efficacy of formulated abamectin, *Bacillus thuringiensis* and *Bacillus subtilis* for managing *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White) Chitwood on tomatoes. Journal of Biopesticides 2018; 11(2): 146-153.

Khalil MSEDH., Allam AFG., Barakat AST. Nematicidal activity of some biopesticide agents and microorganisms against root-knot nematode on tomato plants under greenhouse conditions. Journal of Plant Protection Research 2012; 52(1).

Khedher SB., Mejdoub-Trabelsi B., Tounsi S. Biological potential of Bacillus subtilis V26 for the control of Fusarium wilt and tuber dry rot on potato caused by *Fusarium* species and the promotion of plant growth. Biological Control 2021; 152: 104444.

Kirk WW., Wharton, PS. Fungal and bacterial disease aspects in potato production. In The potato: botany, production and uses 2014; pp. 167-201. Wallingford UK: CABI.

Kotze AC., O'Grady J., Gough JM., Pearson R., Bagnall NH., Kemp DH., Akhurst RJ. Toxicity of *Bacillus thuringiensis* to parasitic and free-living life stages of nematodes parasites of livestock. International Journal for Parasitology 2005; 35(9): 1013-1022.

Lastochkina O., Baymiev A., Shayahmetova A., Garshina D., Koryakov I., Shpirnaya I., Palamutoglu R. Effects of endophytic *Bacillus subtilis* and salicylic acid on postharvest diseases (*Phytophthora infestans*, *Fusarium oxysporum*) development in stored potato tubers. Plants 2020; 9(1): 76.

Lobna H., Mayssa C., Hajer R., Naima MHB., Ali R., Najet HR. Biocontrol effectiveness of indigenous Trichoderma species against *Meloidogyne javanica* and *Fusarium oxysporum f. sp. radicis lycopersici* on tomato. International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering 2016; 10(10): 551-555.

Lobna H., Aymen EM., Hajer R., Naima MHB., Najet HR. Biochemical and plant nutrient alterations induced by *Meloidogyne javanica* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis lycopersici* co-infection on tomato cultivars with differing level of resistance to *M. javanica*. European Journal of Plant Pathology 2017; 148(2): 463-472.

Mohamedova M., Samaliev H. Effect of the rhizobacterium *Bacillus subtilis* on the development of the root-knot nematode *Meloidogyne arenaria* at different temperatures. Agricultural Science and Technology 2011; 3(4): 378-383.

Mullin BA., Abawi GS., Pastor-Corrales MA., Kornegay JL. Reactions of selected bean pure lines and accessions to *Meloidogyne* species. Plant Disease 1991; 75(12): 1212-1216.

Muzhandu RT., Chinheya CC., Dimbi S., Manjeru P. Efficacy of abamectin for the control of root-knot nematodes in tobacco seedling production in Zimbabwe. African Journal of Agricultural Research 2014; 9(1): 144-147.

Nicolopoulou-Stamati P., Maipas S., Kotampasi C., Stamatis P., Hens L. Chemical pesticides and human health: the urgent need for a new concept in agriculture. Frontiers in Public Health 2016; 4: 148.

Novelli A., Vieira BH., Braun AS., Mendes LB., Daam MA., Espíndola ELG. Impact of runoff water from an experimental agricultural field applied with Vertimec® 18EC (abamectin) on the survival, growth and gill morphology of zebrafish juveniles. Chemosphere 2016; 144: 1408-1414.

Ongena M., Duby F., Jourdan E., Beaudry T., Jadin V., Dommes J., Thonart P. *Bacillus subtilis* M4 decreases plant susceptibility towards fungal pathogens by increasing host resistance associated with differential gene expression. Applied Microbiology and Biotechnology 2005; 67: 692-698.

Patil JA., Yadav S., Kumar A. Management of root knot nematode, *Meloidogyne incognita* and soil borne fungus, *Fusarium oxysporum* in cucumber using three bioagents under polyhouse conditions. Saudi Journal of Biological Sciences 2021; 28(12): 7006-7011.

Radwan MA. Bioactivity of commercial products of *Bacillus thuringiensis* on *Meloidogyne incognita* infecting tomato. Indian Journal of Nematology 2007; 37(1): 30-33.

Saad ASA., Radwan MA., Mesbah HA., Ibrahim HS., Khalil MS. Evaluation of some Non-fumigant nematicides and the biocide avermactin for managing *Meloidogyne incognita* in tomatoes. Pakistan Journal of Nematology 2017; 35(1): 85-92.

Sharma IP., Sharma AK. Effects of initial inoculum levels of *Meloidogyne incognita* J2 on development and growth of tomato conditions. cv.PT-3 under control. African Journal of Microbiology Research 2015; 9(20): 1376-1380.

Shi X., Qiao K., Li B., Zhang S. Integrated management of *Meloidogyne incognita* and *Fusarium oxysporum* in cucumber by combined application of abamectin and fludioxonil. Crop Protection 2019; 126: 104922.

Singh G., Tiwari A., Choudhir G., Kumar A., Kumar S., Hariprasad P., Sharma S. Deciphering the role of *Trichoderma* sp. bioactives in combating the wilt causing cell wall degrading enzyme polygalacturonase produced by *Fusarium oxysporum*: an in-silico approach. Microbial Pathogenesis 2022; 168: 105610.

Zhao Y., Selvaraj JN., Xing F., Zhou L., Wang Y., Song H., Liu Y. Antagonistic action of *Bacillus subtilis* strain SG6 on *Fusarium graminearum*. PloS one 2014; 9(3): e92486.

Wram CL., Zasada IA. Short-term effects of sublethal doses of nematicides on *Meloidogyne incognita*. Phytopathology 2019; 109(9): 1605-1613.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2165-2187, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology,
8(5): 2165-2187, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Uçak Eğim Kontrolü için Gri Kurt Optimizasyonu ile Genetik Algoritma Tabanlı Hibrit Algoritmayla PID Denetleyici Tasarımı

Fatmanur ATEŞ[1*], Ramazan ŞENOL[2]

[1,2] Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

[1]https://orcid.org/0000-0001-5465-2483
[2]https://orcid.org/0000-0002-7078-3229
*Sorumlu yazar: fatmanurates@isparta.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 11.03.2025
Kabul tarihi:28.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Uçak eğim kontrolü
PID
Genetik algoritma
Gri kurt optimizasyon algoritması
Hibrit optimizasyon
Uçuş güvenliği

ÖZ

Hava taşıtlarının stabilitesini ve manevra kabiliyetini artırmak için uçak eğim kontrolünün sağlanması; kritik rol oynayan bir kontrol problemidir. Bu çalışmada, uçak eğim kontrol sistemi için kararlı ve hassas bir dinamik tepki elde edebilmek amacıyla kontrolör tasarlanmıştır. Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) ve Genetik Algoritma (GA) tabanlı hibrit bir optimizasyon yaklaşımı kullanılarak Oransal-İntegral-Türev (PID) denetleyici parametreleri optimize edilmiştir. Önerilen hibrit GKOGA-PID denetleyicisinde, kazanç parametrelerinin optimum değerleri belirlenmeye çalışılmış, sistemin geçici ve kalıcı rejim performansı iyileştirilmesi sağlanmıştır. GKO, sürü zekâsı temelli küresel arama yeteneği sayesinde geniş çözüm uzayını tarayabilirken, GA yerel arama yeteneği sayesinde çözümleri daha hassas bir şekilde iyileştirmektedir. Tasarlanan hibrit denetleyici literatürde yer alan, sezgisel algoritma kullanan PID denetleyiciler ile karşılaştırılmış ve performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada yakınsama analizi, geçici tepki analizi, kutup-sıfır haritası, frekans cevabı, kontrol sinyali kısıtları altında PID denetleyici davranışı incelenmiştir. Önerilen GKOGA-PID yöntemi, sıfır aşım (Mp = 0), 0,0133 s yükselme süresi (tr), 0,0241 s yerleşme süresi (ts) ve 0,0630 s pik zamanı (tp) ile diğer yöntemlere kıyasla daha iyi geçici cevap performansı sağlamıştır. Ayrıca GKOGA denetleyicisi ile, 179,05°'lik yüksek bir faz marjı ve 166,15 Hz'lik geniş bir bant genişliği değeri ile hem kararlılık hem de hızlı frekans cevabı açısından daha iyi performans değeri elde edilmiştir. Çalışmadaki bulgular, önerilen yönteminin hem sistem kararlılığını artırmaya hem de uçuş kontrol sistemlerinde daha verimli çözümler sunmaya katkı sağladığını göstermektedir.

Design of PID Controller with Genetic Algorithm Based Hybrid Algorithm with Grey Wolf Optimization for Aircraft Pitch Control

Research Article

Article History:
Received: 11.03.2025
Accepted: 28.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Aircraft pitch control
PID
Genetic algorithm
Grey wolf optimization algorithm
Hybrid optimization
Flight safety

ABSTRACT

Ensuring aircraft pitch control is a critical control problem to increase aircraft stability and maneuverability. In this study, a controller is designed to obtain a stable and sensitive dynamic response for the aircraft pitch control system. Proportional-Integral-Derivative (PID) controller parameters are optimized using a hybrid optimization approach based on Grey Wolf Optimization (GKO) and Genetic Algorithm (GA). In the proposed hybrid GKOGA-PID controller, the optimum values of the gain parameters are tried to be determined, and the transient and steady-state performance of the system is improved. While GKO can scan a wide solution space thanks to its swarm intelligence-based global search capability, GA improves the solutions more precisely thanks to its local search capability. The designed hybrid controller is compared with PID controllers using heuristic algorithms in the literature, and its performance is evaluated. In the study, convergence analysis, transient response analysis, pole-zero map, frequency response, PID controller behavior under control signal constraints are investigated. The proposed GKOGA-PID method provides better transient response

performance compared to other methods with zero overshoot (Mp = 0), 0.0133 s rise time (tr), 0.0241 s settling time (ts) and 0.0630 s peak time (tp). In addition, with a high phase margin of 179.05° and a wide bandwidth of 166.15 Hz, better performance values are obtained in terms of both stability and fast frequency response with the GKOGA controller. The findings in the study show that the proposed method contributes to both increasing system stability and providing more efficient solutions in flight control systems.

To Cite: Ateş F., Şenol R. Uçak Eğim Kontrolü için Gri Kurt Optimizasyonu ile Genetik Algoritma Tabanlı Hibrit Algoritmayla PID Denetleyici Tasarımı. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2165-2187.

1. Giriş

Kontrol sistemlerinin tasarımı ve uygulanması, birçok sektörde kritik bir rol oynamaktadır. Bu sektörlerden biri de havacılık alanıdır. Havacılıkta uçakların güvenli bir şekilde uçabilmesi aerodinamik dengenin sağlanmasına ve uçağın dinamik değişkenlerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine bağlıdır. Uçuş dinamiğinin en kritik unsurlarından biri, uçağın baş yukarı (pitch) hareketinin hassas bir şekilde kontrol edilmesidir.

Uçağın baş yukarı (pitch) hareketi; uçağın boylamasına stabilitesini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür (Bingül, 2005). Pitch kontrolü; uçağın irtifa değişimlerini yöneterek dengeli ve güvenli bir uçuş sağlar. Dolayısıyla pitch açısındaki ani değişimler hem uçuş konforunu hem de uçuş güvenliğini etkilemektedir (Ponrani ve Godweena, 2021). Bu nedenle, sistem dinamiklerinin modellenmesi ve etkili denetim algoritmalarının geliştirilmesi büyük bir gerekliliktir. Ancak aerodinamik etkiler, sistemin doğrusal olmama durumu ve dış bozucu etkenler vb. sebeplerden dolayı uçak eğim kontrolü zorlu bir mühendislik problemidir (Rehman ve ark., 2021; Idir ve ark., 2023). Bu problemi çözmek için literatürde çalışmalar yapılmaktadır.

Geleneksel Oransal-İntegral-Türev (PID) denetleyiciler problemi çözmek için literatürde yaygın olarak kullanmıştır. Ancak sistemin dinamik özellikleri nedeniyle bu denetleyicilerin performansı her zaman yeterli olmayabilir. Bu nedenle, optimizasyon tabanlı gelişmiş kontrol yaklaşımları, uçak eğim açısının hassasiyetle kontrol edilebilmesi için giderek daha fazla tercih edilmektedir (Şahin ve ark., 2022).

Yıldırım ve Savaş (2009), bir yolcu uçağının matematiksel modelini kullanarak uçağın yunuslama açısını, PID kontrolörün farklı kazanç parametrelerini kullanarak kontrol etmişlerdir (Yıldırım ve Savaş, 2009). Kaçtı ve ark. (2020), Henry gaz çözünürlük optimizasyonu (HGSO) kullanılarak uçağın alçalma/yükselme (eğim) açısını kontrol etmek için PID denetleyici tasarlamışlardır (Kaçtı ve ark., 2020). Şahin ve ark. (2020); uçak eğim kontrol sistemi için ölüm oyunu optimizasyonu (BRO) algoritması kullanarak PID ve PID-F denetleyicisi tasarlamışlardır. BRO tabanlı PID-F denetleyicisini önermişlerdir (Şahin ve ark., 2020). Abualigah ve ark. (2024), sinh cosh optimizasyonu kullanarak uçak eğim açısını kontrol eden PID-F denetleyicisi tasarlamışlardır (Abualigah ve ark., 2024). Rehman ve ark. (2021), bir uçağın eğimini kontrol etmek için PID ve doğrusal kuadratik regülatör (LQR) tasarımı yapmışlardır. Kontrolörlerin parametrelerini genetik algoritma (GA) kullanarak optimize etmişlerdir (Rehman ve ark., 2021).

Mitiku ve ark. (2024), bir Boeing 747-400 uçağın eğim kontrolü için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanarak PID denetleyici tasarlamışlar ve uçuş simülatöründen elde ettikleri gerçek verilere dayalı bir

yapay sinir ağı (ANN) kontrolörü geliştirdiklerini ifade etmişlerdir (Mitiku ve ark., 2024). Abdulla ve Mohammed (2023), uçağın eğim açısını kontrol etmek için GA kullanarak Doğrusal Kuadratik Gauss (LQG) kontrolörü tasarlamışlardır. İzci ve ark.(2020); Harris şahinleri optimizasyonu (HHO) ile PID parametrelerini optimize edip uçağın eğim açısı kontrolünde kullanmışlardır (İzci ve ark, 2020). Zaeri ve ark. (2011), bir uçağı eğimini kontrol etmek için Arılar Algoritması ile ayarlanmış Bulanık Mantık Denetleyici tasarımı üzerinde çalışmışlardır (Zaeri ve ark., 2011).

Aldeep ve Abdullah (2024), uçak eğim açısının kontrol edilebilmesi için PID denetleyiciyi manuel ayarlama, Ziegler Nichols ile ayarlama ve GA kullanarak tasarlamışladır. Frekans cevabı analizi yaptıkları çalışmalarında klasik yöntemlere kıyasla, yapay zeka yöntemi kullanılarak tasarlanan denetleyicinin sistemin performansını ve kararlılığını artırdığını belirtmişlerdir (Aldeep ve Abdullah, 2024). Bensafia ve ark. (2023), uçak eğim açısının geçici cevabını iyileştirmek için GA kullanarak kesir dereceli PID (FOPID) tasarımı yapmışlardır (Bensafia ve ark., 2023). Motea ve ark. (2018), uçak eğim kontrol sistemi için PID denetleyici ve bulanık mantık denetleyici performansını karşılaştırmışlardır. Bulanık mantık denetyeciyi önermişlerdir (Motea ve ark., 2018).

Köprücü ve Öztürk (2024), uçağa ait yunuslama açısının kontrolü için PID denetleyici tasarımında Ziegler-Nichols, Modifiye Edilmiş Ziegler-Nichols, Tyreus Luyben ve Astrom ve Hagglund yöntemlerini kullanmışlardır. Tyreus-Luyben Yöntemi kullanılarak tasarlanan PID denetleyicinin daha verimli olduğunu belirtmişlerdir (Köprülü ve Öztürk, 2024). Ceballos Benavides ve ark. (2023), bir uçağın eğim açısını kontrol etmek amacıyla kesirli dereceli doğrudan model referanslı uyarlamalı kontrolörlerin (FO-DMRAC) kullanımını araştırmışlardır. FO-DMRAC, klasik tamsayı dereceli uyarlamalı kontrolörle (IO-DMRAC) karşılaştırıldığında FO-DMRAC'nin daha az kontrol çabasıyla daha iyi performans sağladığı ifade edilmiştir (Ceballos Benavides ve ark., 2023). Okeya ve ark. (2024), bir insansız hava aracının pitch kontrolünü iyileştirmek amacıyla PSO tabanlı bir PID denetleyici tasarmı önerilmişlerdir. Önerdikleri denetleyicinin klasik PID denetleyiciye göre hava araçlarının pitch dinamiğini iyileştirmede daha başarılı olduğunu ifade etmişlerdir (Okeya ve ark., 2024).

Yukarıda literatür örneği verilen uçak eğim açısı kontrolünden farklı olarak diğer kontrol problemlerinde de PID denetleyici tasarımında meta-sezgisel algoritmaların etkinliği oldukça fazladır (Jaen-Cuellar ve ark., 2013; Chaturvedi ve ark., 2024; Poudel ve Bhandari, 2024; Zhang ve Yang, 2024). Ancak ele alınan her problemin doğası farklıdır, bu sebepten tek bir algoritma ile tüm problemlerde en iyi sonucun elde edilmesi beklenemez. Bu durum yeni algoritmaların önerilmeye devam edilmesiyle veya önerilen algoritmaların geliştirilmeye devam edilmesiyle sonuçlanmaktadır (Akyol, 2021). Uçak eğim açısının kontrolü için de literatürde HHO-PID (İzci ve ark., 2020), ASO-PID (İzci ve ark., 2020), SCA-PID (Kaçtı ve ark., 2020), GOA-PID (Kaçtı ve ark., 2020), HGSO-PID (Kaçtı ve ark., 2020), BRO-PID, GA-PID (Aldeep ve Abdullah, 2024) gibi farklı meta-sezgisel yaklaşımlar önerilmiştir. Ancak tekil algoritmaların ya keşif yeteneği yüksek ama yakınsama kabiliyetinin sınırlı olma durumuyla ya da güçlü yakınsama gösterip, yerel minimumlarda takılma eğiliminde olma durumlarıyla karşılaşılabilmektedir. Bu sebepten bu çalışmada, özgün bir yaklaşım olarak Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) ve Genetik

Algoritma'nın (GA) güçlü yönlerini birleştiren hibrit algoritma geliştirilmiştir ve uçak eğim açısının kontrolü için denetleyici tasarımında kullanılmıştır.

GKO, keşif-yönelimli arama stratejisine ve hızlı yakınsama özelliklerine sahipken (Mirjalili ve ark., 2014; Güven ve Yörükeren, 2022), GA ise küresel optimuma ulaşmayı kolaylaştıran genetik operatörleriyle çözüm çeşitliliğini koruyarak daha geniş bir arama alanını tarayabilme özellikleri ile bilinir (Özçakar, 1998). Bu iki algoritmanın hibrit bir şekilde kullanımı ile bir yandan GKO'nun yüksek verimli yönlendirilmiş arama yeteneği, diğer yandan GA'nın genetik çeşitlilik sağlayarak yerel minimumlardan kaçınma özelliğinin tek bir algoritmada toplanması amaçlanmıştır. Önerilen hibrit yaklaşım, uygulamalar da tek algoritmadan oluşan meta-sezgisel yöntemlere kıyasla daha kararlı ve optimize çözümler sunmuştur ve çözüm kalitesinde anlamlı iyileşmeler sağlamıştır. Bu çalışma, hibrit algoritmaların potansiyelini somut bir örnekle ortaya koymaktadır. Uçak eğim açısının kontrolü için denetleyici tasarımında yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

Çalışmada uçağın eğim açısını kontrol etmek GKOGA-PID kontrolör tasarımı yapılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak Zwe-Lee Gaing (ZLG) kullanılmıştır. Tasarlanan denetleyicinin yakınsama analizi, geçici tepki analizi, kutup-sıfır haritası, frekans cevabı analizi yapılmış, kontrol sinyali kısıtları altında PID denetleyici davranışı incelenmiştir. Tasarlanan GKOGA-PID denetleyicinin performansı literatürdeki ölüm oyunu optimizasyonu (BRO), harris şahinleri optimizasyonu (HHO), atom arama optimizasyonu (ASO), sinüs kosinüs algoritması (SCA), çekirge optimizasyon algoritması (GOA), henry gaz çözünürlük optimizasyonu (HGSO) ve GA' dan oluşturulan PID denetleyiciler ile karşılaştırılmıştır.

Makalenin kalan bölümleri aşağıdaki gibi yapılandırılmıştır. İkinci bölümde materyal ve metot bölümüne yer verilmiştir. Üçüncü bölüm araştırma bulgularından oluşmaktadır. Son olarak dördüncü bölümde ise çalışmanın genel sonuçları sunularak gelecekte yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

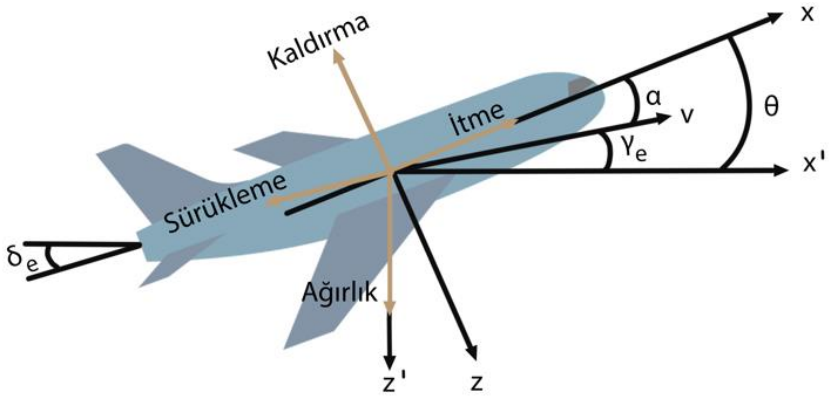
Çalışmanın materyal bölümünde, çalışmada ele alınan sitemin matematiksel modeline, PID denetleyicisi ile ilgili genel bilgilere, önerilen optmizasyon algoritması ile ilgili bilgilere ve çalışmada kullanılan amaç fonksiyonuna ilişkin bilgiye yer verilmiştir. Çalışmanın metot bölümünde ise çalışmada kullanılan yöntem akış şeması ile desteklenerek açıklanmıştır.

2.1. Materyal

Çalışmanın bu bölümünde uçak eğim sisteminin matematiksel modeli, PID denetleyicisi, önerilen algoritma tekniğine ilişkin bilgiler ve amaç fonksiyonuna ait bilgiler verilmiştir.

2.1.1. Sistemin Matematiksel Modeli

Uçağın hareketi doğrusal olmayan 6 adet karmaşık diferansiyel denklem ile ifade edilir. Denklemler bazı varsayımlar kullanılarak doğrusallaştırılıp boylamsal ve yanal denklemler olarak ayrılabilir. Bir uçağa uygulanan kuvvetler şekil 1'de verilmiştir (Bingül, 2005; Control Tutorials for MATLAB and Simulink, 2012).



Şekil 1. Uçağa uygulanan kuvvetler

Uçağın sabit yükseklikte ve hızda gittiği düşünülürse, uçağa uygulanan itme ve çekme kuvvetleri birbirini yok edecektir. Bu durumda kaldırma kuvveti ve uçağın ağırlık kuvveti birbirini dengeler. Uçağın yükseklik açısındaki değişimin uçağın hızını değiştirmeyeceği de varsayılırsa boylamsal hareket denklemleri denklem 1-3'deki gibi yazılabilir. Denklemlere ait katsayıların karşılık değerleri Tablo 1' de verilmiştir (Bingül, 2005; Control Tutorials for MATLAB and Simulink, 2012).

Tablo 1. Uçağın boylamsal hareket denklemlerine ait katsayıların karşılık değerleri

Uçak Eğim Sistemi Değişkeni	**Anlamı**	**Uçak Eğim Sistemi Değişkeni**	**Anlamı**
$\boldsymbol{\alpha}$	Saldırı Açısı	U	Dengedeki Uçuş Hızı
$\boldsymbol{q}$	Yükseklik Oranı	C_T	İtme Katsayısı
$\boldsymbol{\theta}$	Yükseklik Açısı	C_D	Çekme Katsayısı
$\boldsymbol{\delta_e}$	İrtifa Sapma Açısı	C_L	Kaldırma Kuvveti Katsayısı
$\boldsymbol{\mu = \frac{\rho_e S \bar{c}}{4m}}$		C_W	Ağırlık Katsayısı
$\boldsymbol{\rho_e}$	Hava Yoğunluğu	C_M	Eğim Momenti Katsayısı
$\boldsymbol{S}$	Kanat Alanı	γ_e	Uçuş Yörünge Açısı
$\boldsymbol{\bar{c}}$	Ortalama Kiriş Uzunluğu	$\sigma = \frac{1}{1+\mu C_L}$	Sabit
$\boldsymbol{m}$	Uçağın Kütlesi	$\eta = \mu\sigma C_L$	Sabit
$\boldsymbol{\Omega = \frac{2U}{\bar{c}}}$		i_y	Normalize Edilmiş Atalet Momenti

$$\dot{\alpha} = \mu\Omega\sigma[-(C_L + C_D)\alpha + \left(\frac{1}{\mu} - C_L\right) q - (C_W \sin\gamma_e)\theta + C_L] \quad (1)$$

$$\dot{q} = \frac{\mu\Omega}{2i_y}\{[C_M - \eta(C_L + C_D)]\alpha + [C_M + \sigma C_M(1 - \mu C_L)]q + (\eta C_W \sin\gamma_e)\delta_e\} \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \Omega q \quad (3)$$

Boeing ticari uçak verisinden elde edilen sayısal büyüklükler diferansiyel denklemlerde yerine konulduğunda aşağıdaki denklem 4-6 arasında verilen yeni denklemler elde edilir (Bingül, 2005; Control Tutorials for MATLAB and Simulink, 2012).

$$\dot{\alpha} = -0{,}313\alpha + 56{,}7q + 0{,}232\delta_e \quad (4)$$

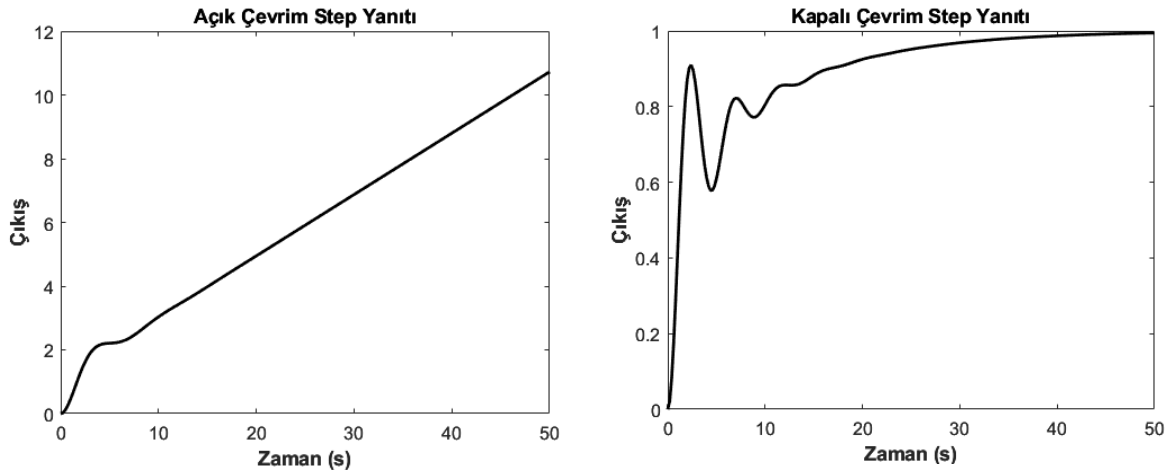
$$\dot{q} = -0{,}0139\alpha - 0{,}426q + 0{,}0203\delta_e \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = 56{,}7q \quad (6)$$

Denklemlerin laplace dönüşümleri yapıldığında irtifa sapma açısı giriş, yükseklik açısı çıkış olacak şekilde sistemin transfer fonksiyonu denklem 7'de gösterildiği gibi elde edilir (Bingül, 2005; Control Tutorials for MATLAB and Simulink, 2012).

$$\frac{\theta(s)}{\delta_e(s)} = \frac{1.151s+0.1774}{s^3+0.739s^2+0.921s} \quad (7)$$

Uçak eğim sisteminin 0,2 rad (11 derece) için açık çevrim cevabı şekil 2(a)'da, kapalı çevrim cevabı ise şekil 2(b)'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 2. Uçak eğim sisteminin 0.2 basamak girişe gösterdiği tepki **(a)** Açık çevrim cevabı**; (b)** Kapalı çevrim cevabı

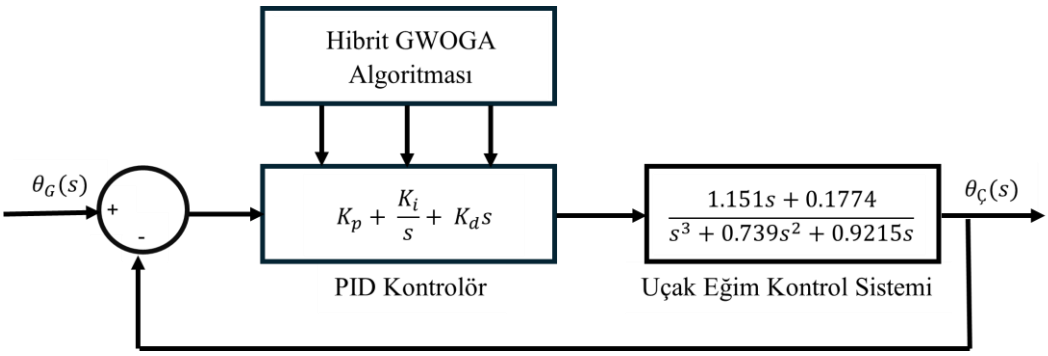
2.1.2. PID Denetleyicisi

Geri besleme esasına dayalı olarak çalışan PID denetleyicisi, endüstride en yaygın kullanılan denetleyici türlerinden biridir. Bir sistemin istenen çıkış değerine ulaşmasını sağlamak, sistemi bozucu etkilere karşı korumak PID kontrolörünün temel amaçlarındandır. PID, oransal (P), integral (I) ve türev (D) olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Oransal terim, hata sinyaline doğrudan tepki vererek hızlı bir yanıt sağlarken integral terim, sistemin uzun vadede hata birikimini azaltarak kararlı bir durumda kalmasını sağlar. Türev terimi ise ani değişimlere duyarlı olup sistemin aşırı tepki vermesini engelleyerek dengeyi korur. Bu üç bileşenin birlikte çalışması, PID kontrolörünü birçok dinamik sistem için ideal bir hale getirmektedir (Gong ve ark., 2024; Zhao ve ark., 2025).

PID kontrolörler basit yapıdadırlar ve geniş kullanım alanına sahiptirler. PID kontrolörler kontrol edilecek sistemin matematiksel modeline tam olarak bağımlı değildirler bu durum PID'nin farklı süreçlere kolayca uygulanmasını sağlar. Ayrıca; geçmiş, mevcut ve gelecekteki hata bilgilerini değerlendirerek sistemin daha kararlı ve hassas çalışmasını sağlarlar. PID denetleyicilerin avantajlarından bir diğeri, klasik kontrol yöntemlerine kıyasla daha az hesaplama gerektirmesi ve uygulanabilirliğinin yüksek olmasıdır. Ancak PID denetleyiciler, sistem parametrelerindeki değişimlere karşı duyarlılık gösterebilir ve doğru ayarlama yapılmadığında kararsız bir davranış sergileyebilirler. Dolayısıyla, PID kontrolörünün en iyi performansı gösterebilmesi için uygun parametre ayarlamalarının yapılması büyük önem taşımaktadır (Kumar ve Hote, 2025; Zhao ve ark., 2025). PID kontrolörün transfer fonksiyonu denklem 8'de verilmiştir.

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{8}$$

Denklem 8'de K_p oransal kazanç, K_i integral kazancı ve K_d türev kazancıdır (Micev ve ark., 2021). PID denetleyicisine sahip uçak eğim açısı kontrol sisteminin blok şeması ise şekil 3'te verilmiştir. Sisteme ait transfer fonksiyonu denklem 9'da tanımlanmıştır.



Şekil 3: Uçak eğim açısı kontrol sistemi

$$\frac{\theta_Ç(s)}{\theta_G(s)} = \frac{(K_d s^2 + K_p s + K_i)(1.151s + 0.1774)}{s(s^3 + 0.739s^2 + 09215s) + (K_d s^2 + K_p s + K_i)(1.151s + 0.1774)} \tag{9}$$

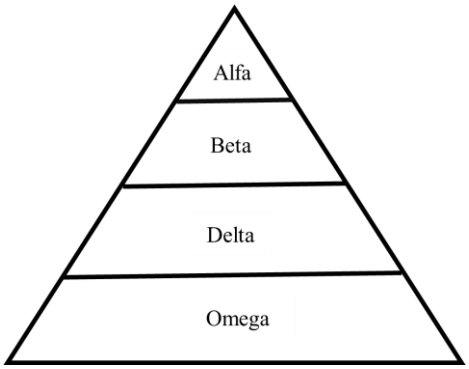
Önerilen Algoritma Tekniği

Bu bölümde tasarlanan hibrit algoritmanın temel parçası olan GA ve GKO algoritması hakkında temel bilgiler verilmiştir. Ayrıca tasarlanan hibrit algoritmanın yapısı hakkında bilgiler verilmiştir.

2.1.2.1. GKO Algoritması

Mirjalili ve ark. tarafından 2014 yılında önerilmiş olan GKO algoritması, doğadaki gri kurtların liderlik hiyerarşisini ve avlanma mekanizmasını taklit eden bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir (Mirjalili, 2014).

Doğada gri kurtlar belirli bir liderlik hiyerarşisi içerisinde hareket ederler. Alfa (α), Beta (β), Delta (δ) ve Omega (ω) kurtları olarak isimlendirilen bu yapı, GKO algoritmasının temelini oluşturan dört farklı kurt sınıfını içermektedir. Alfa kurtlar, sürünün liderleri olup kararları sürü tarafından kabul edilen baskın kurttur. Beta kurtları, alfa kurtlara yardımcı olan ve sürünün organizasyonunda önemli bir rol oynayan bireyleri temsil etmektedir. Beta kurtları diğer kurtlar içerisinde alfa olmak için en iyi adaydır. Delta kurtları, alfa ve beta kurtlarına boyun eğen ancak omega kurtlarına hükmeden kurtlardır. En alt seviyede ise omega kurtları bulunur ve bu kurtlar sürünün en zayıf üyeleri olarak kabul edilir. Algoritmaya ait hiyerarşi zinciri şekil 4'te verilmiştir (Mirjalili, 2014).



Şekil 4: GKO hiyerarşisi

GKO algoritmasında, popülasyon içerisindeki en iyi çözüm alfa olarak belirlenirken, ikinci ve üçüncü en iyi çözümler sırasıyla beta ve delta olarak adlandırılır. Geriye kalan çözümler ise omega olarak modellenir. Uygulanması kolay ve az sayıda kontrol parametresi gerektiren bu algoritma, özellikle GA, PSO ve ateş böceği algoritması (FA) gibi popülasyon tabanlı optimizasyon tekniklerine kıyasla daha iyi yakınsama özelliğine sahip olduğu bilinmektedir (Toren ve Mollahasanoğlu, 2023).

GKO' nun optimizasyon süreci, gri kurtların doğadaki avlanma davranışlarına dayanmaktadır. Bu süreç; avı izleme ve takip etme, çevreleme ve saldırma aşamalarından oluşur. Algoritmanın ilk aşamasında kurtlar, arama uzayında rastgele bir şekilde konumlandırılır ve hedef çözümün yeri belirlenmeye çalışılır. Maliyet fonksiyonuna göre bulunan uygunluk değerlerinden; alfa, beta ve delta kurtları belirlenir. Bu kurtlar, avın en iyi konumunu temsil ederek diğer kurtlara rehberlik eder. Omega kurtlar ise bu lider kurtları takip ederek hareket eder. Optimizasyon sırasında her kurt, kendi pozisyonunu lider kurtların konumlarına göre güncelleyerek en iyi çözüme doğru yönlendirilir (Şenel ve ark., 2018).

2.1.2.2. GA

1975 yılında John Holland tarafından ortaya konan GA, biyolojik evrim süreçlerinden esinlenerek geliştirilmiş sezgisel optimizasyon yöntemlerindendir (Holland, 1975). Algoritma, doğal seçilim prensibini temel alarak en iyi bireyin hayatta kalmasını ve gelişmesini amaçlamaktadır. Genetik algoritmalarda, rastgele çözümler içeren bir popülasyon oluşturulur ve iteratif olarak bu çözümler geliştirilir sonuçta en uygun çözüm elde edilmeye çalışılır (Vatansever ve Şen, 2013).

Algoritmada, öncelikle belirli kriterlere göre rastgele bireylerden oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Daha sonra, uygunluk fonksiyonu kullanılarak her bireyin probleme uygunluğu değerlendirilir. Uygulama sonucunda uygunluk değeri yüksek bireylere, çaprazlama ve mutasyon olarak adlandırılan genetik operatörler kullanılarak yeni nesiller oluşturulur. Çaprazlama, iki bireyin genetik bilgisini birleştirilmesi ile yeni bireyin oluşturulmasıdır. Mutasyon ise, rastgele değişiklikler yaparak popülasyon çeşitliliğinin arttırılması işlemidir. Mutasyonla yeni çözüm bölgelerinin keşfedilmesini sağlanır (Daş ve ark., 2006).

GA yöntemi, karmaşık optimizasyon problemlerine uygulanabilir ve çözümler üretebilir. Sezgisel bir yöntem olduğundan dolayı kesin çözüm garantisi bulunmasa da, büyük arama uzaylarına sahip problemlerde etkili bir yaklaşım sunar. GA, birçok alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Mühendislik, yapay zeka, makine öğrenmesi ve veri bilimi gibi alanlar örnek olarak verilebilir. Algoritmanın başarısı, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı vb. uygun parametrelerin seçimi ve uygunluk fonksiyonunun doğru tanımlanmasına bağlıdır (Vatansever ve Şen, 2013; Keklik ve Özcan, 2023).

2.1.2.3. GKOGA

Çalışmada PID kontrolörünün parametrelerini optimize etmek için GKO ve GA' dan oluşan bir hibrit algoritma tasarlanmıştır. Oluşturulan algoritma adım adım açıklamalı olarak verilmiştir.

- Tasarlanan algoritma; iterasyon sayısı, popülasyon büyüklüğü, çözüm boyutu, PID parametreleri için alt-üst sınır, amaç fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılacak ZLG ağırlık katsayısı gibi kullanılacak parametrelerin belirlenmesi ile başlar.
- Daha sonra tanımlanan arama uzayı sınırları içerisinde başlangıç popülasyonu oluşturulur, rastgele bireyler üretilir.
- Oluşturulan popülasyonun bireyleri PID parametrelerini temsil etmekte olup her bireyin uygunluk değeri ZLG'ye göre hesaplanır ve en iyi çözüm alfa kurt olarak kaydedilir. Alfa kurt algoritmanın lider çözümü olarak değişkene atanır.
- Algoritmanın ana döngüsü iterasyon sayısı kadar tekrarlayacak şekilde başlatılır.
- İterasyonda öncelikle gri kurt optimizasyonu ile her bireyin konumu, mevcut en iyi birey olan alfa kurdun konumuna göre güncellenir.
- Gri kurt optimizasyonu aşamasına ait A ve C katsayı vektörleri denklem 10 ve denklem 11' e göre tanımlanır, beta ve delta kurtları her iterasyonda güncellenir.

$$A = 2 \,.\, a \,.\, r_1 - a \tag{10}$$

$$C = 2 \,.\, r_2 \tag{11}$$

Denklem 10 ve 11'de a iterasyonlar boyunca 2'den 0'a doğru azalan değeri gösterirken r_1 ve r_2 ise [0,1] arasında rastgele vektörlerdir (Mirjalili ve ark., 2004).

- GKO algoritmasının avın etrafını sarmasını ve sürekli olarak pozisyonlarını güncelleyerek avın hareketlerini takip etmesini simüle eden denklemler, denklem 12 ve 13'te verilmiştir (Mirjalili ve ark., 2004). Algoritmaya bu adımda denklem 12 ve 13 uygulanmıştır.

$$D = \left|C \,.\, X_p(t) - X(t)\right| \quad (12)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \,.\, D \quad (13)$$

Burada t mevcut iterasyonu, X_p avın konum vektörünü, X gri kurdun konum vektörünü temsil eder. Bu denklemlerle, kurtların avın etrafında rastgele konumlara geçiş yapması sağlanır.

- Alfa, beta ve teta' nın en iyi konumları denklem 14' e göre bulunur (Mirjalili ve ark., 2004). Algoritmaya bu adımda denklem 14 uygulanmıştır.

$$\overrightarrow{D_\alpha} = \left|\overrightarrow{C_1}.\overrightarrow{X_\alpha} - \vec{X}\right|, \quad \overrightarrow{D_\beta} = \left|\overrightarrow{C_2}.\overrightarrow{X_\beta} - \vec{X}\right|, \quad \overrightarrow{D_\delta} = \left|\overrightarrow{C_3}.\overrightarrow{X_\delta} - \vec{X}\right| \quad (14)$$

- Alfa, beta ve teta kurtlarının konumları denklem 15' e göre hesaplanır (Mirjalili ve ark., 2004). Algoritmaya denklem 15 bu aşamada uygulanmıştır.

$$\overrightarrow{X_1} = \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_1} \,.\, (\overrightarrow{D_\alpha}), \quad \overrightarrow{X_2} = \overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{A_2} \,.\, (\overrightarrow{D_\beta}), \quad \overrightarrow{X_3} = \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{A_3} \,.\, (\overrightarrow{D_\delta}) \quad (15)$$

- Alfa, beta ve teta kurtlarının konumlarının ortalaması alınarak diğer bireylerin yönlendirilmesi sağlanır. İlgili denklem, denklem 16 ile verilmiştir (Mirjalili ve ark., 2004). Gri kurt optimizasyonu kısmına ait son aşamada ise denklem 16 uygulanmıştır.

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_2} + \overrightarrow{X_3}}{3} \quad (16)$$

- GKO sürecinden sonra GA süreci başlatılır.
- Popülasyon uygunluk çözümüne göre sıralanır, ebeveyn havuzu oluşturulur.
- Çaprazlama noktalarının rastgele olarak belirlenmesi ile tek noktalı çaprazlama kullanılarak ebeveynlerden yeni bireyler oluşturulur.
- Daha sonra oluşturulan bireyler üzerinde küçük bir olasılıkla (0.1) tek nokta mutasyon işlemi uygulanır. Burada popülasyon çeşitliliğinin artırılması ve yerel minimumlardan kaçınmak amaçlanmıştır.
- Yeni oluşturulan bireyler, ebeveynler ile birleştirilerek yeni popülasyon elde edilir.
- Yeni popülasyondaki tüm bireylerin uygunluk değeri hesaplanır.
- En iyi çözüm tekrar güncellenir, ZLG değeri kaydedilir.
- Döngü tamamlandığında en iyi uygunluk değerine sahip çözüm k_p, k_i, k_d değişkenleri olarak atanır.

2.1.3. Amaç Fonksiyonu

Kontrol sistemleri için kontrolör tasarlanırken, tasarlanan sistemin performansını değerlendirmek ve iyileştirmek amacıyla farklı amaç fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu amaç fonksiyonlarından biri ZLG'dir. ZLG, PID ve diğer denetleyicilerin optimizasyonunda etkin bir değerlendirme kriteri olarak öne çıkmaktadır (Ali ve ark., 2021; Şahin ve ark., 2022).

ZLG amaç fonksiyonunun matematiksel ifadesi denklem 17 ile ifade edilir:

$$ZLG = \left(1 - e^{-\beta}\right)\left(M_p + E_{ss}\right) + e^{-\beta}(t_s - t_r) \quad (17)$$

Burada; M_p maksimum aşımı, E_{ss} kalıcı durum hatasını, t_s yerleşme zamanını, t_r yükselme zamanını, β ise ağırlık faktörünü temsil eder.

ZLG amaç fonksiyonunda β değeri genellikle 1 olarak seçilmektedir. Bu fonksiyon, sistemin hem dinamik hem de kararlı durum performansını dikkate alarak optimize edilmesini sağlar (Şahin ve ark., 2022).

PID denetleyici tasarımı için bu çalışmada oluşturulan hibrit GKO-GA algoritmasında amaç fonksiyonu olarak kullanılan Zwe-Lee Gain (ZLG) metriğindeki Beta parametresi de 1 olarak sabitlenmiştir. Bu seçim, aşımı ve sabit durum hatasını azaltmak için tercih edilir. Ancak Beta = 1 seçimi, özellikle ani giriş değişimlerinde sistemin aşırı tepki verme (overshoot) eğilimini artırabilir. Daha düşük Beta değerleri (örneğin 0.6–0.9), hata bileşeninin etkisini aşama aşama azaltarak daha yumuşak bir kontrol yanıtı ve daha kararlı bir optimizasyon süreci sağlayabilir. Bu nedenle, farklı Beta değerleri kullanılarak tasarlanan modeller, ZLG metriğinin PID optimizasyon sonuçlarına olan etkisini daha net ortaya koyabilir (Gaing, 2004).

2.2. Metot

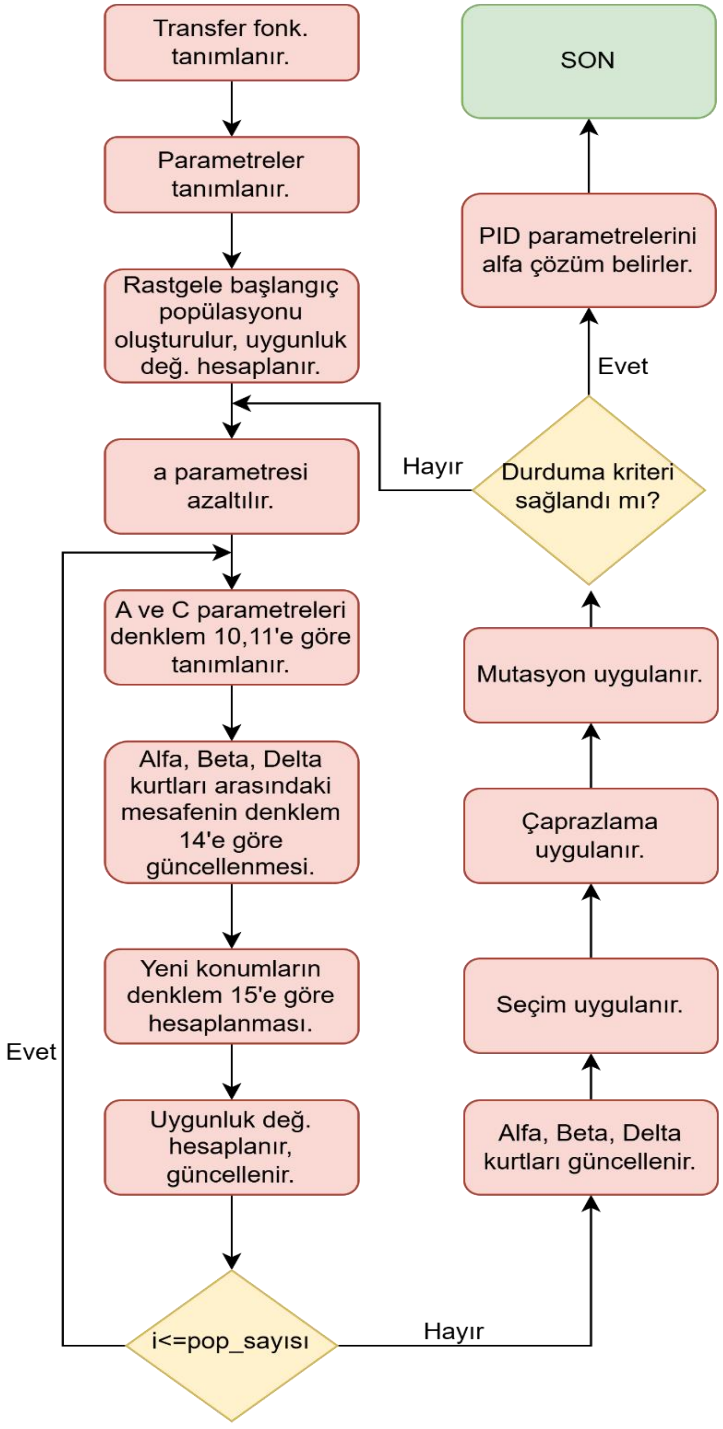
Bu çalışmada, PID parametrelerinin optimizasyonu için GKO ve GA hibrit yaklaşımı kullanılmıştır. Yöntemde önce sistemin transfer fonksiyonu ve optimizasyon parametreleri tanımlanmıştır. Tasarlanan denetleyicinin parametrelerine ait veriler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Optimizasyon parametreleri

Parametre	**Değer**
Popülasyon Büyüklüğü	30
Maksimum İterasyon Sayısı	100
Boyut (PID Parametreleri)	3 (Kp, Ki, Kd)
Alt Sınırlar (lb)	[0.1, 0.1, 0.1]
Üst Sınırlar (ub)	[150, 150, 150]
ZLG Ağırlık Faktörü (beta)	1
Başlangıç Tohum Değeri	Rasgele
Seçilim Yöntemi	Turnuva
Çaprazlama Oranı	0.8
Mutasyon Oranı	0.1
Durdurma Kriteri	Maksimum İterasyon
Gri Kurt İvme Katsayısı (a)	2 - iterasyon*(2/iterasyon sayısı)

Arama uzayı için alt ve üst sınırlar 0.1-150 aralığında tanımlanmıştır. Sonra rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulmuş ve ilk uygunluk değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra a parametresi azaltılması, A ve C parametreleri belirlenmesi, alfa, beta ve delta kurtları arasındaki mesafelerin güncellenmesi, yeni konumlar hesaplanarak uygunluk değerleri güncellenmesi aşamaları uygulanmıştır.

Daha sonra GA'ya ait özellikler olan seçim, çaprazlama ve mutasyon uygulanmıştır. Durdurma kriteri sağlanana kadar döngü devam etmiş olup işlem sonlandığında en iyi çözüm (Alfa kurdu) PID parametreleri olarak atanır. Bu metodoloji, optimizasyon sürecinin etkinliğini artırarak daha hızlı ve daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlar. Sisteme ait akış şeması şekil 5'te verilmiştir.



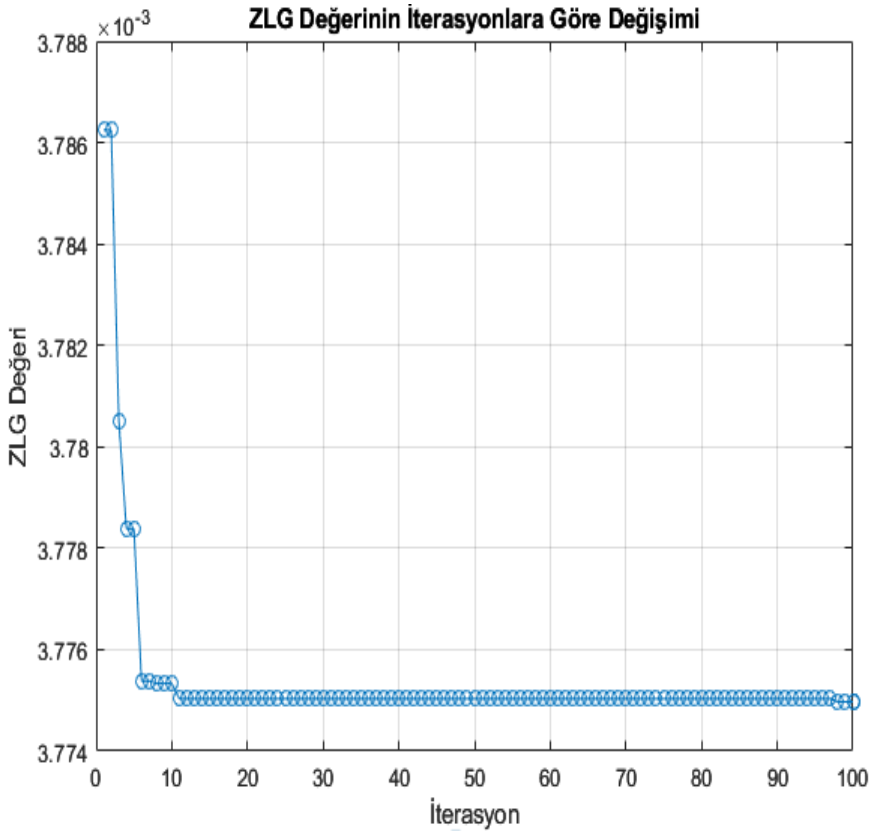
Şekil 5. Akış şeması

3. Araştırma Bulguları

Çalışmanın bu bölümünde uçak eğim açısının kontrolü için tasarlanan GKOGA-PID denetleyicinin sonuçları literatürdeki PID denetleyici tasarımları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Simülasyon çalışmaları MATLAB 2022b kullanılarak elde edilmiştir.

3.1. Yakınsama Analizi

Optimizasyon algoritmalarının başarımlarını değerlendirmek için uygunluk (fitness) değerlerinin iterasyonlara göre değişimi analiz edilir. Bu analiz sayesinde algoritmanın ne kadar sürede kararlı bir çözüme ulaştığı, arama alanında nasıl bir yol izlediği, global minimuma yakınsama davranışı gibi durumlar anlaşılabilir. Çalışmada geliştirilen GKOGA algoritmasının da ZLG değerleri üzerinden yakınsama davrnışı şekil 6'da verilmiştir.

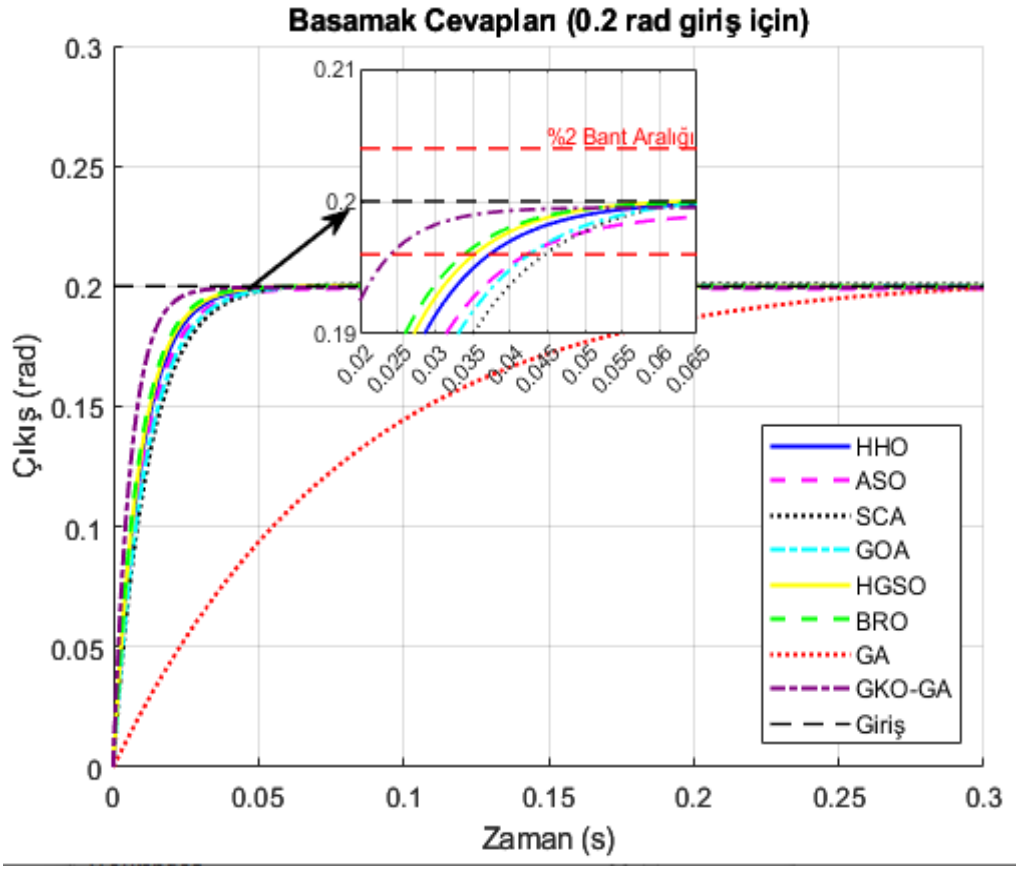


Şekil 6. Yakınsama grafiği

Şekil 6'da ZLG değerlerinin iterasyon sayısı arttıkça belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmektedir. ZLG değerinde başlangıçta hızlı bir şekilde iyileşme görülmektedir, sonra eğri iyileşmesi yavaşlamış ve stabilize duruma gelmiştir. Algoritmanın bu yanıtı, etkin bir şekilde en iyi çözümü aradığını ve bir süre sonra yakınsama sağladığını göstermektedir. Eğrinin sonunda oluşan yataylık, algoritmanın daha iyi çözümler bulamadığını ve yakınsama durumunu gerçekleştirdiğini göstermektedir. Algoritma; ilk iterasyonlarda hızlı iyileşmeler sağlamış, ilerleyen iterasyonlarda ise çözüm kalitesini artırmaya çalışmıştır.

3.2. Frekans Cevabı

Kontrol sistemleri için denetleyici tasarlandığında, tasarlanan denetleyicinin maksimum aşım, yerleşme zamanı, oturma zamanı, tepeye erişme zamanı gibi performans kriterleri analiz edilir. Aşımın az olması yerleşme, oturma, tepeye erişme zamanlarının ise düşük olması istenir. Çalışmada tasarlanan GKOGA-PID denetleyici literatürde yer alan HHO-PID (İzci ve ark., 2020), ASO-PID (İzci ve ark., 2020), SCA-PID (Kaçtı ve ark., 2020), GOA-PID (Kaçtı ve ark., 2020), HGSO-PID (Kaçtı ve ark., 2020), BRO-PID (Şahin ve ark.,2022) denetleyicileri karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de denetleyicilerin giriş irtifa sapma açısı θ=0.2 rad için basamak giriş cevapları geçici cevap analizleri çizdirilmiştir. Denetleyicilerin yerleşme ve aşma sürelerinin daha net anlaşılabilmesi için küçük dikdörtgen çizim kullanılarak grafiğin net gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Küçük dikdörtgen grafikten %2 bant aralığına göre tasarlanan ve karşılaştırılan denetleyicilerin yerleşme süreleri gözlemlenebilir. Ayrıca uçak eğim açısı için tasarlanmış olan denetleyicinin performans kriterleri literatürdeki PID denetleyicilerle karşılaştırmalı olarak Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te geçici cevap analizleri verilen denetleyicilerin PID parametreleri (K_p, K_i, K_d katsayıları) de yer almaktadır. Buna göre tasarlanan GKOGA-PID denetleyicinin diğer PID denetleyicilerden daha optimum sonuçlar verdiği gözlemlenebilir.



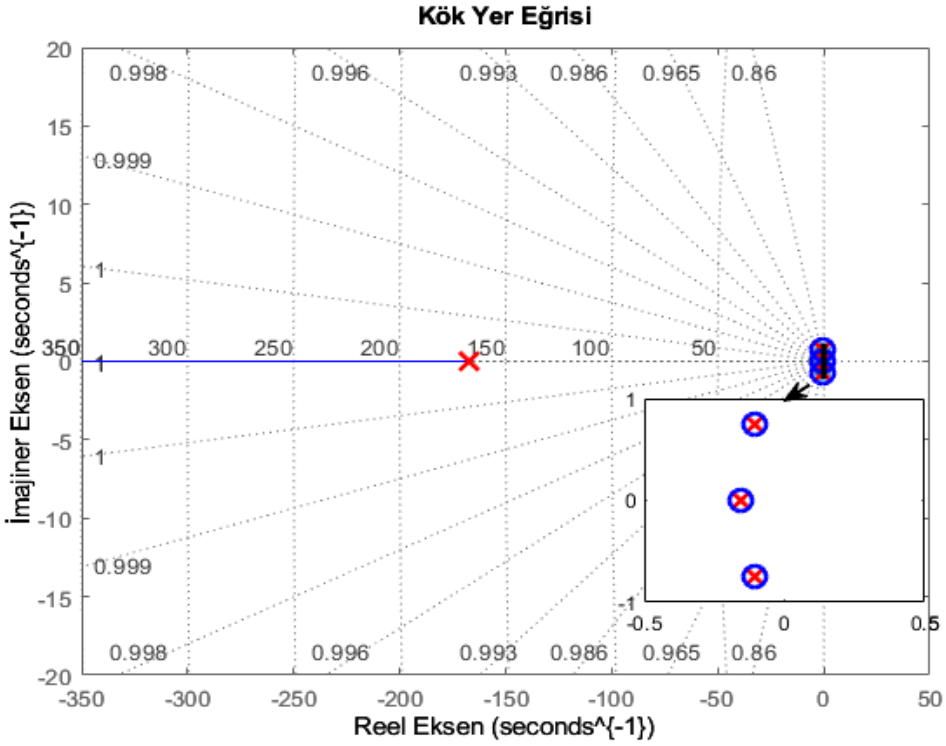
Şekil 7. Denetleyicilerin $\theta = 0.2\ rad$ için basamak giriş cevapları

Tablo 3. Denetleyicilerin geçici cevap analizleri ve PID denetleyici parametreleri

Denetleyici	Geçici Cevap Analizi				PID Denetleyici Parametreleri		
	Mp	ts	tr	tp	Kp	Ki	Kd
HHO-PID (İzci ve ark., 2020)	0	0,0373	0,0210	0,1020	55,2698	51,4031	90,9434
ASO-PID (İzci ve ark., 2020)	0	0,0423	0,0229	0,1022	17,3672	24,2791	84,5323
SCA-PID (Kaçtı ve ark., 2020)	0,3464	0,0447	0,0260	0,2007	70,8938	64,8932	72,4551
GOA-PID (Kaçtı ve ark., 2020)	0,1158	0,0426	0,0244	0,2002	63,8156	21,5434	77,6758
HGSO-PID (Kaçtı ve ark., 2020)	0	0,0352	0,0200	0,2000	69,7726	3,6054	95,1465
BRO-PID (Şahin ve ark.,2022)	0	0,0338	0,0191	0,0855	63,6688	11,5507	99,9028
GA-PID (Aldeep ve Abdullah, 2024)	5,79	1,25	0,204	0,619	10,0000	7,8120	10,8440
GKOGA-PID (önerilen)	0	0,0241	0,0133	0,0630	30,2615	81,2959	145,0283

3.3. Kök Yer Analizi

Kök- yer analizi yapılarak tasarlanan bir denetleyicinin kararlılığı sağlayıp sağlamadığı hakkında bilgi edinilebilir. Çalışmada uçak eğim açısı için tasarlanan denetleyicinin kutup-sıfır analizi Matlab' de "rlocus" komutu kullanılarak yapılmıştır. Tasarlanan denetleyicinin kök-yer eğrisi grafiği şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde; kapalı çevrim kutuplarının sol yarı düzlemde yer aldığı gözlemlenmektedir. Bu durum sistemin kararlı olduğunu ifade etmektedir. Çalışmadaki denetleyici ve karşılaştırılan literatürdeki PID denetleyicilerin kapalı çevrim sisteminin kutupları ve karşılık gelen sönüm oranları da Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'ten tasarlanan ve literatürde yer alan denetleyicilerin kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.



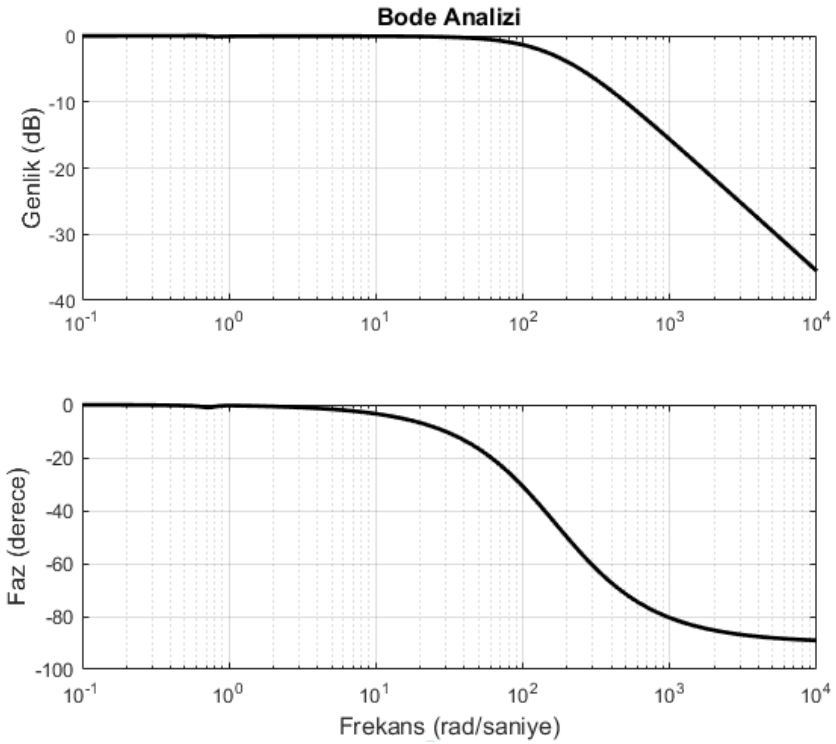
Şekil 8: Tasarlanan GKOGA-PID denetleyicinin kök yer analizi

Tablo 4. Uçak eğim açısı için tasarlanan denetleyicilerin kapalı çevrim kutupları ve karşılık gelen sönüm oranları

Denetleyici	Kapalı Çevrim Kutupları	Sönüm Oranları
HHO-PID (İzci ve ark., 2020)	-0,155	1
	-0,305+0,686i	0,4062
	-0,305-0,686i	0,4062
	-104,65	1
ASO-PID (İzci ve ark., 2020)	-0,1549	1
	-0,1048+0,5232i	0,1963
	-0,1048-0,5232i	0,1963
	-97,6713	1
SCA-PID (Kaçtı ve ark., 2020)	-0,1545	1
	-0,4910+0,8106i	0,5181
	-0,4910-0,8106i	0,5181
	-82,9991	1
GOA-PID (Kaçtı ve ark., 2020)	-0,1554	1
	-0,4144+0,3226i	0,7890
	0,4144-0,3226i	0,7890
	-89,1604	1
HGSO-PID (Kaçtı ve ark., 2020)	0,0564	1
	-0,1507	1
	-0,6887	1
	-109,3578	1
BRO-PID (Şahin ve ark., 2022)	-0,159	1
	-0,320+0,101i	0,954
	-0,320-0,101i	0,954
	-115	1
GKOGA-PID (önerilen)	-167,3026	1,0000
	-0,1048+0,74i	0,1402
	-0,1048-0,74i	0,1402
	-0,1543	1,0000

3.4. Bode Analizi

Bode analizi kontrol sistemlerinin frekans tepkileri hakkında fikir verir. Tasarlanan denetleyicilerin bode analiz grafikleri şekil 9'da verilmiştir. Bode analizinden elde edilen kazanç payı, faz payı ve bant genişliği gibi değerler literatürdeki PID denetleyiciler ile karşılaştırmalı olarak Tablo 5'te verilmiştir. Çalışmada tasarlanan denetleyicinin bode analizi Matlab' de "bode" komutu kullanılarak yapılmıştır. Bode analiziyle, tasarlanan denetleyicinin ve literatürde yer alan denetleyicilerin frekans tepkisindeki kararlılık karşılaştırmaları yapılabilir. Bode analizinden çıkarılan kazanç payı, faz payı ve bant genişliği değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Bode analizinde kazanç payının sonsuz olması, faz payının 180 dereceye yakın olması, bant genişliğinin yüksek değerde olması istenir (Şahin ve ark., 2022). Çalışmada tasarlanan GKOGA-PID yönteminin çok iyi sonuç verdiği gözlemlenebilir.



Şekil 9. Tasarlanan GKOGA-PID denetleyicinin bode çizimi

Tablo 5. Uçak eğim açısı için tasarlanan denetleyicilerin bode çizimlerinden çıkarılan sonuçlar

PID Kontrolör	Kazanç Payı (dB)	Faz Payı (Derece)	Bant Genişliği (Hz)
HHO (İzci ve ark., 2020)	∞	179,5243	104,4541
ASO (İzci ve ark., 2020)	∞	178,5423	96,6898
SCA (Kaçtı ve ark., 2020)	∞	174,4418	83,5953
GOA (Kaçtı ve ark., 2020)	∞	175,9787	89,4385
HGSO (Kaçtı ve ark., 2020)	∞	177,3049	109,4116
BRO (Şahin ve ark., 2022)	∞	179,6000	114,7877
GKOGA (önerilen)	∞	179,0472	166,1549

3.5. Kontrol Sinyali Kısıtları Altında PID Denetleyici Davranışı

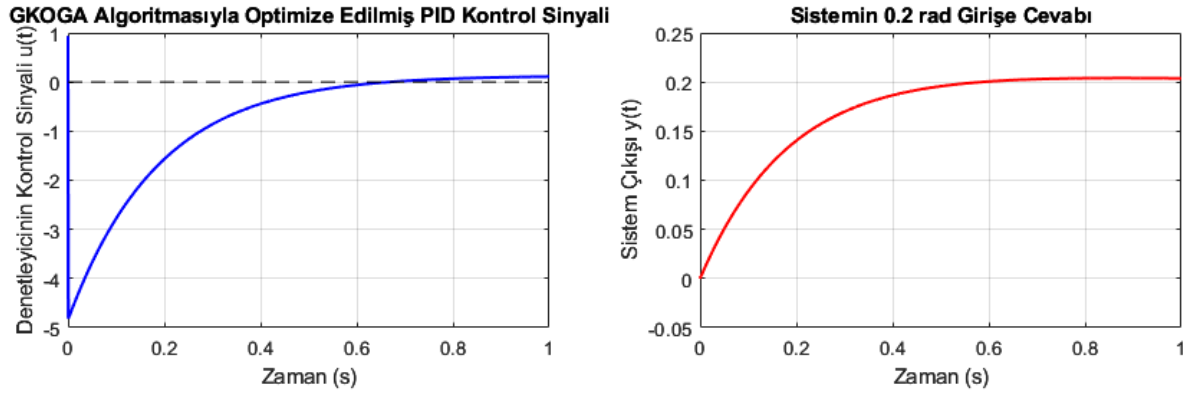
Simulasyon uygulamaları gerçek zamanlı sistemler üzerinde denenmek istendiğinde gerçek sistemlerin aktüatör sınırları olması nedeniyle kontrol sinyallerinin belli bir aralıkta tutulması gerekebilir. Bu sebepten çalışmada tasarlanan denetleyicinin uygulama açısından uygun olup olmadığını değerlendirebilmek için kontrol sinyaline belli limitler uygulanmış (0-5, 0-10, 0-100, 0-150) ve algoritma pek çok kez çalıştırılmıştır. Sistemin tepkisi uygulanan limitler aralığında da değerlendirilmiştir. PID denetleyicinin sınırlandırıldığı aralıklarda elde edilen denetleyici katsayıları ve t_r, t_s, t_p değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Yapılan analizler incelendiğinde kontrol sinyaline sınırlama getirildiğinde daha dar limit aralıklarında denetleyicinin sistem tepkisini yeterli düzeyde ayarlayamadığı ve sistem cevabının biraz zayıfladığı gözlemlenebilir. Ancak daha geniş limit aralıklarında sistem cevabının dar aralığa göre daha tatmin edici olduğu söylenebilir. Limit aralığının çok geniş tutulması da fiziksel sistemlerde kontrol sinyalinin doyuma uğratabilir. Bu sebepten literatürdeki çoğu çalışmada doğrudan fiziksel sistem üzerinde uygulanacak şekilde bir kısıt uygulanmadan denetleyici tasarımları

yapılmış olsa da, bu bölümde önerilen analiz ile çalışmanın gerçek sistem koşullara uyum sağlayabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, bu başlık altında yapılan analiz sayesinde önerilen denetleyicinin uygulama sınırları içerisindeki davranışı açıkça ortaya konmaktadır.

Tablo 6. Farklı limit aralıklarında denetleyici parametre değerleri ve ts,tr,tp değerleri

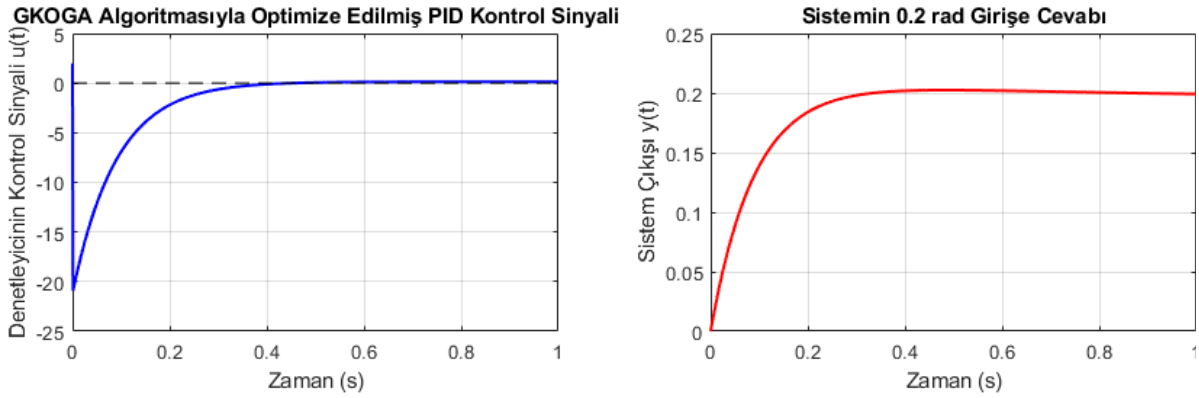
Parametre	0-5 arası	0-10 arası	0-100 arası	0-150 arası
K_p	4,6489	9,9331	63,9028	30,2615
K_i	3,6117	4,1496	63,8079	81,2959
K_d	5,0000	10,0000	96,4250	145,0283
t_s	0,5050	0,2757	0,0350	0,0241
t_r	0,3360	0,1758	0,0198	0,0133
t_p	0,8829	0,4847	0,0619	0,0630

Uygulanan limit aralıklarına göre sistemin kontrol sinyali çıkışı ve sistem çıkışı sinyalleri şekil 10-13 ile verilmiştir.



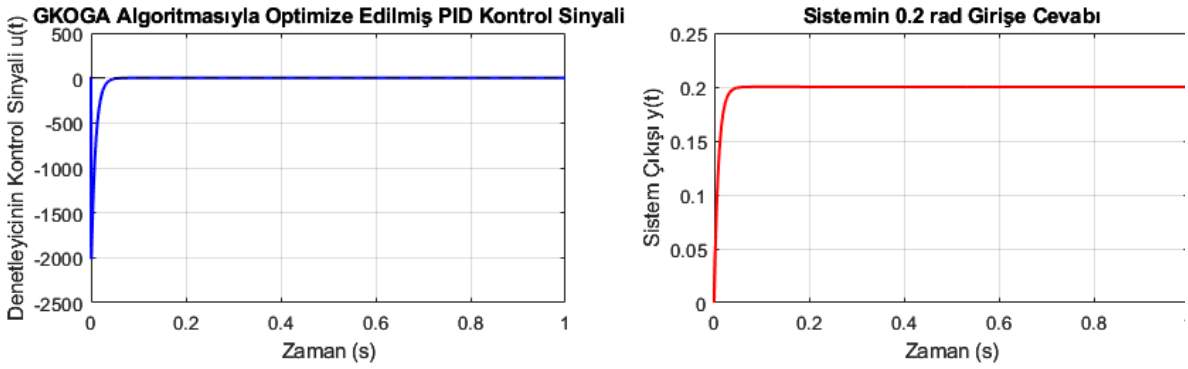
(a) (b)

Şekil 10. Limit aralığı 0-5 olarak uygulandığında (a) Kontrol sinyali çıkışı (b) Sistem çıkışı



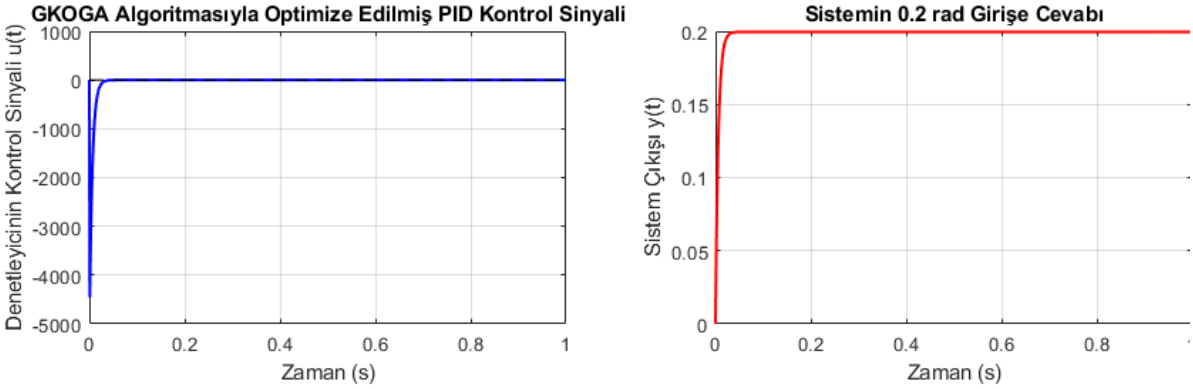
(a) (b)

Şekil 11. Limit aralığı 0-10 olarak uygulandığında (a) Kontrol sinyali çıkışı (b) Sistem çıkışı



(a) (b)

Şekil 12. Limit aralığı 0-100 olarak uygulandığında (a) Kontrol sinyali çıkışı (b) Sistem çıkışı



(a) (b)

Şekil 13. Limit aralığı 0-150 olarak uygulandığında (a) Kontrol sinyali çıkışı (b) Sistem çıkışı

4. Sonuçlar

Uçağın havada güvenli hareketi, uçağa uygulanan yatay ve dikey kuvvetlerin dengelenmesi ile sağlanır. Uçağın yükseklik kontrolü, uçağın eğim açısının değişmesi ile sağlanır. Uçağın eğim açısı değişirken tepki süresinin kısa olması, salınımın sönümlenmesi gibi parametreler önem arz eder. Bu çalışmada bir uçağın yükseklik kontrolünü sağlamak amacıyla hibrit bir algoritma kullanılarak PID denetleyici tasarımı yapılmıştır. GKO' nun hızlı yakınsama özelliği ve GA' nın ise çaprazlama ve mutasyon işlemi sayesinde popülasyon çeşitliliğinin korunması özelliği alınarak bir hibrit algoritma oluşturulmuştur. Tasarlanan bu hibrit algoritma, sistem dinamiklerine daha hassas bir şekilde uyum sağlayarak daha kararlı ve hızlı bir yanıt elde edilmesini sağlamıştır. Literatür incelendiğinde GKO ve GA' nın güçlü yönleri kullanılarak oluşturulmuş hibrit algoritmanın eğim açısı kontrolünde uygulanmadığı gözlemlenmiştir. Tasarlanan denetleyici ile sistemin yakınsama analizi, geçici tepki analizi, kutup-sıfır haritası, frekans cevabı analizi yapılmış ve literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca kontrol sinyali kısıtları altında PID denetleyici davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa;

1. Tasarlanan algoritmaya ait yakınsama analizinden en iyi ZLG değeri 0.003775 olarak elde edilmiştir. Algoritmanın ilk iterasyonlarda hızlı bir şekilde kararlı bir çözüme ulaşabildiği söylenebilir.

2. GKOGA-PID denetleyicisi ile sistemin geçici cevap analizinden Mp = 0, tr=0,0133 s, ts=0,0241 s ve tp=0,0630 s değerleri elde edilmiştir. Geçici cevap analizinden elde edilen sonuçlara göre PID olarak tasarlanan diğer denetleyiciler ile karşılaştırıldığında optimum sonuçları veren BRO-PID'ye göre yükselme süresinde %28,7, yerleşme süresinde %30,36 ve tepe zamanında %26,31 oranında iyileşme sağlanmıştır.
3. Tasarlanan denetleyicinin kutupları S_1 = -167,3026, S_2=-0,1048+0,74i, S_3=-0,1048-0,74i ve S_4=-0,1543 olarak elde edilmiştir. Elde edilen kutupların hepsinin reel eksenin sol yarı düzleminde yer alması sistemin kararlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca köklerin sönüm oranları incelendiğinde, iki kökün sönüm oranının 1 (aşırı sönümlü), diğer iki kökün ise sönüm oranının 0.1402 (düşük sönümlü) olduğu görülmektedir. Aşırı sönümlü kökler sistemin hızlı bir şekilde durağan duruma ulaşmasını sağlarken, düşük sönümlü kökler sistemin geçici yanıtında sınırlı salınımlar oluşturmuştur. Bu sonuçlarla, önerilen denetleyici istenen performans kriterlerini başarıyla sağlamaktadır.
4. GKOGA-PID denetleyici kullanılarak tasarlanan sistemin bode analizi sonuçlarına göre, yine literatürdeki en optimum sonuçlara sahip olan BRO-PID ile karşılaştırıldığında kazanç payının her iki yöntem için de sonsuz olduğu ve faz paylarında ihmal edilebilir düzeyde bir değişim olduğu (yaklaşık %3) gözlemlenmiştir. GKOGA-PID ile bant genişliği %44,7 oranında artırılmıştır. Bu sonuç tasarlanan denetleyici ile sistemin frekans cevabında daha hızlı ve daha geniş bir bant aralığında etkin çalışması anlamına gelmektedir. Elde edilen artışla, sistemin hem hız hem de kontrol hassasiyeti açısından önemli bir iyileşme sağlanmıştır.
5. Çalışmanın gerçek sistem koşullara uyum sağlayabileceğinin gösterilmesi amacıyla kontrol sinyali kısıtları altında PID denetleyici davranışı da incelenmiştir. Arama uzayı [0-10] ile sınırlandırıldığında 0,2757 t_s değeri; 0,1758 t_r değeri; 0,4847 t_p değeri elde edilmiştir.

Sonuçta uçak eğim açısının kontrolü için yapılan optimizasyon çalışmaları göz önüne alındığında önerilen yöntemle daha optimum sonuçlara ulaşılabilir. Geleneksel optimizasyon yöntemleriyle kıyaslandığında, önerilen hibrit algoritma sistemin yükselme süresini azaltmış, aşım miktarını minimize etmiş ve salınımları etkin bir şekilde baskılamıştır. Önerilen GKOGA-PID algoritmasının tasarlanan diğer kontrolörlerle rekabetçi bir performans gösterdiği söylenebilir. Tasarlanan denetleyici uçak eğim açısının kontrolü için uygulanabilir, GKOGA hibrit algoritmasının denetleyici parametrelerini ayarlamada iyi bir optimizasyon algoritması olduğu söylenebilir. Bu çalışma, akıllı optimizasyon tekniklerinin bir araya getirilmesiyle daha etkili ve kararlı kontrol sistemlerinin tasarlanabileceğini göstermekte olup, gelecekte farklı uçuş dinamikleri ve kontrol problemleri için genişletilebilir niteliktedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynakça

Abdulla AI., Mohammed IK. Aircraft pitch control design using LQG controller based on genetic algorithm. TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control) 2023; 21(2): 409-417.

Abualigah L., Ekinci S., Izci D. Aircraft pitch control via filtered proportional-ıntegral-derivative controller design using sinh cosh optimizer. International Journal of Robotics and Control Systems 2024; 4(2): 746–757.

Aldeeb An., Abdullah Ah. Achieving aircraft pitch control through artificial ıntelligence. African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS) 2024; 378-387.

Ali MS., Wang L., Alquhayz H., Rehman OU., Chen G. Performance improvement of three-phase boost power factor correction rectifier through combined parameters optimization of proportional-integral and repetitive controller. IEEE Access 2021; 9: 58893-58909.

Bensafia Y., Idir A., Zemmit A., Khettab K. Performance ımprovement of aircraft pitch angle using the fractional order adaptive PID controller. Przeglad Elektrotechniczny 2023; 99(5).

Bingül Z. MATLAB ve Simulink'le modelleme. Kontrol 1. Birsen Yayınevi, Kocaeli Üniversitesi 2005.

Ceballos Benavides GE., Duarte-Mermoud MA., Orchard ME., Travieso-Torres JC. Pitch angle control of an airplane using fractional order direct model reference adaptive controllers. Fractal and Fractional 2023; 7(4): 342.

Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Aircraft Pitch: System Modeling. Published with MATLAB® 7.14, 2012. Available from: http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=AircraftPitch&section=SystemModeling. Accessed: 23.02.2025.

Daş R., Türkoğlu İ., Poyraz M. Genetik algoritma yöntemiyle ınternet erişim kayıtlarından bilgi çıkarılması. Sakarya University Journal of Science 2006; 10(2): 67-72.

Gaing ZL. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. IEEE Transactions on Energy Conversion 2004;19(2): 384-391.

Gong X., Wang X., Xiong W., Zhang H., Xin Y. An effective PID control method of air conditioning system for electric drive workshop based on IBK-IFNN two-stage optimization. Journal of Building Engineering 2024; 98: 111028.

Holland JH. Adaption in natural and artificial systems. The MIT Press, Cambridge 1935,

Idir A., Bensafia Y., Khettab K., Canale L. Performance improvement of aircraft pitch angle control using a new reduced order fractionalized PID controller. Asian Journal of Control 2023; 25(4): 2588-2603.

İzci D., Ekinci S., Demirören A., Hedley J. HHO algorithm based PID controller design for aircraft pitch angle control system. In 2020 international congress on human-computer interaction, optimization and robotic applications (HORA), 26-28 June 2020, pp. 1-6, Ankara, Turkey. IEEE.

Kaçtı V., Ekinci S., İzci D. Henry gaz çözünürlük optimizasyonu ile uçak eğim kontrol sistemi için etkin kontrolör tasarımı. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 2020; 11(3): 953-964.

Keklik G., Özcan BD. Genetik algoritmaların işleyişi ve genetik algoritma uygulamalarında kullanılan operatörler. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(1): 1052-1066.

Köprücü S., Öztürk M. Comparison of PID coefficients determination methods for aircraft pitch angle control. Aerospace Research Letters (ASREL) 2024; 3(1): 15-26.

Kumar V., Hote YV. New approach of series-PID controller design based on modern control theory: Simulations and real-time validation. IFAC Journal of Systems and Control 2025; 31: 100295.

Micev M., Ćalasan M., Oliva D. Design and robustness analysis of an automatic voltage regulator system controller by using equilibrium optimizer algorithm. Computers and Electrical Engineering 2021; 89: 106930.

Mirjalili S., Mirjalili SM., Lewis A. Grey wolf optimizer. Advances in Engineering Software 2014; 69: 46–61.

Mitiku HM., Salau AO., Sharew EA. Design of an artificial neural network and proportional-integral-derivative controller using particle swarm optimization for Boeing 747-400 aircraft pitch control. Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems 2024; 6(3): 1-13, e224.

Motea ZM., Wahid H., Zahid J., Lwin SH., Hassan AM. A comparative analysis of intelligent and PID controllers for an aircraft pitch control system. Applications of Modelling and Simulation 2018; 2(1): 17-25.

Okeya DC., Mbachu CB., Muoghalu CN., Ekengwu BO. Enhancing the pitch control of an unmanned aircraft using pso based ıntelligent PID controller. International Journal of Research Publication and Reviews 2024; 5(3): 55-63.

Ponrani MA., Godweena AK. Aircraft pitch control using PID controller. In 2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN), 30-31 July 2021 pp. 1-4, Puducherry, India, IEEE.

Rehman AU., Khan MU., Shah MS., Maqsood Q., Ullah MF., Uba S. Aircraft pitch control based on genetic algorithm tuning with PID and LQR controller. In 2021 6th International Multi-Topic ICT Conference (IMTIC), 10-12 November 2021, pp. 1-6, Jamshoro & Karachi, Pakistan, IEEE.

Şahin AK., Akyazı Ö., Şahin E., Çakır O. Uçak eğim kontrol sistemi için ölüm oyunu optimizasyonuna dayalı PID-F denetleyicisi tasarımı. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2022; 12(2): 539-549.

Şenel FA., Yüksel AS., Gökçe F., Yiğit T. Gri kurt optimizasyon algoritması ile iki boyutlu dizilim yazılımının geliştirilmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2018; 20(2): 293-306.

Toren M., Mollahasanoğlu H. Gri Kurt optimizasyon algoritması ile güç ve dağıtım türü transformatörlerin ağırlık optimizasyonu. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 12(1): 96-103.

Vatansever F., Şen D. Genetik algoritma tabanlı PID kontrolör simülatörü tasarımı. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 2013; 18(2): 7-18.

Yıldırım Ş., Savaş S. PID denetim organı kullanarak uçaklarda kalkış ve iniş halinde yunuslama (Pitch) açısı kontrolü. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi 2009; 25(1-2): 287-301.

Zaeri R., Ghanbarzadeh A., Attaran B., Zaeri Z. Fuzzy logic controller based pitch control of aircraft tuned with bees algorithm. In The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation, 27-29 December 2011, pp: 705-710. Shiraz, Iran, IEEE.

Zhao C., Wang D., Xue W. Beyond linear limits: Design of robust nonlinear PID control. Automatica 2025; 173: 112075.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2188-2200, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2188-2200, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Elektrikli Araçlar için Şarj Doğrultucu Devrelerinin Harmonik Değerlendirmesi

Seda KUL[1*]

[1]Karamanoglu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 70200, Karaman

[1]https://orcid.org/0000-0001-8278-4723
*Sorumlu yazar: sedakul@kmu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 23.02.2025
Kabul tarihi:03.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Elektrikli araç şarjı
Doğrultucu devre
Harmonik
Şarj modu
Şarj altyapısı

ÖZ

Elektrikli araç (EA) şarj istasyonlarında güç kalitesinin artırılması ve toplam harmonik bozulma (THB) değerlerinin azaltılması, özellikle hızlı şarj uygulamaları açısından kritik öneme sahiptir. Şebekeden temin edilen alternatif akımı (AA), batarya sistemleri için doğru akıma (DA) dönüştüren EA şarj cihazları; Mod 1, Mod 2 ve hızlı DA şarj gibi farklı şarj modlarına bağlı olarak çeşitli doğrultucu topolojileri içermektedir. Bu çalışmada, ilave filtreleme bileşenlerine ihtiyaç duymaksızın düşük harmonik bozulma sağlayan yenilikçi bir 12 darbeli doğrultucu topolojisi önerilmektedir. Önerilen yapı, geleneksel tek fazlı ve üç fazlı altı darbeli doğrultucularla; harmonik performansı, güç faktörü ve verimlilik açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, filtre devresi kullanılmasa bile 12 darbeli doğrultucunun şebekeden çekilen akımda yaklaşık %20 düzeyinde düşük THB sağladığını ve bu sayede daha temiz ve verimli bir güç aktarımı sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda önerilen topoloji, yüksek güç ve gerilim seviyelerinde çalışan EA hızlı şarj istasyonları için uygulanabilir ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Harmonic Evaluation of Electric Vehicle Charging Rectifier Circuits

Research Article

Article History:
Received: 23.02.2025
Accepted: 03.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Electric vehicle charging
Rectifier circuit
Harmonic
Charging mode
Charging infrastructure

ABSTRACT

Improving power quality and reducing total harmonic distortion (THD) are of critical importance in electric vehicle (EV) charging stations, particularly for fast-charging applications. EV chargers, which convert alternating current (AC) from the grid into direct current (DC) for battery charging, incorporate various rectifier topologies depending on the selected charging modes (Mode 1, Mode 2, and fast DC charging). This study proposes an innovative 12-pulse rectifier topology that achieves low harmonic distortion without the need for additional filtering components. The proposed configuration is evaluated in comparison with conventional single-phase and three-phase six-pulse rectifiers in terms of harmonic performance, power factor, and efficiency. The results demonstrate that the 12-pulse rectifier achieves a significantly lower THD in the grid current, approximately 20%, even without filter circuits, contributing to a cleaner and more efficient power supply. Therefore, the proposed topology presents a viable and sustainable solution for high-power and high-voltage EV fast-charging stations.

To Cite: Kul S. Harmonic Evaluation of Electric Vehicle Charging Rectifier Circuits. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2188-2200.

1. Introduction

With transportation towards sustainability and carbon neutrality at the forefront, EVs are rapidly becoming widespread as a more environmentally friendly alternative to fossil fuel vehicles. The increasing number of EVs has brought about the necessity of developing charging infrastructure. EV charging stations are required to establish the connection between the grid and the vehicles.

Rechargeable battery systems are central to the functionality of EVs, which rely on efficient and reliable charging infrastructure (Sharma et al., 2022). EV chargers are designed to convert alternating current (AC) from the grid into direct current (DC), which is suitable for charging batteries. Different rectifier circuits facilitate this conversion depending on the charging mode, such as Mode 1, Mode 2, or fast DC charging.

Power electronic converters in charging processes can cause various harmonic distortions on the electrical grid. Harmonics are generated in the charger due to non-linear operating characteristics. Due to these harmonics, power quality deterioration and voltage instability occur (Yilmaz et al., 2013). Selecting the proper charging method is an important aspect to consider when charging. EV chargers are classified into three levels based on voltage level and their power rating, as shown in Table 1. Most EV charging can be accomplished overnight in residential settings using a standard 120V output Level 1, the slowest charging option. 240 V output Level 2 charging is commonly found in homes, workplaces, and public charging stations, and is faster than Level 1 charging. Single-phase solutions typically employ levels 1 and 2. For three-phase solutions, Level 3 DC fast charging is designed for public charging stations and commercial applications like fuel stations (Saraswathi and Ramachandran, 2024).

Table 1. Classification of chargers according to levels

EV Charger Level	Voltage Level	Grid Supply
Level 1	120/230 V_{ac}	Single-phase
Level 2	240/400 V_{ac}	Single-phase or three-phase
Level 3	208/600 V_{ac}	Three-phase

When conventional rectifier topologies, including single-phase and three-phase rectifiers, are examined comprehensively, they differ in terms of their harmonic effects on the grid. Single-phase rectifiers are commonly used in low-power applications but suffer from high THD and poor power factor. Three-phase rectifiers improve power quality but still require additional filtering methods to comply with power quality standards such as IEEE 519 (Committee et al., 2014). Previous studies have explored active and passive filters, phase-shifting transformers, and multi-pulse rectifiers as potential solutions to harmonic distortion.

Single-phase bidirectional rectifier (SPBR) is used in EV battery charging to focus on analyzing switching sequences to evaluate power losses, which aids in component sizing and efficiency. A prototype with 10 kW output power was developed, achieving a peak efficiency of 97.5%, unity power factor, and THD of less than 7% during full power operation (Esteve et al., 2024). Senol et al., (2025) show that harmonic distortion tends to increase as the charging current decreases during the charging of

eight popular EV models. In addition, THD can reach up to 25% in the worst cases, and some vehicles can exceed individual harmonic limits. A single-phase, five-level power factor correction (PFC) rectifier for EV battery charging is proposed in (Tiwari et al., 2024). The proposed topology provides capacitor voltage balance by a complementary switching method, reduces voltage stress on the switches, and eliminates the need for an additional DC filter. Experimental results show that the proposed rectifier provides 93.8% efficiency at 230 V input voltage and 2 kW output power and offers high power quality using fewer components compared to conventional multi-level and single-level rectifier topologies. (Pratama et al., 2024) analyzes harmonic distortion in EV charging Stations and proposes a shunt active power filter using a Phase-Locked-Loop to mitigate harmonics, reducing THD and Total demand distortion (TDD). The result of THD and TDD, before applying the filter, the THD and TDD values were 18.69% and 12.52%, respectively, which decreased to 1.32% and 0.85% after the filter was applied. The operating principle of a three-phase uncontrolled rectifier charger with passive power factor correction and the development of its frequency-domain harmonic analytical model have been analyzed in Wenxiong et al., (2016). Based on simulation and experimental results, the model accurately predicts the harmonic content of the charging current under different power levels and filter inductor conditions, with improved accuracy when the DC filter inductor Lf is less than 14.3 mH. (Bi et al., 2023) introduces a control strategy for a single/three-phase EV charging system, which can be reconfigured to operate as a single-phase rectifier. The application of this method is in EV charging systems, where it combines deadbeat prediction current control (DPCC) with a modified repetitive control (RC) to enhance performance and stability, especially under grid voltage disturbances. The results demonstrate improved reliability and efficiency, validated by a 7.4 kW single-phase AC-DC converter prototype, which confirms the method's effectiveness.

A new hybrid approach is proposed to improve the harmonic mitigation capability of a 12-pulse diode bridge rectifier (DBR) for fast EV battery charging applications (Dubey et al., 2022a). This study aimed to reduce the size and complexity of the system by using a diode rectifier supported by a clamp circuit with only two active switches and a weak DC interconnect film capacitor. In addition, a zigzag-configured high-frequency solid-state transformer improves the grid-side current quality by blocking zero sequences. (Lan et al., 2022) investigated a 100-kW EV fast charger that integrates a 12-pulse rectifier with two buck-type DC-DC converters, utilizing a triangular current shaping method to enhance current harmonics performance. The system was designed for high-power applications, offering simplicity in operation with a low active semiconductor count, and this approach achieved high efficiency (98.73%), low THD (1.36%), and a near-unity power factor (0.999) while maintaining a wide output voltage range. To demonstrate that the use of EVs increased harmonic distortion in the electrical grid, leading to power losses and reduced efficiency, a charging system utilizing a Shunt Active Power Filter (SAPF) was developed (Neupane et al., 2024), reducing THD from 56.3% to 1% while improving power quality. The system employed a Buck-Boost converter and a Constant Current Constant Voltage (CCCV) charging scheme to ensure a stable charging process.

In this literature review, rectifiers have been extensively studied for their effectiveness in harmonic reduction. While 6-pulse and 12-pulse rectifiers require minimal filtering, 6-pulse rectifiers have been widely used but generate significant low-order harmonics (Hu et al., 2022), necessitating external filters. In contrast, 12-pulse rectifiers have demonstrated promising results in harmonic mitigation by canceling lower-order harmonics through phase shifting, thereby enhancing overall power quality. However, existing research has primarily focused on 12-pulse rectifiers in conjunction with filtering techniques rather than evaluating their standalone performance in EV charging applications.

This paper presents a 12-pulse rectifier without a filter for EV charging stations designed to minimize the THD value without additional filtering components. The proposed topology is evaluated by comparing the conventional single-phase and three-phase rectifiers in terms of harmonic performance, power factor, and efficiency. The results indicate that the 12-pulse rectifier without a filter significantly reduces harmonic distortion, making it a promising solution for enhancing the power quality of EV charging stations.

The contributions of this study can be summarized as follows:

- Performance of a 12-Pulse Rectifier with Low THD for Fast Charging Stations of EVs
- Improving Power Quality by Reducing Harmonic Components in Currents Without Using Filter Circuits
- Proposal of a 12-Pulse Rectifier for High Power and Voltage Levels

2. Material and Methods

This section describes the topologies of various Rectifier Circuit Models for electric vehicle (EV) charging applications and explains the model and details of the 12-pulse Rectifier Circuit model made in the Ansys/Twin Builder simulation application.

2.1. Rectifier Circuit Models

As shown in Figure 1, single-phase rectifier circuits are essential components in electrical systems, converting alternating current (AC) to direct current (DC) for various applications. These circuits are widely used in power supplies for electronic devices, electric vehicle chargers, and other DC-powered equipment (Gou, 2023). EV Level 1 charging units, connected to the single-phase city grid, are classified as slow charging modes. All loads employing such a single-phase rectifier circuit draw significant harmonic current components.

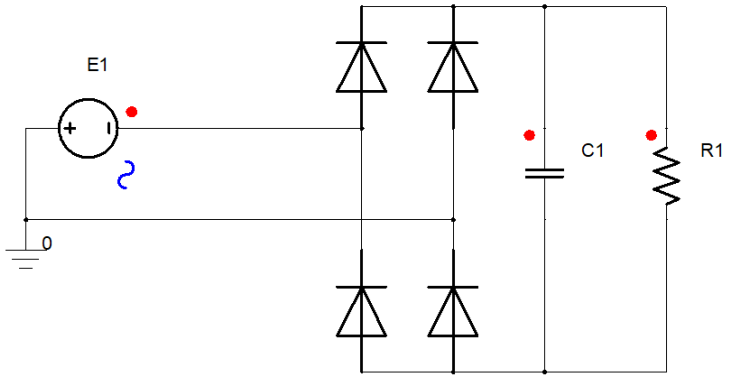


Figure 1. Single-phase rectifier circuit

Figure 2 shows the conventional diode rectifier and full-bridge DC-DC converter, which can reduce the DC link voltage from the AC grid voltage. The diode rectifier generates the DC link voltage, and then the full-bridge DC-DC converter reduces the DC voltage level (Wai et al., 2019; Lee et al., 2020). This rectifier is simple to operate since it does not use active switches and does not require any gate drivers or control systems. Diode rectifiers can add 40–70% THD to the grid currents, which causes stress on the grid. Due to low efficiency, unidirectional power flow, and high THD, the traditional passive rectifier topology is not recommended for fast-charging applications. The lower-order harmonics (5^{th}, 7^{th}, 11^{th}, and 13^{th}) have high amplitudes (Zhaksylyk et al., 2023; Seleem et al., 2024).

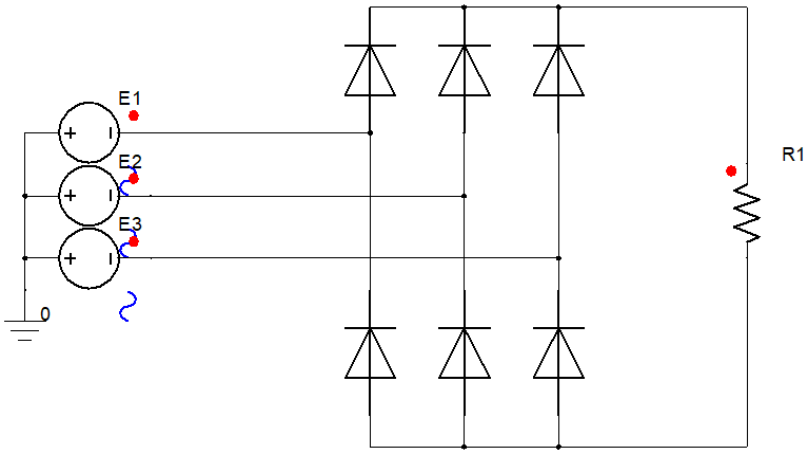


Figure 2. Three-phase rectifier circuit

Compared with the six-pulse rectifier, the multi-pulse rectifier produces fewer harmonics, and, therefore, the recommended rectifier type for DC fast charging units is a 12-pulse rectifier circuit with shifted phases. In a traditional approach to DC fast charging of EVs, a three-phase uncontrolled diode bridge rectifier followed by an isolated DC-DC converter is directly connected to the grid. However, this involves low-order harmonics, resulting in poor power factor and power quality (Abdollahi, 2022).

Figure 3 shows the topology of a 12-pulse rectifier proposed for EV DC fast battery charging. A phase shift transformer with a Δ/Δ-Y connection provides the required 30-degree phase shift between each

phase voltage provided for the upper and lower diode bridges and uses current and voltage control to control the output current of the two diode bridges separately (Dubey et al., 2022b).

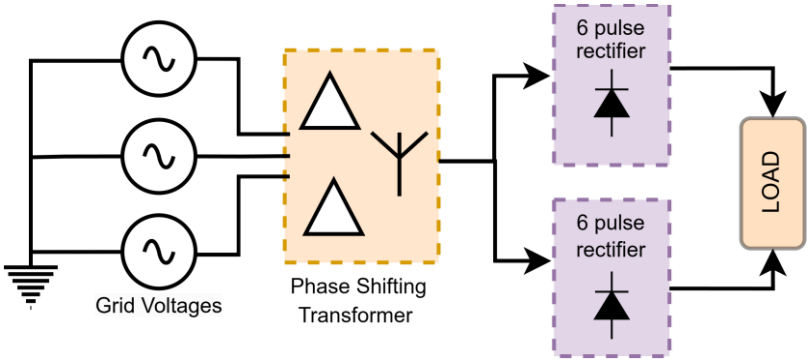


Figure 3. The connection schematic diagram of a 12-pulse rectifier

2.2. ANSYS Modeling of Rectifier Circuits

The circuit diagram of the proposed rectifier used for simulation in ANSYS-Twin Builder is shown in Figure 4. As stated, it consists of an autotransformer that produces two three-phase voltage sets with 12 pulses and a 30° phase shift to provide DC voltage to the EV charging circuit. A 12-pulse phase-shifting rectifier circuit is designed. Compared to traditional 6-pulse rectifier circuits, the 12-pulse structure provides lower THD and better power quality, increasing grid compatibility. This structure, obtained by using a phase-shifting transformer, increases the efficiency of the system by reducing the need for filters thanks to its low harmonic components. The designed rectifier circuit provides a more uniform current drawn from the grid while producing a stable DC voltage at the output. The simulations show that the proposed topology improves the power factor and complies with IEEE 519 harmonic standards.

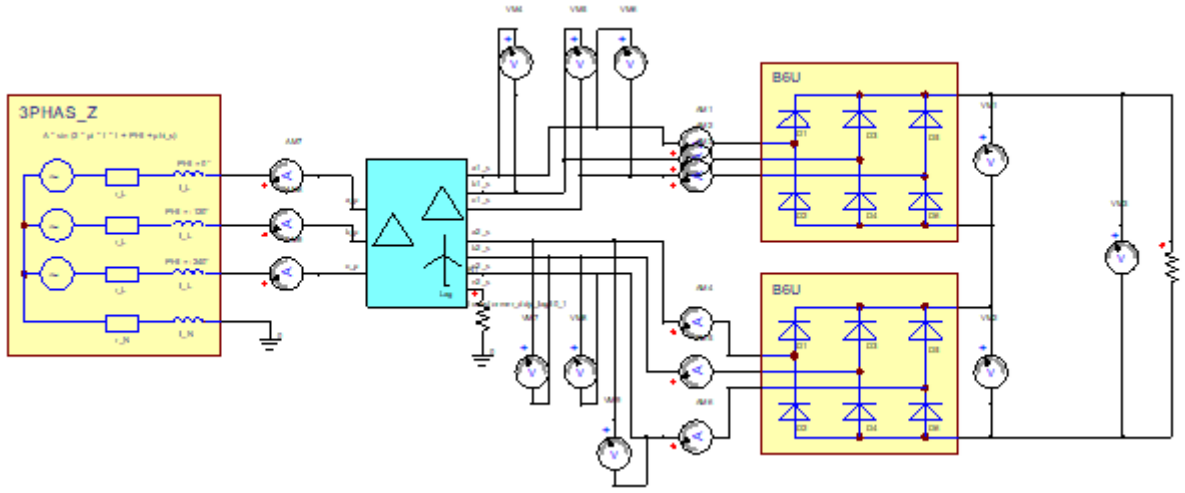


Figure 4. DC charge 12 pulse rectifier circuit

3. Results and Discussions

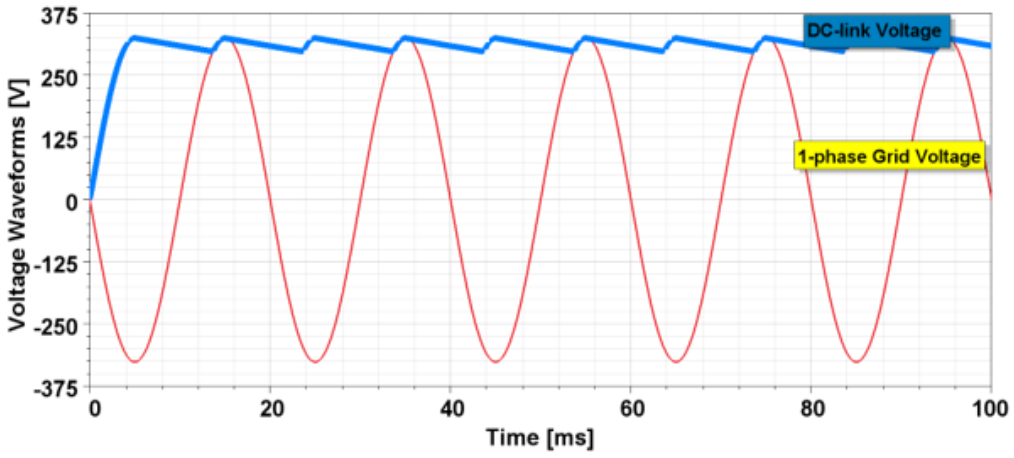
The DC-link voltage waveform shown in Figure 5a indicates that the rectifier output exhibits a notable ripple component, an inherent characteristic of single-phase rectification. This ripple arises due to the

cyclic nature of the input voltage and the absence of an ideal smoothing mechanism. Since EV batteries require a stable and ripple-free DC voltage for efficient charging and prolonged battery lifespan, additional filtering circuits or DC-DC converters are necessary to mitigate these fluctuations. Excessive voltage ripple can adversely affect the overall efficiency of the charging system.

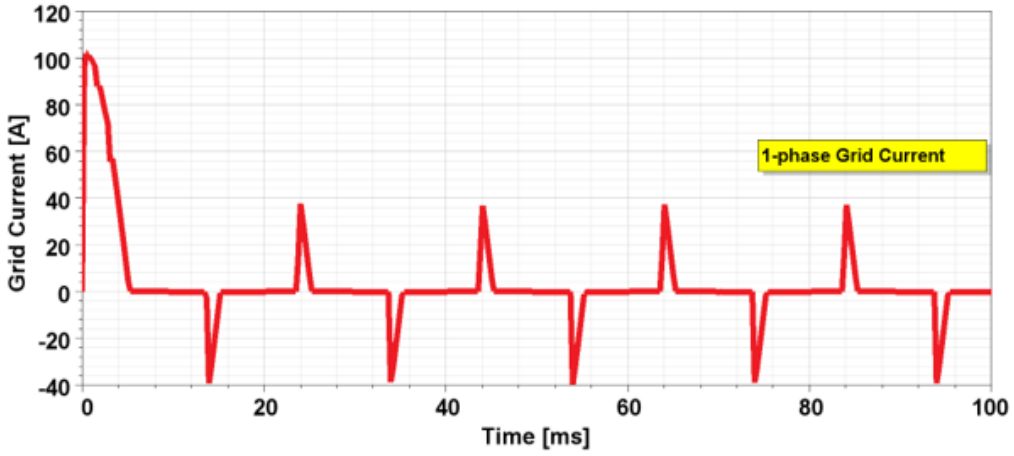
The grid current waveform presented in Figure 5b reveals that the single-phase rectifier draws current with a high harmonic content, which degrades the power quality of the grid. Additionally, the abrupt variations in the waveform can lead to electromagnetic interference (EMI) issues, potentially necessitating the implementation of power factor correction (PFC) circuits or other mitigation techniques to ensure compliance with power quality standards.

The harmonic spectrum analysis illustrated in Figure 5c confirms the presence of significant harmonic components, particularly at the 3^{rd}, 5^{th}, 7^{th}, and higher-order frequencies. The high THD observed in the grid current further underscores the negative impact of the single-phase rectifier on power quality. Excessive harmonic injections into the grid can result in voltage distortion, increased reactive power demand, and potential resonance issues, which can impair the stability and efficiency of the power distribution system.

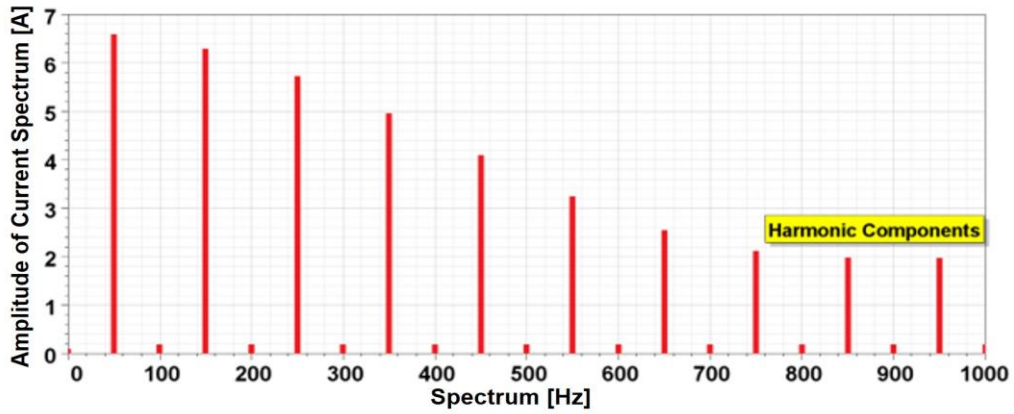
Single-phase rectifier circuits inherently draw excessive harmonic currents due to their reliance on a filter capacitor to reduce the DC-link voltage ripple. This filtering requirement is the primary factor contributing to the presence of substantial harmonic content in the grid current. Notably, harmonics at all integer multiples of 3 are present, and the THD value exceeds 80%, highlighting the significant distortion introduced by the rectification process.



a



b

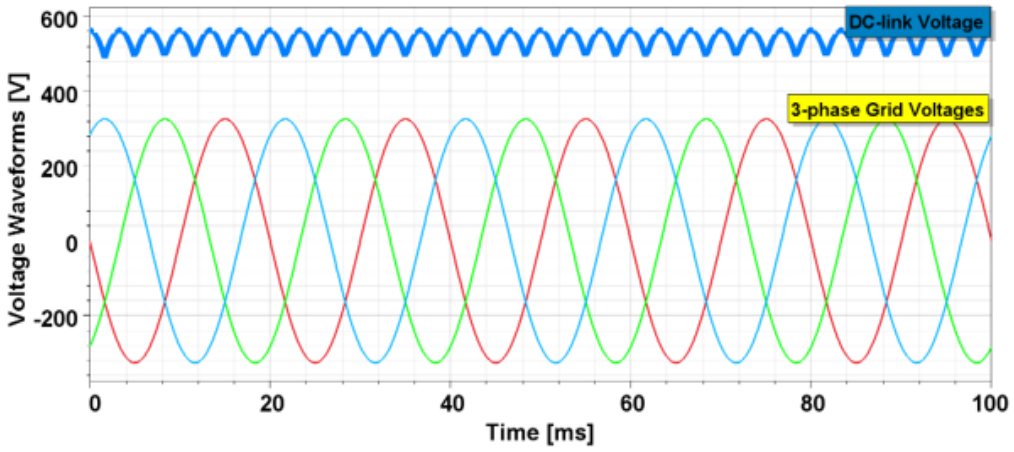


c

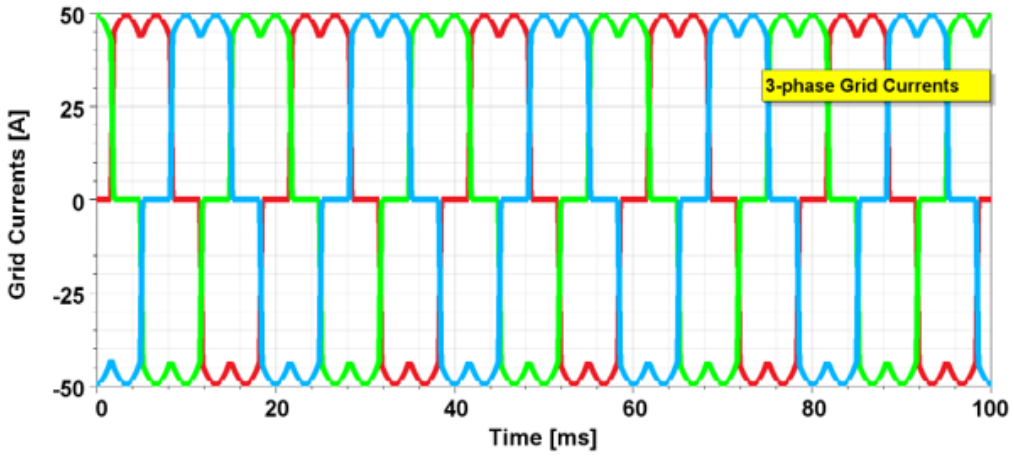
Figure 5. A single-phase rectifier, a) DC output voltage waveform, b) current waveform drawn from the grid, c) grid current harmonic spectrum

The DC-link voltage waveform shown in Figure 6a exhibits a periodic ripple, which is an inherent characteristic of a six-pulse rectifier. Although the voltage appears relatively stable, the presence of ripple results from the rectification process and the absence of an ideal filtering circuit. This voltage ripple can impact the efficiency of connected loads, such as EV chargers, and may necessitate additional filtering to ensure a more stable DC-link voltage.

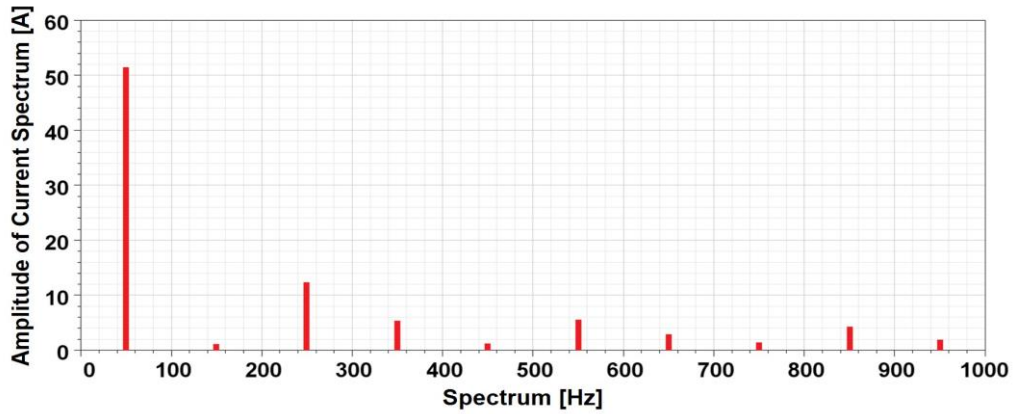
The grid current waveforms presented in Figure 6b indicate that the rectifier draws current in a non-sinusoidal manner, introducing harmonic components due to the switching behavior of the rectifier. While a three-phase rectifier inherently provides a better current balance compared to a single-phase rectifier, harmonic distortion remains a concern. These harmonics can negatively affect power quality, requiring mitigation techniques such as passive filtering or active power factor correction (PFC) to comply with power quality standards.



a



b



c

Figure 6. Three-phase 6-pulse rectifier, a) DC output voltage waveform, b) current waveform drawn from the grid, c) grid current harmonic spectrum

The harmonic spectrum depicted in Figure 6c confirms the presence of significant harmonic components, particularly at the 5^{th}, 7^{th}, 11^{th}, and 13^{th} harmonics, which are characteristic of six-pulse rectification. The presence of these harmonic components increases THD, leading to power quality deterioration, increased losses in grid components, and potential resonance issues.

Compared to a single-phase rectifier circuit, a three-phase six-pulse rectifier inherently draws lower harmonic current components from the grid (Kul et al., 2024). Specifically, 3^{rd} and multiples of 3

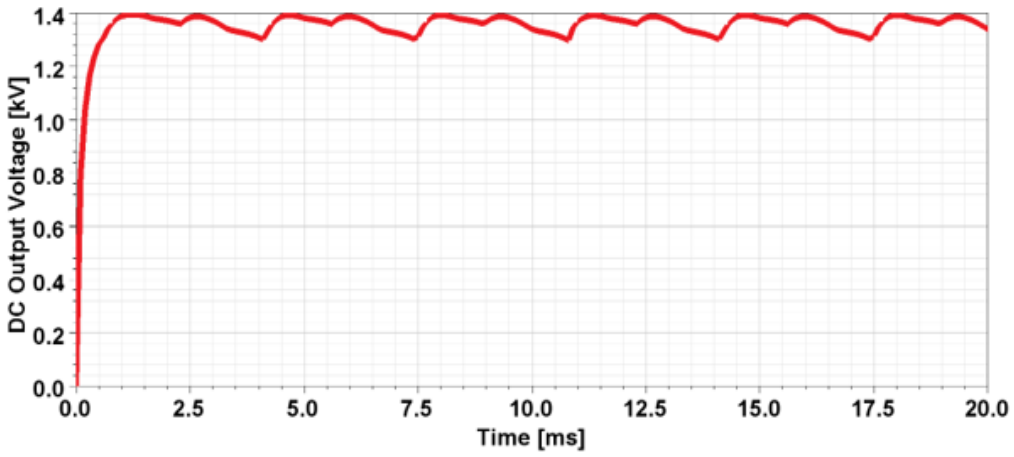
harmonic currents are eliminated, resulting in a THD level approximately 20% lower and a reduced DC-link voltage ripple, even in the absence of a filter capacitor. Furthermore, Level-4 DC fast charging systems, which are widely used in high-power EV charging stations, can effectively operate with six-pulse rectifiers at power levels of up to 300 kW, making them a viable solution for high-power applications (Arena et al., 2024; Ilahi et al., 2024).

The DC output voltage waveform shown in Figure 7a is a 12-pulse rectifier output with a smaller amplitude ripple than the total DC output on the load when the outputs of the rectifier units are connected in series. The voltage exhibits a relatively stable characteristic with minimal ripple, which is an important requirement for EV charging systems. The lower ripple level reduces the need for extensive filtering and increases the overall efficiency of the DC-DC converter stage, leading to improved charging performance and battery life.

The grid current waveform presented in Figure 7b reveals that the current drawn by the 12-pulse rectifier is more sinusoidal than its six-pulse counterpart. The characteristic 12-pulse behavior results in a reduction in harmonic content, resulting in improved power quality. In the study comparing the 12-pulse Diode Rectifier Topologies (Abdel-Rahim et al., 2024), it is seen that the topology with the lowest THD value is the model proposed in this study. These characteristics make the 12-pulse rectifier a more suitable choice for high-power fast charging stations where grid compatibility and power quality are critical factors.

The harmonic spectrum shown in Figure 7c confirms that the 5^{th} and 7^{th} harmonics, which are particularly dominant in the six-pulse rectification, are significantly reduced. The elimination of these harmonics leads to lower THD in the grid, resulting in lower voltage distortion and reactive power demand in the grid.

In summary, the 12-pulse rectifier offers a compelling solution for high-power EV charging infrastructure due to lower DC voltage ripple, reduced harmonic distortion, and improved power quality. These features position the 12-pulse topology as a superior alternative to traditional six-pulse rectifiers in next-generation fast charging stations, providing higher efficiency and greater compliance with power quality standards.



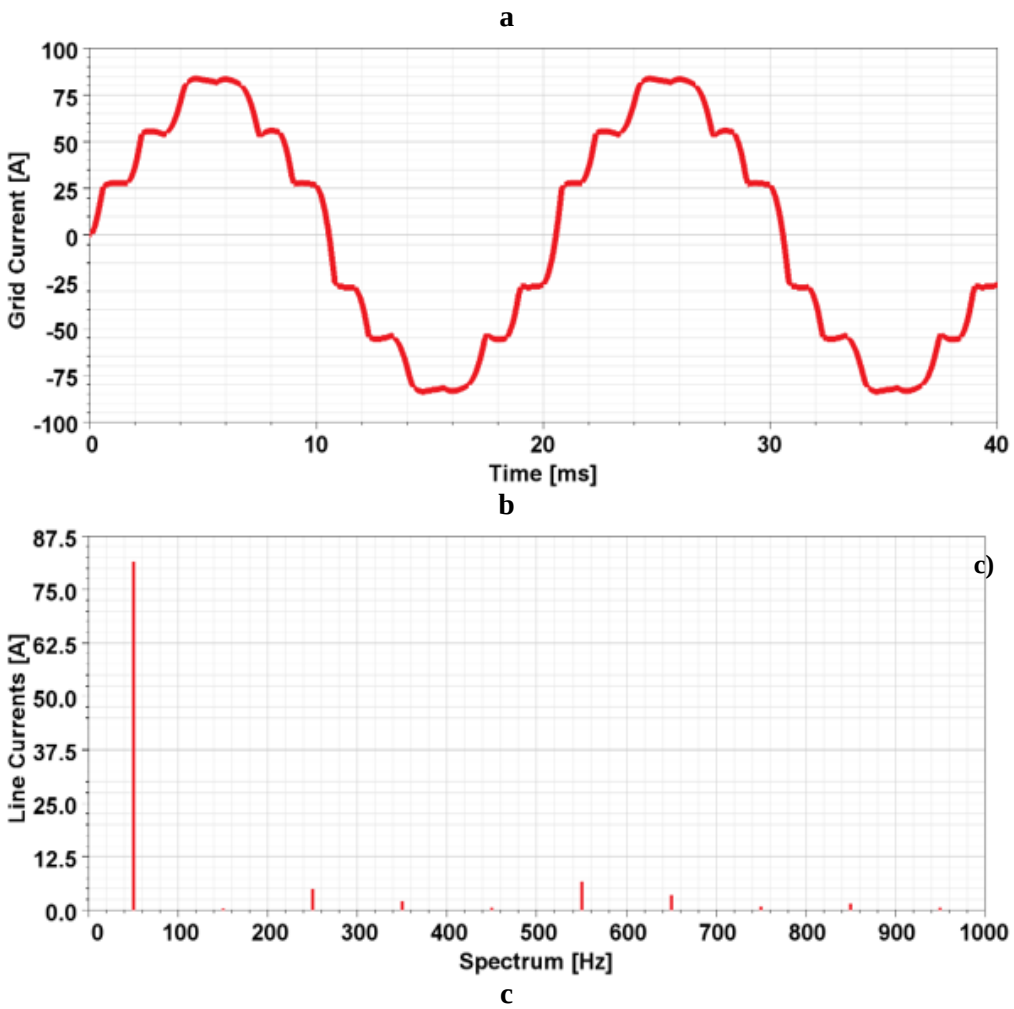


Figure 7. Three-phase 12-pulse rectifier, a) DC output voltage waveform, b) current waveform drawn from the grid, c) grid current harmonic spectrum

4. Conclusion

In this study, the harmonic effects of single-phase, three-phase six-pulse, and three-phase 12-pulse rectifier circuits used in EV charging applications are investigated. The results show that three-phase rectification significantly reduces the THD in the grid current compared to single-phase rectifiers. In particular, the six-pulse rectifier keeps the THD below 20% by eliminating the 3^{rd} and 3^{rd} harmonic components, while the 30º phase shift in the Δ-Y connection used in the 12-pulse rectifier further improves the power quality by suppressing lower order harmonics such as the 5^{th} and 7^{th}. In addition, the 12-pulse rectifier provides a more stable DC link voltage with minimum ripple, which is crucial for efficient DC fast charging. As a result, it is seen that high-pulse rectifier topologies are more suitable for high-power EV charging stations as they provide improved power quality, reduced grid distortion, and higher efficiency without the need for an extra filter circuit at the output.

As future studies, the effects of 18-pulse or 24-pulse multi-pulse rectifier circuits on power quality and performance in EV charging stations can be investigated.

Statement of Conflict of Interest

The author of the article declares that there is no conflict of interest.

Author's Contributions

The author declares that she has contributed 100% to the article.

References

Abdel-Rahim O., Alghamdi TAH., Rohouma W., Abdel-Rahman AB. Enhancing hydrogen generation through advanced power conditioning in renewable energy integration. Energy Reports 2024; 12: 775–786.

Abdollahi R. A 12-pulse rectifier with passive harmonic reduction based on UIPT in more electric aircrafts. Circuit World 2022; 48(2): 240–250.

Arena G., Chub A., Lukianov M., Strzelecki R., Vinnikov D., De Carne G. A comprehensive review on dc fast charging stations for electric vehicles: standards, power conversion technologies, architectures, energy management, and cybersecurity. IEEE Open Journal of Power Electronics 2024; 5: 1573-1611.

Bi Y., Zhao T., Xu J., Shu G., Wu C., Wang Y., Soeiro TB. An ımproved combined current control for single-phase operation mode of single-/three-phase ev charging system with voltage ripple suppression. IEEE Transactions on Power Electronics 2023; 38(11): 13635-13649.

Committee D., Power I. Society E. IEEE Std 519-2014.

Dubey A., Jarial RK. Improvement of harmonic mitigation capability of 12-pulse diode bridge rectifier using ınterphase transformer and high frequency solid state transformer for ev fast charging applications. IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics, 23-24 April 2022, pages: 1-7, Ballari, India.

Dubey A., Jarial RK. Investigation on power quality enhancement in zigzag configured high frequency solid state transformer integrated with 12 pulse rectifier and passive harmonic mitigation circuit. International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies, 16-18 February 2022, pages: 1-7, Trichy, India.

Esteve V., Bellido JL., Jordán J. Optimal design of a single-phase bidirectional rectifier. Energies 2024; 17(6): 1280.

Gou S. Improved topologies towards existing types of single phase rectifiers. International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms, 24-26 February 2023, pages: 457-461, Changchun, China.

Hu H., Wang J., Huang Y., Li X., Chen H. Analysis and suppression of harmonic characteristic for multi-pulse rectifier based on phase-shifting transformer. Journal of Physics: Conference Series 2022; 2237(1): 012003.

Ilahi T., Izhar T., Zahid M., Rasool A., Tsamaase K., Zahid T., Khan EM. Design analysis of high-

power level 4 smart charging ınfrastructure using next-generation power devices for evs and heavy duty EVs. World Electric Vehicle Journal 2024; 15(2): 66.

Kul S., Balci S., Celtek SA., Polat AO. Power quality enhancement of rectifiers of water electrolysis for the green hydrogen. 4th Interdisciplinary Conference on Electrics and Computer. 11-13 June 2024, pages: 1–5, Chicago, IL, USA.

Lan D., Wu Y., Soeiro TB., Granello P., Qin Z., Bauer P. 12-pulse rectifier with dc-side buck converter for electric vehicle fast charging. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 17-20 October 2022, pages: 1-6, Brussels, Belgium.

Lee JY., Heo KW., Kim KT., Jung JH. Analysis and design of three-phase buck rectifier employing UPS to supply high reliable dc power. Energies 2020; 13(7): 1407.

Neupane R., Magar ST., Pandey M., Simkhada A., Bhattarai BR. Mitigation of harmonics due to electric vehicle charging. Journal of Engineering and Sciences 2024; 3(1): 101-105.

Pratama MR., Halimi B. Harmonic analysis on electric vehicle charging station and how to suppress the harmonic. International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, 5-6 November 2024, pages: 1–5, Bandung, Indonesia.

Saraswathi VN., Ramachandran VP. A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles. Heliyon 2024; 10(20).

Seleem M., Atia Y., Abou-Zalam B., Abd-Elhaleem S. A technological review on fast chargers for electric vehicles: standards, architectures, power converter topologies, fast charging techniques, ımpacts and future research directions. International Journal of Robotics and Control Systems 2024; 4(1): 217–261.

Senol M., Bayram IS., Hunter L., Sevdari K., McGarry C., Gaona DC., Gehrke O., Galloway S. Harmonics measurement, analysis, and ımpact assessment of electric vehicle smart charging. IEEE Open Journal of Vehicular Technology 2025; 6: 109-127.

Sharma N., Dhiman A., Rahi OP. Analyzing the effects of electric mobility charging harmonics on power grid. International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems, 13-15 December 2022, pages: 207-211, Pudukkottai, India.

Tiwari AK., Sahu LK., Barwar MK. A multi-level rectifier with voltage balancing capability for EV charging. International Journal of Electronics 2024; 111(7): 1179-1195.

Wai RJ., Yang Y. Design of backstepping direct power control for three-phase PWM rectifier. IEEE Transactions on Industry Applications 2019; 55(3): 3160-3173.

Wenxiong M., Zhixin S., Yong W., Jian F., Le L., Shengnan L., Wang Q. Frequency domain harmonic model of electric vehicle charger using three-phase uncontrolled rectifier. CIRED Workshop, 14-15 June 2016, pages: 1-5, Helsinki.

Yilmaz M., Krein PT. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on Power Electronics 2013; 28(5): 2151-2169.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2201-2220, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2201-2220, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

İnşaat Mühendisliğinde Yapay Zekâ Konusundaki Lisansüstü Tezlerin Bibliyometrik Analizi

Metin ÖZLEKLİ[1*]

[1]Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, 54050, Sakarya

[1]https://orcid.org/0000-0001-9136-2645
*Sorumlu yazar: metinozlekli@subu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 12.02.2025
Kabul tarihi:08.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Yapay zekâ
İnşaat mühendisliği
Bibliyometrik analiz
Yapay sinir ağları
Optimizasyon

ÖZ

Yapay zekânın inşaat mühendisliğindeki kullanım alanları; tasarım optimizasyonu, proje yönetimi, güvenlik sistemleri, maliyet tahmini ve sürdürülebilirlik gibi çeşitli boyutları içermektedir. Bu çalışma; Türkiye'de inşaat mühendisliği alanında yapay zekâ konulu lisansüstü tezlerin eğilimini belirlemektedir. Çalışma kapsamında, Türkiye'de bu alanda gerçekleştirilen lisansüstü tezler YÖK-TEZ veri tabanı üzerinden analiz edilmiştir. 1993-2024 yılları arasındaki 1800 tez arasından, inşaat mühendisliği ile doğrudan ilgili 89 tez detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bibliyometrik analiz sonuçları, inşaat mühendisliğinde yapay zekâ konulu tezlerin özellikle son yıllarda belirgin bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. En fazla tez 2024 yılında yazılmış olup, bu durum akademik ilgideki artışı yansıtmaktadır. Çalışmada, bu alanda en fazla tez üreten kurumun Erciyes Üniversitesi olduğu belirlenmiştir. İncelenen tezlerin büyük çoğunluğu yüksek lisans seviyesinde (%67,41) olup doktora tezleri ise toplamın %32,59'unu oluşturmaktadır. Tez danışmanlıklarında Doç. Dr. unvanı %37,36 iken Prof. Dr. unvanı %37,36'dır. Elde edilen veriler; yapay zekâ uygulamalarının inşaat mühendisliği süreçlerinde giderek daha fazla benimsendiğini ve bu alandaki akademik çalışmaların hızla arttığını göstermektedir. Çalışma, bu alandaki gelecekteki araştırmalara yön vermek amacıyla çeşitli öneriler sunmakta ve bibliyometrik analizlerin bilimsel bilgi üretimi üzerindeki önemini vurgulamaktadır.

Bibliometric Analysis of Graduate Theses on Artificial Intelligence in Civil Engineering

Research Article

Article History:
Received: 12.02.2025
Accepted: 08.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Artificial intelligence
Civil engineering
Bibliometric analysis
Artificial neural networks
Optimization

ABSTRACT

The application areas of artificial intelligence in civil engineering include various dimensions such as design optimization, project management, safety systems, cost estimation and sustainability. This study determines the trend of graduate theses on artificial intelligence in civil engineering in Turkey. Within the scope of the study, graduate theses in this field in Turkey were analyzed through the YÖK-TEZ database. Among 1800 theses between 1993 and 2024, 89 theses directly related to civil engineering were analyzed in detail. The results of the bibliometric analysis reveal that theses on artificial intelligence in civil engineering have shown a significant increase especially in recent years. The highest number of theses was written in 2024, reflecting the increase in academic interest. In the study, it was determined that Erciyes University was the institution that produced the most theses in this field. The majority of the theses examined are at the master's level (67.41%), while doctoral theses constitute 32.59% of the total. While the title of Assoc. Prof. Dr. is 37.36% in thesis consultancy, the title of Prof. Dr. is 37.36%. The data obtained show that artificial intelligence applications are increasingly adopted in civil engineering processes and academic studies in this field are increasing rapidly. The study provides several recommendations to guide future research in this field and emphasizes the importance of bibliometric analysis on scientific knowledge production.

To Cite: Özlekli M. İnşaat Mühendisliğinde Yapay Zekâ Konusundaki Lisansüstü Tezlerin Bibliyometrik Analizi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2201-2220.

1. Giriş

Yapay zekâ; inşaat mühendisliği alanında son yıllarda önemli bir gelişim göstermiştir. İnşaat mühendisliği; karmaşık sistemlerin tasarımı, inşası ve yönetimi ile ilgili olduğu için yapay zekâ uygulamaları bu alanda verimliliği artırma potansiyeline sahiptir. Yapay zekânın inşaat mühendisliğindeki rolü; tasarım, inşaat yönetimi, bakım ve altyapı yönetimi gibi çeşitli alanlarda kendini göstermektedir. Bu bağlamda, yapay zekânın inşaat mühendisliğindeki uygulamalarını incelemek, mevcut durumu anlamak ve gelecekteki araştırma yönlerini belirlemek için bibliyometrik bir analiz yapmak önemlidir.

Yapay zekâ uygulamalarının inşaat mühendisliğindeki etkileri; özellikle yapı tasarımı ve analizi alanında belirginleşmektedir. Yapay zekâ algoritmalarının büyük veri setlerini analiz etme yeteneği sayesinde mühendislerin tasarım süreçlerini optimize etmelerine yardımcı olduğu vurgulanmaktadır. Bu, mühendislerin farklı tasarım alternatiflerini hızlı bir şekilde değerlendirmelerine, yapıların farklı koşullar altındaki davranışlarını tahmin etmelerine ve potansiyel arıza modlarını belirlemelerine olanak tanır. Böylece, daha güvenli ve verimli yapılar geliştirilirken tasarım süresi ve maliyetleri de azaltılmaktadır. Ayrıca, yapay zekânın inşaat proje yönetiminde de önemli bir rolü bulunmaktadır. Yapay zekânın bina bilgi modelleme (BIM) sistemleri ile entegrasyonu, proje yöneticilerinin zamanlama, kaynak tahsisi ve maliyet tahmini gibi süreçleri geliştirmelerine yardımcı olmaktadır. Yapay zekâ algoritmaları proje verilerini analiz ederek kalıpları tanımlamakta, potansiyel gecikmeleri tahmin etmekte ve kaynak kullanımını optimize etmektedir. Bu durum, proje planlamasını iyileştirirken inşaat süresini kısaltmakta ve genel proje verimliliğini artırmaktadır (Kumar, 2021).

İnşaat mühendisliğinde yapay zekâ uygulamaları ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmakta olup Zhang (2021) tarafından önerilen bir sistem, inşaat işçilerinin güvenliğini artırmak için yapay zekâ ve makine görüşü teknolojilerini kullanmaktadır. Bu sistem; inşaat sahasındaki tehlikeli durumları gerçek zamanlı olarak tespit etmekte ve önceden tanımlanmış tehlikeli sahneler meydana geldiğinde otomatik uyarılar göndermektedir. Bu tür uygulamalar, inşaat projelerinde güvenlik yönetimini önemli ölçüde iyileştirmektedir. İnşaat mühendisliğinde karar verme tekniklerinin türleri ve yöneticiler tarafından hangi tekniklerin tercih edildiği incelemiştir. Yapay zekânın karar verme süreçlerine entegrasyonunun, inşaat mühendisliği projelerinde nasıl bir etki yarattığını anlamak için önemli bir zemin sunan çalışma yapay zekânın karar verme süreçlerine dahil edilmesi, projelerin daha hızlı ve etkili bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyabileceğini ortaya koymuştur (Ok, 2024; Yücel, 2024). Shukla ve ark., (2019) tarafından yapılan araştırma ile yapay zekânın mühendislik alanındaki uygulamaları ve bu uygulamaların nasıl geliştiği ve etkileri ile etkilerin zaman içerisindeki değişimi ele alınmıştır. Yapay zekânın hizmet sektöründeki etkileri incelenmiştir. Yapay zekânın iş süreçlerini nasıl optimize ettiğini ve veri analizi yeteneklerini nasıl geliştirdiğinin incelendiği çalışma inşaat mühendisliği anlamında

düşünüldüğünde projelerin daha verimli bir şekilde yönetilerek kaynakların daha etkin kullanılmasına imkân sağlayabilecektir (Ok, 2024; Yücel, 2024). Yi ve Luo (2023) yapay zekâ destekli inşaat maliyet tahmin ve kontrol analiz modeli oluşturmuş olup inşaat projelerinin maliyetlerinin belirlenmesi ve karar verme süreçlerinde önemli bir çalışma ortaya konmuştur. Chenya ve ark., (2022) yaptığı bir sistematik literatür taramasında, akıllı yönetim yöntemlerinin inşaat projelerine entegrasyonunun giderek daha kritik hale geldiği vurgulanmaktadır. Aladağ ve ark., (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, yapay zekânın inşaat projelerindeki uygulama alanları maliyet, zaman, kalite, sözleşme, uyuşmazlık, risk, güvenlik ve sürdürülebilirlik olmak üzere sekiz ana başlık altında toplanmıştır. Bu çalışma; inşaat mühendisliği alanında yapay zekânın potansiyelini ortaya koymakta ve gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturmaktadır. Dolayısıyla, bu başlıklar altında yapay zekâ uygulamalarının nasıl optimize edileceği ve hangi yöntemlerin kullanılacağına dair öneriler geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Harle (2023) tarafından yapılan kapsamlı bir incelemede, yapay zekânın inşaat mühendisliği alanındaki çeşitli uygulamaları, zorlukları ve gelecekteki beklentileri ele alınmıştır. Yapay zekânın inşaat mühendisliğinde verimliliği, güvenliği ve sürdürülebilirliği artırma potansiyelini ortaya koymaktadır. Ayrıca, yapay zekânın inşaat mühendisliğinde entegrasyonunun önündeki zorluklar arasında veri erişilebilirliği, etik sorunlar ve işbirlikçi ortaklıkların gerekliliği gibi konuların olduğu belirtilmektedir. Süzen ve Çakıroğlu (2020) tarafından yapılan bir çalışmada; derin öğrenme algoritmalarının sınıflandırma, tahmin ve yorumlama gibi konularda inşaat mühendisliğine katkıları incelenmiştir. Yüksek veri sayısına sahip çalışmalarda derin öğrenme algoritmalarının yüksek başarı oranları elde edeceği öngörülmektedir. Aziz ve ark., (2014) mega inşaat projelerinde yapay zekâ ile akıllı optimizasyon yöntemlerinin kullanılması gerektiğini vurgulamıştır. Kaynak kullanımını optimize etmek ve inşaat süresini kısaltmak için çok amaçlı genetik algoritmaların entegrasyonunu önermişlerdir. Ekmen (2023) inşaat mühendisliğinde zemin mekaniği alanında SPT-CPT ilişkisinin yapay zekâ tekniği ile araştırılmasını incelemiş olup çok sayıda veri kullanımı ile başarılı bir yöntem olacağını belirtmiştir. Bozkurt ve ark., (2023) kendiliğinden yerleşen akıllı hafif betonun fiziksel özelliklerini yapay zekâ modeli ile incelemiş olup deneysel sonuçlar ile %99 benzerlik ortaya çıktığını belirtmiştir. Bingöl ve ark., (2020) yapay zekâyı depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanarak düzensiz taşıyıcı sistem tespiti yapmıştır. Çalışma neticesinde yapay zekanın taşıyıcı sistem düzensizlikleri hakkında tutarlı ve doğru yorum yapabildiğine ulaşmışlardır. Abdeljaber ve ark., (2018) sismik tabanlı yapısal hasarların belirlenmesi amacıyla yapay zekâ modellerini üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir. Yapıları hasar sınıflarına göre dokuz adet sınıfa ayırmış olup yapay zekâ ile hasar miktarı tespiti yapmışlardır. Yapay zekâ modellemesinin gerçek hasar miktarını başarılı bir şekilde tespit ettiğini ortaya koymuşlardır. Atha ve Jahanshahi (2018) korozyon tespiti amacıyla yapay zekâ modeli kullanmış olup korozyonun yapay zekâ modeli ile başarılı bir şekilde belirlendiğini belirtmiştir. Okazaki ve ark., (2020), yapay zekanın beton köprülerde çatlak modelinin uygulanabilirliğini incelemiş olup elde bulunan verilerin çok az olması halinde bile çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Prayogo (2018), beton karışım özellikleri ile erken basınç dayanım deney verilerine göre betonun basınç dayanımını tahmin edebilen bir yapay zekâ

modeli üzerinde çalışmış olup yapay zekânın beton basınç dayanımını tahmin etme konusunda başarılı olduğunu ortaya koymuştur. İnşaat mühendisliği alanında yapay zekâ modellerinin kullanımına ilişkin ile ilgili literatürde yayınlanan birçok makale bulunmaktadır. Allali ve ark., (2018); Doğan (2018); Mohanaselvi ve Hemapriya (2019); Acar ve Saplıoğlu (2020); Cao ve ark., (2020); Kaçın ve Aydın (2020); Yörübulut ve ark., (2020); Gao ve Lin (2021); Zhang ve ark., (2021) inşaat mühendisliği alanında yapay zekâ modellerinin kullanımına ilişkin çalışmalar arasında bulunmaktadır.

Yapay zekâ uygulamalarının inşaat mühendisliğinde entegrasyonu; veri analizi ve karar verme süreçlerini iyileştirmek için kritik bir fırsat sunmaktadır. Bu bağlamda, inşaat mühendisliğinde yapay zekâ kullanımı için önerilen en iyi uygulamalar, maliyet tahmini, risk yönetimi, süreç otomasyonu ve veri analizi gibi alanlarda yoğunlaşmaktadır. Yapay zekâ teknolojilerinin bu alanlarda etkin bir şekilde kullanılması, inşaat projelerinin başarısını artırma potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, yapay zekâ, inşaat mühendisliği alanında önemli bir dönüşüm yaratma potansiyeline sahip bir teknolojidir. Yapay zekâ uygulamaları, tasarım süreçlerinden güvenlik yönetimine kadar geniş bir yelpazede inşaat mühendisliğine katkıda bulunmaktadır. Yapay zekânın inşaat mühendisliğindeki rolünü anlamak ve bu alandaki araştırmaları desteklemek için bibliyometrik analizler yapmak, gelecekteki gelişmeler için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, bibliyometrik analizlerin Yapay zekânın inşaat mühendisliği üzerindeki etkilerini değerlendirmedeki rolü, bu teknolojilerin nasıl uygulandığını ve hangi alanlarda daha fazla etki yarattığını anlamak için kritik bir araçtır. Yapay zekânın inşaat mühendisliğindeki uygulamaları ve bu uygulamaların sonuçları, bibliyometrik analizler aracılığıyla daha iyi anlaşılabilir ve bu alandaki araştırmaların yönü belirlenebilir. Bibliyometrik analizler genellikle sosyal bilimler alanında yapılsa da günümüzde fen bilimleri alanında yapılan çalışmalar da artmaktadır. Bu doğrultuda literatür çalışmalarına bakıldığında Zengin ve Yamaçlı (2024) iklim değişikliği konulu lisansüstü çalışmalar için bibliyometrik analiz çalışması gerçekleştirmiştir. Yücel ve ark., (2022) bal arılarının sindirim kanalında bulunan probiyotik kökenli *bifidobacterium* sp.'nin enzimatik ve bibliyometrik analizi çalışmasını gerçekleştirmiştir. Dertli ve Dertli (2024) metaverse'ün disiplinler arası görünümü kapsamında lisansüstü tez çalışmalarının bibliyometrik analizini gerçekleştirmiştir. Demircan ve Palabıyık (2024) mimari tasarım eğitiminde 21. yüzyıldaki değişimi ile ilgili çalışmaların bibliyometrik analizini gerçekleştirmiştir. Akın (2024) E-atık geri dönüşümü üzerine bibliyometrik analiz gerçekleştirerek VOSviewer ile haritalama yapmıştır.

Yapay zekâ ve inşaat mühendisliği konusundaki akademik çalışmalar artmasına rağmen, Türkiye'de yapılan lisansüstü tezlerin kapsamlı bir bibliyometrik analizinin eksik olduğu görülmektedir. Bu çalışma, bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Bu çalışma, Türkiye'de inşaat mühendisliği alanında yapay zekâ konulu lisansüstü tezlerin bibliyometrik analizini yaparak alandaki eğilimleri, araştırma boşluklarını belirlemeyi ve inşaat mühendisliğinde yapay zekâ kavramının öneminin arttığını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bibliyometrik yaklaşımı ilk kez Alan Pritchard (1969) ortaya atmış ve onu "matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin kitaplara ve diğer iletişim araçlarına uygulanması" olarak tanımlamıştır. Daha sonra Hawkins, Pritchard'ın tanımını genişleterek bibliyometriyi "bir literatürün bibliyografik özelliklerinin niceliksel analizi" şeklinde ifade etmiştir (Hawkins, 2001; Vošner ve ark., 2016). Özetle bibliyometrik analizi, bilimsel yayınlar ve literatür üzerindeki niceliksel çalışmaların değerlendirilmesi ve analiz edilmesi yöntemi olarak tanımlamak mümkündür. Bu analiz; bilimsel araştırma faaliyetlerinin ölçülmesi, belirli bir konu üzerindeki araştırma eğilimlerinin, iş birliği ağlarının, en çok atıf alan yayınların, yazarların ve anahtar kelime trendlerinin belirlenmesi gibi amaçlarla kullanılabilmektedir. Kişiler veya kurumlar tarafından ortaya çıkarılan, üretilen belirli alanlardaki araştırmalar ile ilgili mevcut literatürü gösteren bilimsel çalışmaları ve bu çalışmaların birbiri ile ilişkisinin istatistiksel yönden incelenmesi ve bu doğrultuda değerlendirilmesini esas alan yazı ve görsel araçların uygulanması yöntemi bibliyometrik analizin bir başka şekilde ifade edilişidir. (Mcburney ve Novak, 2002; Evren ve Kozak, 2014). Günümüzde bibliyometrik analiz yöntemi tüm bilim dalları içerisinde kendine yer bulan bir uygulama alanı olmakla birlikte herhangi bir yayının mevcur süreç içerisindeki durumunu ortaya koyması yönüyle oldukça önem taşımaktadır (Okubo, 1997). Herhangi bir bilim dalı ile ilgili araştırmaların mevcut durumu, gelişimi, eğilimi ve dönüşümü belirlenirken elde edilen verilerin sınıflandırılması ve bu verilerin analiz edilmesi bibliyometrik analiz yöntemi ile mümkün olmaktadır. Bu yöntem ulaşılması amaçlanan bilgilerin doğru ve güvenilir olmasına ve kendisinden önce bulunan bilgiler ile birleştirildiği takdirde bilimsel kaynakların artmasına olanak tanır (Kim ve Mcmillan, 2008). Bir diğer araştırma yöntemi olan Bilimetri (Scientometri) ise herhangi bir konu ile ilgili bilimsel gelişme durumunu göstermek amacıyla matematiksel yöntemlerin kullanıldığı, bilimsel karar süreci ve yönetim için temel bilgi sağlayan bir disiplindir. (Qiu ve ark., 2017). Bilimetri, bilime rehberlik ederek bilimsel faaliyetleri değerlendirmekte, atıf analizi ve diğer nicel yöntemlerin kullanılmasını sağlamaktadır. (Egghe, 2005). Bibliyometri ve bilimetri herhangi bir konuya ait ilişkileri, demografik özellikleri ortaya çıkarması bakımıyla birbirine benzer araştırma alanlarıdır. Kullanılan araçlar ve teknik ile arka plandaki teori ortak olmasına karşın analizler esnasında odaklanılan konular birbirinden farklı olabilmektedir. (Damar ve Aydın, 2024). Bibliyometri, bir konunun sayısal analizini yaparak en uygun kaynakların bir araya getirilmesini sağlayabilir. (Allen, ve ark., 2006). Bilimetri, ise tersine bir konunun nicel özellikleri ile ilgilenir (Damar ve Aydın, 2024).

Bu çalışma kapsamında nicel araştırma yöntemleri arasında bulunan bilimsel haritalama tekniğini temelinde olan bibliyometrik analiz yöntemi kullanılmıştır. Bibliyometrik analiz doğrultusunda çalışmanın kapsamını YÖK-TEZ'de taranan lisansüstü tezler oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen veriler ise Yök Ulusal Tez Merkezi'nde tez başlığında "yapay zekâ" ya da "yapay zeka" anahtar sözcüğü kullanılan, taranmış ve ulaşılan 1800 adet tez içerisinden 89 adedi incelenmiştir. Tezlerin taramaları tez başlığı, özet, ana bilim dalı ve konu bilgilerini içerek şekilde gerçekleştirilmiştir. Araştırmada zaman dilimi olarak 1993 ile 2024 yılları temel alınmıştır. Tezlerin yıllara göre eğilimi

izlenmiş yayınlandıkları yıl, tez dili, tez türü, üniversiteler, ana bilim dalları, danışman bilgileri, sayfa sayılarına göre incelenmiştir. Analize ilişkin akış şeması Şekil 1'de sunulmuştur. Araştırma sonucunda ulaşılan çıktıların inşaat mühendisliğinde yapay zekâ kavramının Türk literatüründeki gelişimine ışık tutması ve/ya bibliyometrik analiz tekniğiyle gerçekleştirilecek yeni araştırmalara ve uygulamalara niceliksel ve niteliksel özgün bir perspektif sunması beklenmektedir.



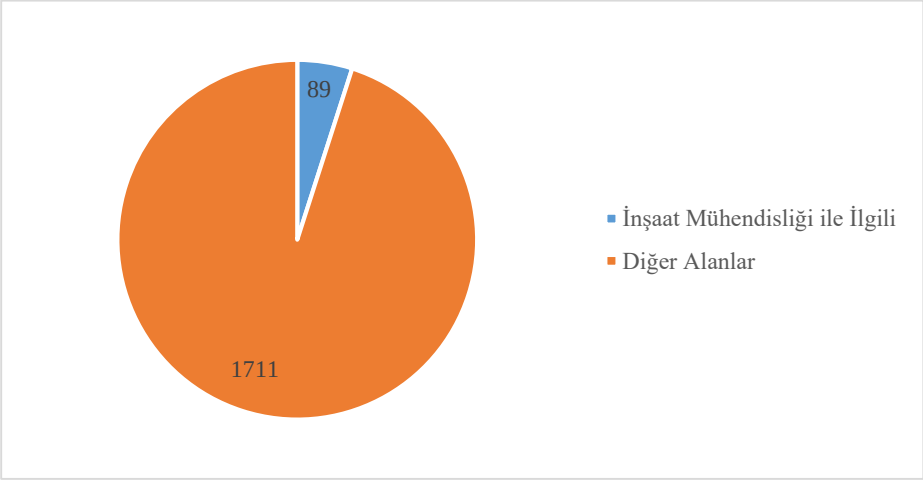
Şekil 1. Bibliyometrik analiz akış şeması

3. Bulgular

Türkiye'de inşaat mühendisliğinde yapay zekâ ile ilgili yapılan lisansüstü araştırmalara ilişkin bulgular; araştırma kapsamında belirlenen parametrelere göre ilgili başlıklar altında grafiklerle desteklenerek sunulmuştur. Araştırmacı tarafından belirlenen parametrelere yönelik yapılan analizlerin sonucunda ulaşılan bulgular şu şekildedir:

Tezlerin Alanına Göre Dağılım

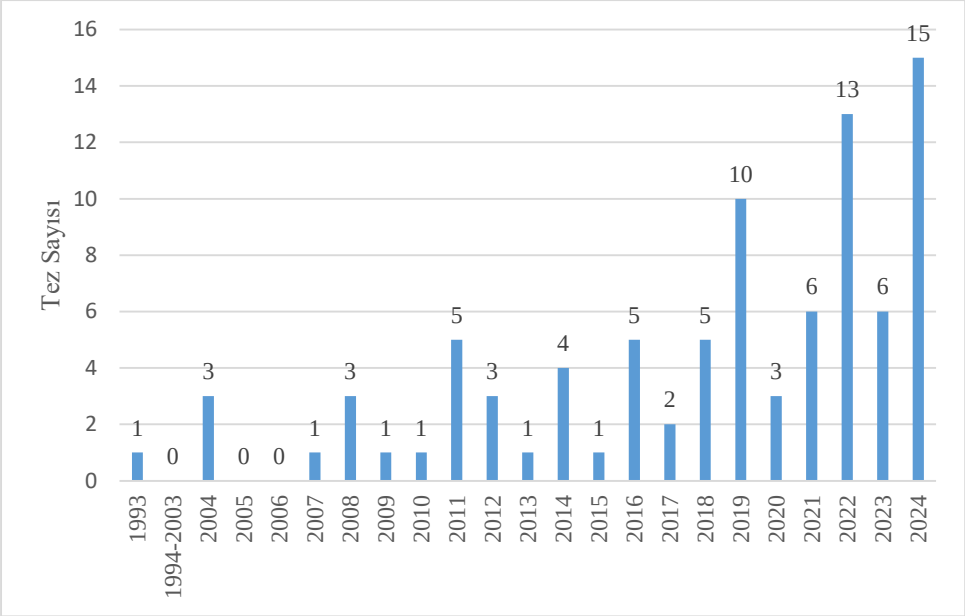
Yök Ulusal Tez Merkezi sistemi (YÖK-TEZ) üzerinde "yapay zekâ" veya "yapay zeka" anahtar sözcüğünün bulunduğu tez isimleri incelendiğinde toplam 1800 Adet tez bulunduğu görülmüştür. Bu tezlerin 89 adedinin inşaat mühendisliği alanı ile ilgili olduğu ortaya çıkmaktadır. İnşaat mühendisliği alanı ile ilgili olan tezler tüm tezlerin %4,9 unu oluşturmaktadır. Bu istatistiği gösterir görsel Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Yapay zekâ ile ilgili tezlerin dağılımı

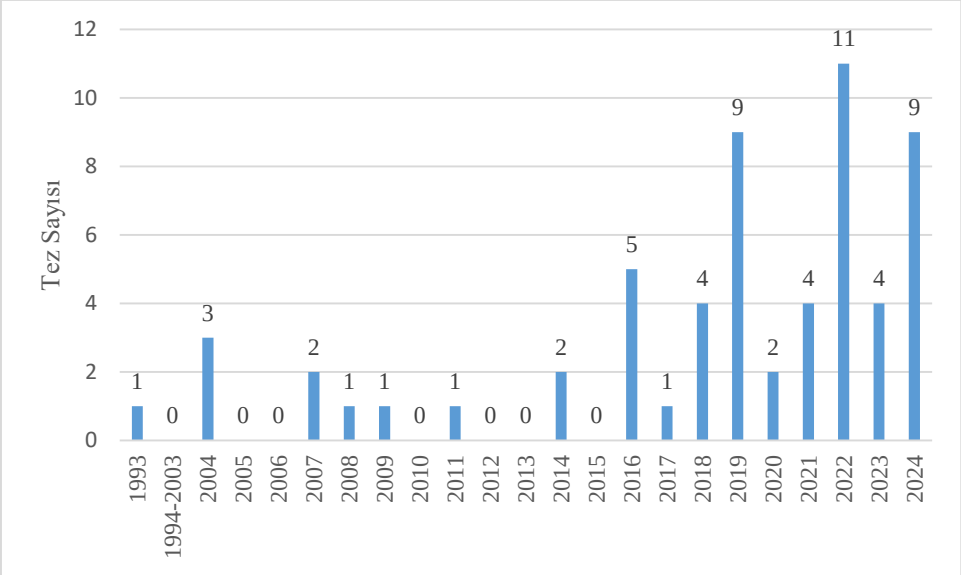
Yıllara Göre Dağılım

Lisansüstü tezlerin yayınlandığı yıllar dikkate alındığında inşaat mühendisliğinde yapay zekâ konulu tezlerin ilk olarak 1993 yılında son olarak ise 2024 yılında yayınlandığı görülmektedir. Bu doğrultuda bakıldığında bu alanda lisansüstü tezlerin başlangıcı olarak 1993 yılıdır. 1993 yılı ile 2024 yılı arasındaki tezler incelendiğinde herhangi bir tez çalışmasının yayınlanmadığı yıllar 1994-2003, 2005 ve 2006'dır. 2006 yılından sonra dalgalı bir şekilde artan bir eğilim gösterse de son yıllarda inşaat mühendisliğinde yapay zekâ ile ilgili yazılan tezlerin artış gösterdiği Şekil 3'de görülmektedir.



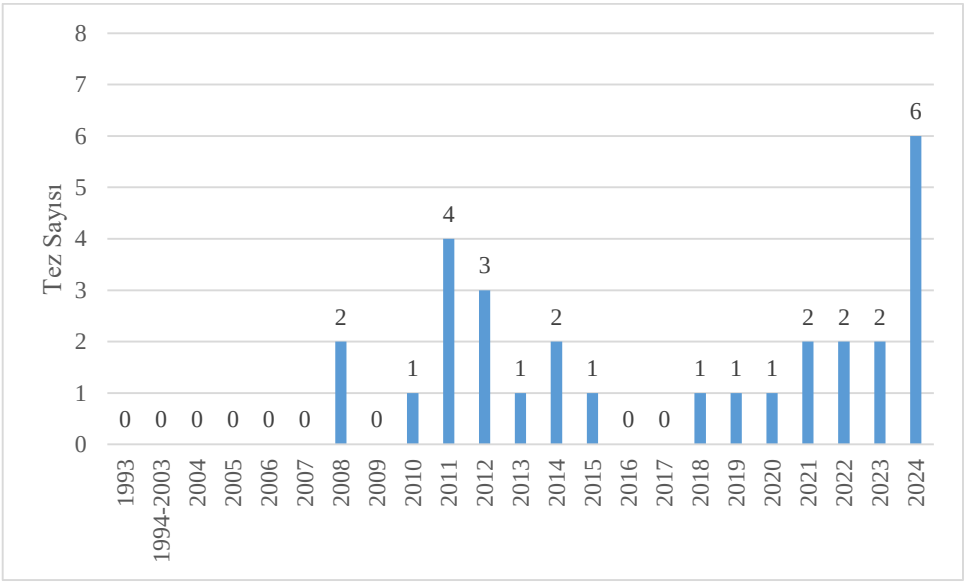
Şekil 3. Yıllara göre yayınlanan tez sayıları

En çok lisansüstü tez gerçekleştirilen yıl tüm çalışmaların %16,85'inin gerçekleştirildiği 2024'tür. Bunu sırasıyla 2022 (%14,61) ve 2019 (%11,23) yılları izlemektedir. Analiz edilen 89 tez içinde, en fazla tez 2024 yılında üretilmesi ve bu artışın nedenleri arasında, Türkiye'de son yıllarda yapay zekâ ve büyük veri analitiği konularına verilen akademik ve sektörel önem yer almaktadır. Özellikle TÜBİTAK, Avrupa Birliği ve sanayi destekli projelerle yapay zekâ ve makine öğrenmesi gibi konuların teşvik edilmesi, lisansüstü tezlerin bu alana yönelmesini sağlamıştır. Ayrıca, inşaat mühendisliği projelerinde BIM (Bina Bilgi Modellemesi) ve dijital ikiz teknolojilerinin yaygınlaşması da yapay zekâ uygulamalarına ilgiyi artırmıştır. Ocak 2025 yılı itibariyle YÖK-TEZ'de henüz herhangi bir tez yayınlanmamıştır. Bu tarihten sonra gerçekleştirilen lisansüstü tezlerin veri tabanına eklenmesi ihtimal dâhilindedir



Şekil 4. Yüksek lisans tezlerinin yıllara göre değişimi

Şekil 4'te yüksek lisans tezlerinin yıllara göre değişimi incelendiğinde özellikle 2016 yılına kadar yüksek lisans tezlerinin sayısı 0-3 arasında iken 2016 yılından itibaren günümüze kadar önemli miktarda artış göstermiştir. Yüksek lisans tezlerinin en fazla yayınlandığı yıl 11 adet tez (%12,36) ile 2012 yılıdır. Tez yayınlanma grafiği dalgalı olsa da 2016 yılından sonra yıllık ortalama 5,4 tez yayınlanmıştır.

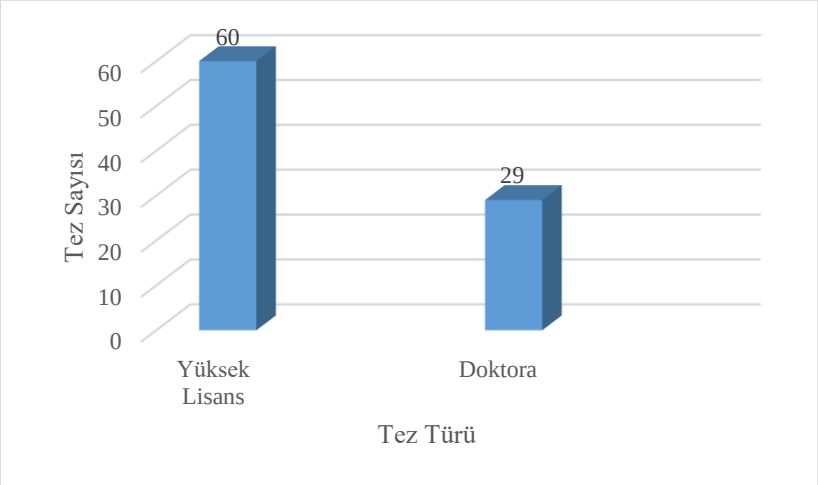


Şekil 5. Doktora tezlerinin yıllara göre değişimi

Şekil 5'te doktora tezlerinin yıllara göre değişimi incelendiğinde 2008 yılından sonra doktora tezlerinde çok önemli artış olmasa da istikrarlı sayılabilecek miktarda tez yayınlanmaya başlamıştır. Günümüze kadar bakıldığında 2024 yılında en çok doktora tezi yayınlanmış olup 6 adet ile tüm tezlerin %6,74'lük oranı kadardır. Doktora çalışmalarının daha kapsamlı ve süreç alan bir çalışma olduğu düşünülürse 2016 ve 2017 yıllarında tez yayınlanmamasının normal olabileceği kabul edilebilir.

Türlere Göre Dağılım

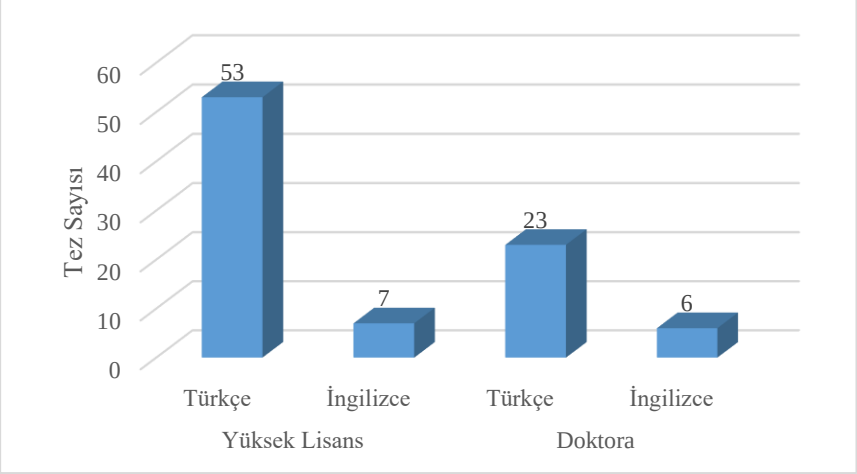
Araştırma kapsamında incelenen lisansüstü tezlerden (Şekil 6) Yüksek Lisans derecesinde yazılmışken 60 adet tez (%67,41), kalan kısmı Doktora derecesinde (%32,59) 29 adet tez yayınlanmıştır.



Şekil 6. Tez türlerine göre tez sayısı

Dillere Göre Dağılım

Yayınlanan lisansüstü tezlerin 76 adedi (%85,39) Türkçe, 13 adedi (%14,61) ise İngilizce olarak yazılmıştır. Lisansüstü düzeyine göre bakıldığında yüksek lisans tezlerinin 53 adedi (%88,33) Türkçe yazılmışken doktora derecesindeki tezlerin 23 adedi (%79,31) Türkçe olarak yazılmıştır. Tez dillerine göre tez sayısı dağılımı Şekil 7'da görülmektedir.



Şekil 7. Dillere göre tez sayısı

Üniversitelere Göre Dağılım

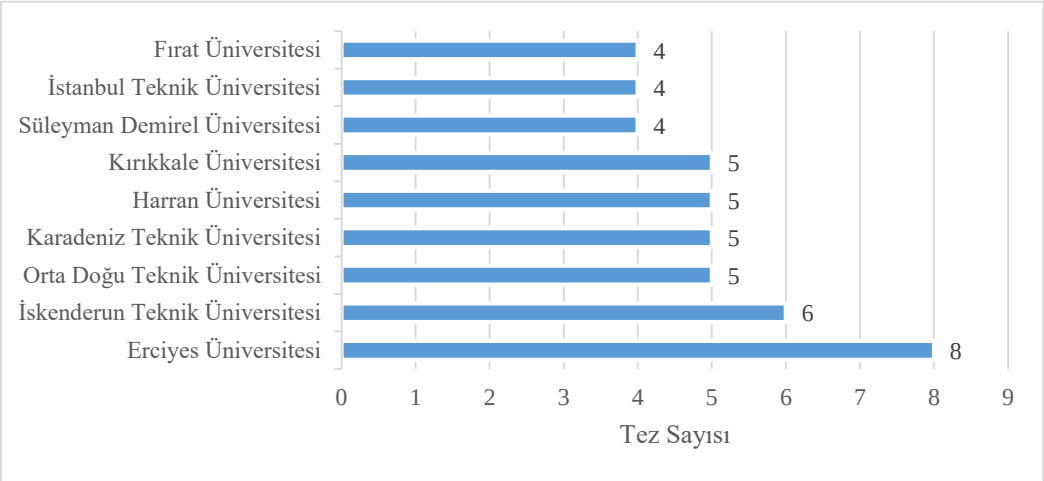
Çalışma kapsamında incelenen tezlerin çalışıldığı üniversiteler incelenmiş olup toplamda 40 farklı üniversite çatısında çalışıldığı Tablo 1'de görülmektedir. En çok yayınlanan 9 üniversiteye ilişkin veriler incelendiğinde bu üniversitelerde yayınlanan lisansüstü tezler toplam tezlerin yarısından fazlasını oluşturmaktadır (%51,68). İnşaat mühendisliği alanında yapay zekâ kapsamlı çalışmalar konusunda en çok lisansüstü tez Erciyes Üniversitesi (%8,99) olup onu İskenderun Teknik Üniversitesi (%6,74), Orta

Doğu Teknik Üniversitesi (%5,62), Karadeniz Teknik Üniversitesi (%5,62), Harran Üniversitesi (%5,62) ve Kırıkkale Üniversitesi (%5,62) takip etmektedir. En çok tez yayınlayan 9 üniversitenin tez sayısını ve eğilimi gösteren görsel Şekil 8'te sunulmuştur.

Tablo 1. Üniversite Listesi

Üniversite Adı	Tez Adedi	Oran (%)
Erciyes Üniversitesi	8	8,99
İskenderun Teknik Üniversitesi	6	6,74
Orta Doğu Teknik Üniversitesi	5	5,62
Karadeniz Teknik Üniversitesi	5	5,62
Harran Üniversitesi	5	5,62
Kırıkkale Üniversitesi	5	5,62
Süleyman Demirel Üniversitesi	4	4,49
İstanbul Teknik Üniversitesi	4	4,49
Fırat Üniversitesi	4	4,49
Konya Teknik Üniversitesi	3	3,37
Gaziantep Üniversitesi	3	3,37
Atatürk Üniversitesi	3	3,37
Sakarya Üniversitesi	2	2,25
İstanbul Üniversitesi	2	2,25
Gazi Üniversitesi	2	2,25
Düzce Üniversitesi	2	2,25
Dokuz Eylül Üniversitesi	2	2,25
Celal Bayar Üniversitesi	2	2,25
Yıldız Teknik Üniversitesi	1	1,12
Selçuk Üniversitesi	1	1,12
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	1	1,12
Ondokuz Mayıs Üniversitesi	1	1,12
Munzur Üniversitesi	1	1,12
Kastamonu Üniversitesi	1	1,12
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi	1	1,12
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	1	1,12
İstanbul Kültür Üniversitesi	1	1,12
Hasan Kalyoncu Üniversitesi	1	1,12
Hakkari Üniversitesi	1	1,12
Eskişehir Teknik Üniversitesi	1	1,12
Erzurum Teknik Üniversitesi	1	1,12
Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi	1	1,12
Ege Üniversitesi	1	1,12
Dicle Üniversitesi	1	1,12
Çankırı Karatekin Üniversitesi	1	1,12
Bitlis Eren Üniversitesi	1	1,12
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi	1	1,12
Bartın Üniversitesi	1	1,12
Aksaray Üniversitesi	1	1,12

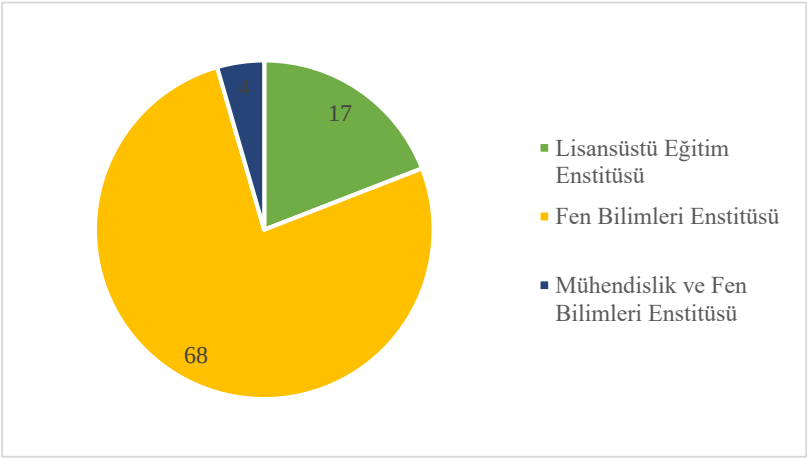
Akdeniz Üniversitesi	1	1,12



Şekil 8. Üniversitelere göre tez sayısı dağılımı

Enstitülere Göre Dağılım

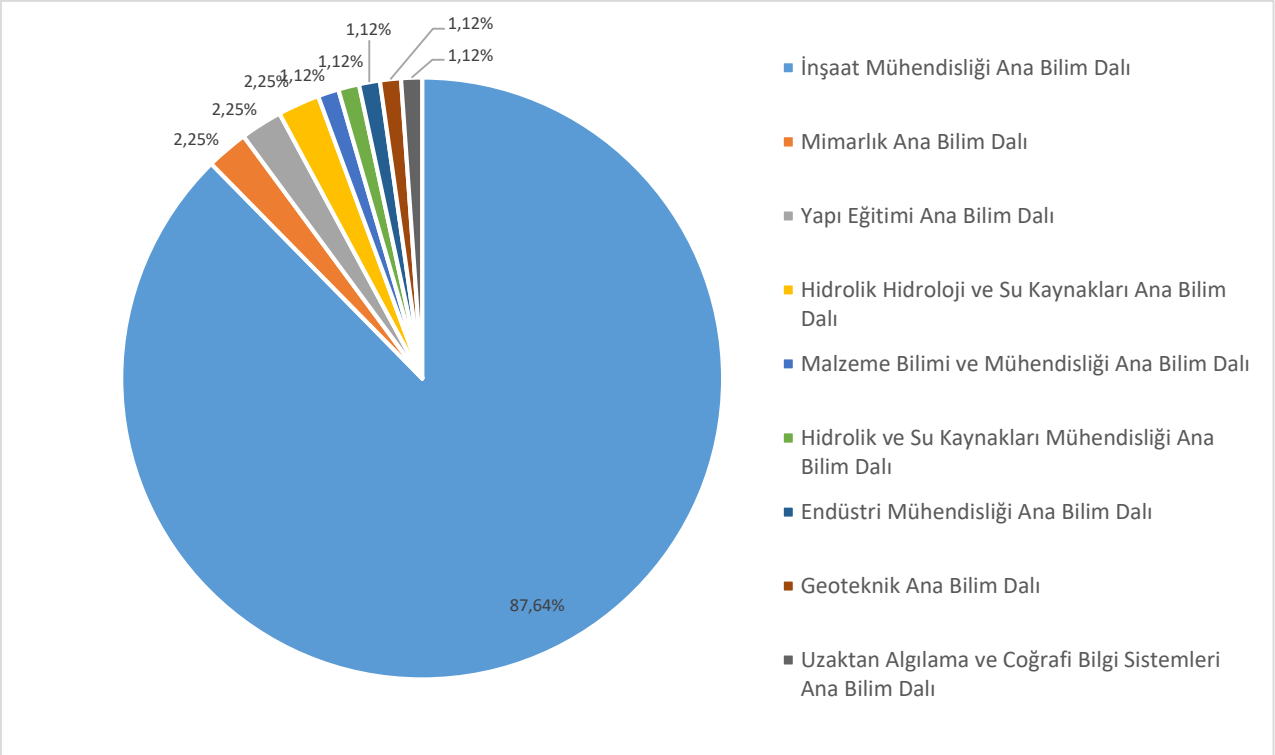
Araştırma kapsamında incelenen lisansüstü tezlerin (Şekil 9) beşte dördünden fazlası (%76,40) fen bilimleri enstitüsü bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Bunu, %19,10 ile lisansüstü eğitim enstitüsü takip etmektedir.



Şekil 9. Enstitülere göre tez dağılımı

Anabilim Dallarına Göre Dağılım

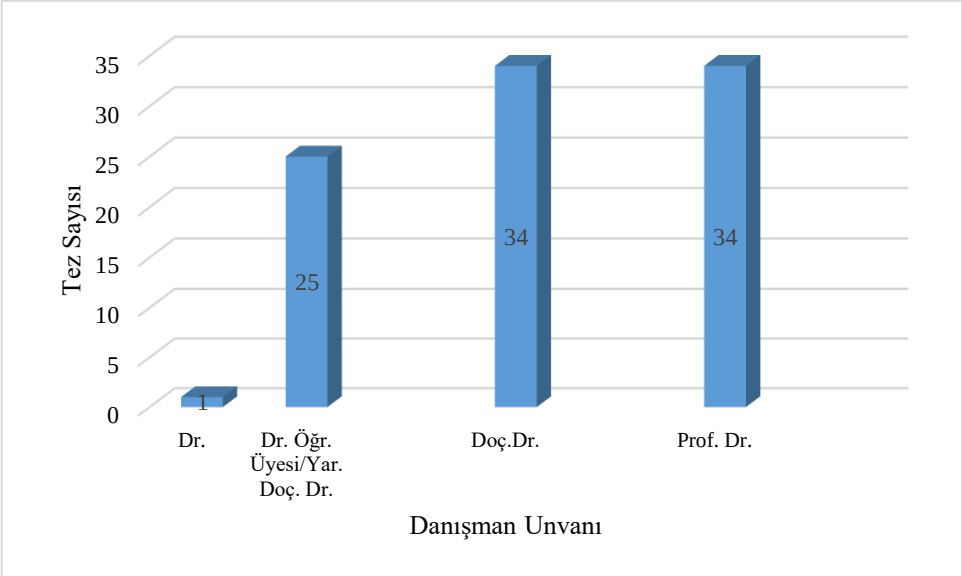
Çalışma kapsamında incelenen tezlerin toplamda farklı isimlere sahip 9 anabilim dalı bünyesinde gerçekleştirildiği görülmektedir. İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı 78 adet tez (%87,64) ile en çok yayınlanan ana bilim dalı olurken onu Mimarlık Ana Bilim Dalı, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı ve Hidrolik Hidroloji ve Su Kaynakları Ana Bilim Dalı 2'şer adet (%2,25) ile takip etmektedir. Ana bilim dallarının dağılımı gösterir grafik görsel Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Ana Bilim Dallarına göre tez dağılımı

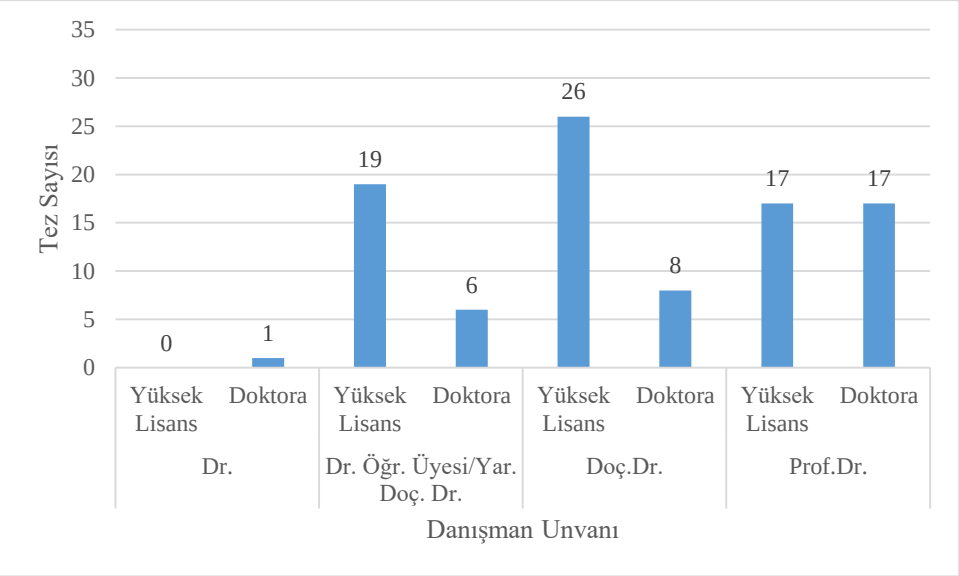
Tez Danışmanlarının Unvanlarına Göre Dağılım

Tez Danışmanlarının Unvanlarına Göre Tez Dağılımı Doç. Dr. ve Prof. Dr. unvanı 34 adet olup Dr. Öğr. Üyesi 25 adet ile takip etmektedir. Dr. Unvanı ise sadece 1 adet ile sınırlı kalmıştır. Bazı çalışmalarda ortak danışmanlık uygulaması yapıldığı görülmüştür. Tez danışmanlarının dağılımını gösteren grafik görsel Şekil 11'da görülmektedir.



Şekil 11. Lisansüstü tezlerin danışmanlık unvanlarına göre dağılımı

Akademik unvanlara göre danışmanlıkların yüksek lisans ve doktora tez dağılımı Şekil 12'de görülmektedir.

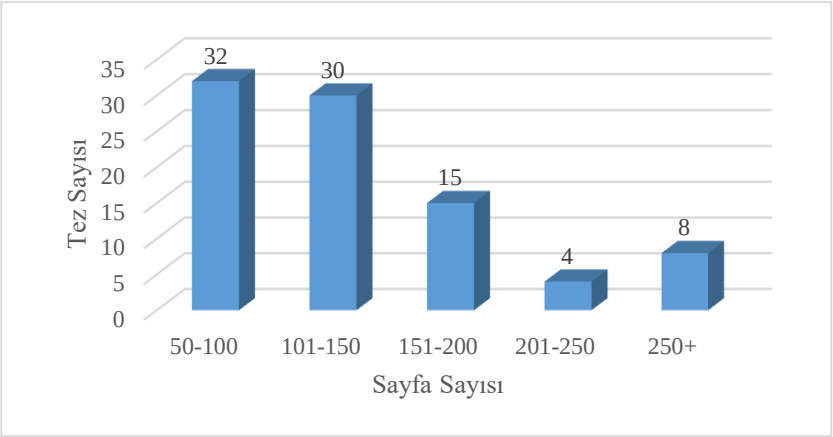


Şekil 12. Akademik unvan tez dağılımı ilişkisi

Şekil 12 incelendiğinde akademik unvanın artması ile doktora tezlerinin artışı yönünde bir eğilim olduğu görünmektedir. Bu doğrultuda doktora tezleri arasında en çok danışmanlık yapan unvan 17 adet (%18,08) ile Prof. Dr. unvanıdır. Doç. Dr. unvanı 8 adet doktora tezi (%8,51) ile takip etmektedir. Yüksek lisans tezlerine bakıldığında ise Doç. Dr. unvanının 26 adet (%27,66) ile ciddi bir şekilde diğer unvanlara göre fazla olduğu görülmektedir. Doç. Dr. unvanını 19 adet (%20,21) ile Dr. Öğr. Üyesi ve 17 adet (%18,08) ile Prof. Dr. unvanı takip etmektedir.

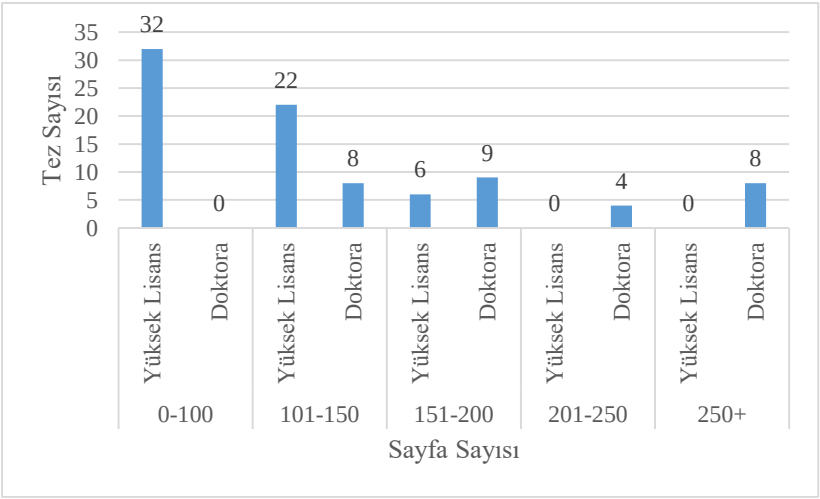
Lisansüstü Tezlerin Sayfa Aralıklarına Göre Dağılım

Lisansüstü tezler arasında sayfa sayıları incelendiğinde tezlerin %35,95 i 50-100 sayfa aralığında bulunmaktadır. Bu oranı %33,71 ile 101-150 sayfa aralığı takip etmektedir. 151-200 sayfa aralığında olan tezler %16,85 orana sahip iken 201 sayfa ve üzerindeki tezler tüm tezlerin %13,48'ini oluşturmaktadır. Sayfa sayısı ile tez sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik görsel Şekil 13'de görülmektedir.



Şekil 13. Lisansüstü tezlerin sayfa sayısına göre dağılımı

Sayfa sayıları ile tez türleri arasındaki ilişkiyi gösterir grafik görsel Şekil 14'te görülmektedir. Yüksek lisans tezlerinin 32 adedi (%35,95) 0-100 sayfa aralığında iken 22 adedi (%24,72) 101-150 sayfa aralığında bulunmaktadır. 0-100 sayfa aralığında herhangi bir doktora tezinin olmaması dikkat çekici olup doktora tezlerinin nitelikli veya daha detaylı olabileceğini göstermektedir. Sayfa sayısı 200 ve üzerinde olan herhangi bir yüksek lisans çalışmasının bulunmaması da yüksek lisans çalışmalarının çok geniş kapsamlı olmadığın göstermektedir. Doktora tezlerinin 9 adedi (%10,11) 151-200 sayfa aralığında iken 101-150 sayfa ile 250 ve üzeri sayfa sayısına sahip olan tezler 8'er (%8,99) ile takip etmektedir.



Şekil 14. Sayfa sayısı tez türü ilişkisi

İnşaat mühendisliği alanında yapay zekâ ile ilgili hazırlanmış olan lisansüstü tezlerde genellikle kullanılan anahtar kelimelere ait kod bulutu şekil 15'de görülmektedir.



Şekil 15. Yaygın şekilde kullanılan anahtar kelimelerin kod bulutu

Tezlerde kullanılan anahtar kelime sayıları farklılık göstermekle birlikte en az 3 anahtar kelime bütün tezlerde yer almaktadır. En sık kullanılan anahtar kelime "Yapay Sinir Ağları (YSA)" (16) kavramı olmuştur. Onu takip eden "Yapay Zekâ" (14) anahtar kelime olarak tezlerde kullanılmaktadır. Tezlerde en sık kullanılan diğer anahtar kelimeler ise Regresyon (10), Makine Öğrenmesi (9), Hidrolojik Modelleme (8), Optimizasyon (7), Su Kalitesi (6), Betonarme (6), Evapotranspirasyon (5), Dalgacık Dönüşümü (5), Baraj (5) olarak ortaya çıkmıştır.

4. Tartışma

Bu çalışmada; Türkiye'de inşaat mühendisliği alanında yapay zekâ konulu lisansüstü tezlerin sayısal artış gösterdiği ve bu artışın özellikle son on yılda hız kazandığı belirlenmiştir. Tezlerde en çok kullanılan anahtar kelimelerin "yapay sinir ağları", "makine öğrenmesi" ve "regresyon" olması, veri odaklı yaklaşımların ön planda olduğunu göstermektedir. Konuların çeşitlenmesi, yapay zekânın inşaat mühendisliği alt alanlarına giderek daha fazla entegre edildiğine işaret etmektedir. Tezlerin büyük kısmının yüksek lisans düzeyinde olması, uygulama odaklı çalışmaların ağırlıkta olduğunu göstermekte; doktora tezlerinin artışı ise daha derinlemesine araştırmalara duyulan gereksinimi yansıtmaktadır. Çoğu tezin devlet üniversitelerinde yapılmış olması özel üniversitelerin potansiyelinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Araştırmanın temel sınırlılığı, sadece YÖK Ulusal Tez Merkezi'nde açık erişimli tezleri kapsamasıdır. Bu nedenle bazı güncel çalışmalar analiz dışında kalmış olmasına rağmen bu bulgular, Türkiye'deki genel eğilimleri yansıtmak açısından yeterlidir. Sonuç olarak, yapay zekâ tabanlı akademik üretimin Türkiye'de artmakta olduğu, ancak henüz sistematik araştırma programlarına dönüşmediği görülmektedir. Bu eğilimin sürdürülebilirliği, disiplinler arası iş birlikleri ve doktora düzeyinde yapılacak nitelikli çalışmalarla sağlanabilir.

5. Sonuç

Bu çalışma; Türkiye'de yapay zekâ ve inşaat mühendisliği konulu tezlerin bibliyometrik analizini yaparak, akademik dünyada bu alana olan ilgiyi ve yönelimleri ortaya koymaktadır. Özellikle 2024 yılında yapay zekâ temalı tezlerde gözlemlenen artış, Türkiye'deki akademik çevrelerin dijital mühendislik yaklaşımlarına giderek daha fazla odaklandığını göstermektedir. Ancak, uluslararası

çalışmalarla kıyaslandığında, Türkiye'de hâlâ ileri yapay zekâ teknikleri (derin öğrenme, otonom robot sistemleri vb.) üzerine yapılan tezlerin sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, daha fazla disiplinler arası iş birliği teşvik edilerek, yapay zekâ uygulamalarının mühendislik alanında daha geniş bir çerçevede ele alınması gerekmektedir. Akademik literatürde son on yılın popüler kavramlarından bir olan yapay zekâ kavramına dair ulusal literatürde yapılan lisansüstü tez çalışmalarının nicel olarak analiz edildiği çalışmada inşaat mühendisliği ile ilgili olan çalışmalara ilişkin birtakım sonuçlar elde edilmiştir. YÖK tez veri tabanında "yapay zekâ" ve "yapay zekâ" kelimeleri ile arama yapılmıştır. Bu durumda tez başlığında a harfinin kullanımı ile ilgili farklı kullanımlar olduğunu göstermiş ve tarama yapılırken şapkalı a kullanımına dikkat edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Yapılan taramada ilki 1993 yılında yayınlanmış toplam 1800 tez çalışması elde edilmiş, bir tez çalışmasının yazar tarafından kısıtlanmış olmasından dolayı 89 tez çalışması bibliyometrik özellikleri belirlenmiştir. Analizde elde edilen bulgular neticesinde en çok tez çalışmasının 2024 yılında yapıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan bibliyometrik içerik analizinde elde edilen bulgular ulusal literatürde yapılan lisansüstü tezlerde araştırmacıların nitel araştırma yöntemlerinden doküman, örnek olay desenlerini kullanıldığını ortaya koymuştur. İnşaat mühendisliği alanında 2007 yılından itibaren popülerleşen inşaat mühendisliğinde yapay zekâ kavramının 1993 yılından itibaren yayımlandığı, ancak belirli yıllarda çalışma yapılmadığı görülmüştür. Özellikle son beş yılda tez sayılarında belirgin bir artış gözlemlenmiş ve en fazla tez 2024 yılında yazılmıştır. Yüksek lisans tezlerinin 2016 yılından sonra önemli miktarda arttığı doktora tezlerinin ise 2008 yılından sonra az miktarda yapılmasına rağmen istikrarlı bir eğilim gösterdiği ancak 2024 yılında kayda değer miktarda tez üretildiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, yapay zekâ uygulamalarının inşaat mühendisliği alanında daha fazla benimsenmeye başlandığını ve akademik ilgide önemli bir artış yaşandığını göstermektedir. Üniversitelere göre yapılan dağılım analizinde, inşaat mühendisliğinde yapay zekâ konulu çalışmaların Erciyes Üniversitesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi gibi belirli kurumlarda yoğunlaştığı belirlenmiştir. Tez danışmanlığı anlamında ise Erciyes Üniversitesi'nden Prof. Dr. Hatice Çıtakoğlu'nun danışmanlığını yaptığı (Altuntaş, 2018; Özen, 2018; Özeren, 2022) çalışmalar ile inşaat mühendisliğinde yapay zekâ alanında yayınlanan lisansüstü tez adedinde öncü durumdadır. Bu durum, belirli akademik çevrelerin ve araştırma gruplarının bu alandaki çalışmalara yön verdiğini göstermektedir. Türkiye'de yapılan lisansüstü tezler daha çok yüksek lisans düzeyindedir. Yüksek lisans ve doktora düzeyinde oluşturulan tez çalışmalarının büyük kısmı Türkçe olarak yazılmıştır. Tez danışmanlarının büyük bir kısmının Doç. Dr. ve Prof. Dr. unvanına sahip olduğu, yani akademik kariyerinin orta ve ileri aşamasında olan araştırmacılar tarafından yönlendirildiği tespit edilmiştir. Tez danışmanlıkları anlamında değerlendirildiğinde yüksek lisans tezlerinde genellikle Doç. Dr. doktora tezlerinde ise Prof. Dr. unvanlı danışmanlıklar ağırlıkla bulunmaktadır. Tezlerin türlerine göre incelenmesi, inşaat mühendisliği alanında yazılan yapay zekâ tezlerinin büyük bir kısmının yüksek lisans düzeyinde (%67,41) olduğunu göstermektedir. Doktora düzeyindeki tezlerin oranının %32,59 olması, alandaki bilimsel katkının daha çok yüksek lisans öğrencileri tarafından yapıldığını ortaya koymaktadır. Yüksek lisans tezlerinin sayfa sayıları ağırlıkla 0-

100 aralığında iken 250 ve üzerinde bulunmamaktadır. Doktora tezlerinin sayfa aralıkları ise 0-100 arasında bulunmamakla birlikte genellikle 151-200 arasında değişmektedir. Çalışmalarda anahtar kelime analizine göre, en sık kullanılan terimler "Yapay Sinir Ağları (YSA)", "Makine Öğrenmesi", "Regresyon", "Optimizasyon" ve "Bina Bilgi Modellemesi (BIM)" olmuştur. Bu, yapay zekâ tekniklerinin en çok tasarım optimizasyonu, maliyet tahmini, yapı sağlığı izleme ve proje yönetimi gibi alanlarda kullanıldığını göstermektedir. İnşaat mühendisliğinde yapay zekâ konusunda ulusal literatürde yapılan lisansüstü tezler yapay zekânın inşaat mühendisliği alanındaki etkileri ortaya koymanın yanı sıra çalışmaların gelişerek devam etmesi anlamında da önem taşımaktadır. Her geçen gün önemi giderek artan yapay zekâ kavramıyla ilgili yapılan bu bibliyometrik çalışmanın bilimsel alanda konuyla ilgili yapılacak çalışmalara rehberlik etmesi ve geniş bir özet üzerinden bilgilendirilmesi noktasında katkı sağlayacağı düşünülmektedir

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Abdeljaber O., Avci O., Kiranyaz MS., Boashash B., Sodano H., Inman DJ. 1-D CNNs for structural damage detection: Verification on a structural health monitoring benchmark data. Neurocomputing 2018; 275: 1308-1317.

Acar R., Saplıoğlu K. Akarsulardaki sediment taşınımının yapay sinir ağları ve anfıs yöntemleri kullanılarak tespiti. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 9(1): 437-450.

Akın HK. E-atık geri dönüşümü: Bibliyometrik analiz ve VOSviewer ile haritalama. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(5): 2114-2125.

Aladağ H., Güven İ., Balli O. Contribution of artificial intelligence (ai) to construction project management processes: State of the art with scoping review method. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences 2024; 42(5): 1654-1669.

Allali SA., Abed M., Mebarki A. Post-earthquake assessment of buildings damage using fuzzy logic. Engineering Structures 2018; 166: 117-127.

Allen M., Jacobs SK., Levy JR. Mapping the literature of nursing: 1996–2000. Journal of the Medical Library Association 2006; 94(2): 206-220.

Altuntaş M. Yeşilırmak havzası su kalitesi parametrelerinin yapay zekâ teknikleriyle modellenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:80, Kayseri, Türkiye, 2018.

Atha DJ., Jahanshahi MR. Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection. Structural Health Monitoring 2018; 17(5): 1110-1128.

Aziz RF., Hafez SM., Abuel-Magd YR. Smart optimization for mega construction projects using artificial intelligence. Alexandria Engineering Journal 2014; 53(3): 591-606.

Bingöl K., Akan AE., Örmecioğlu HT., Er A. Depreme dayanıklı mimari tasarımda yapay zeka uygulamaları: Derin öğrenme ve görüntü işleme yöntemi ile düzensiz taşıyıcı sistem tespiti. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2020; 35(4): 2197-2210.

Bozkurt N., Karaca EO., Baydaş MT. Kendiliğinden yerleşen akıllı hafif betonun fiziksel özelliklerinin yapay zekâ modeli ile incelenmesi. Beton 2023 Kongresi Bildirileri 2023.

Cao Y., Wakil K., Alyousef R., Jermsittiparsert K., Ho LS., Alabduljabbar H., Alaskar A., Alrshoudi F., Mohamed AM. Application of extreme learning machine in behavior of beam to column connections. Structures 2020.

Chenya L., Aminudin E., Mohd S., Yap LS. Intelligent risk management in construction projects: Systematic literature review. IEEE Access 2022; 10: 72936-72954.

Çakıroğlu MA., Süzen AA. Assessment and application of deep learning algorithms in civil engineering. El-Cezeri 2020; 7(2): 906-922.

Damar M., Aydın Ö. Kavramsal olarak bibliyometri, bilimetri, bilimsel performans analizi- Bilimsel haritalama ve bibliyometrik veri tabanları 2024.

Demircan D., Palabıyık S. Mimari tasarım eğitiminde 21. yüzyıldaki değişimin bibliyometrik analiz yöntemi üzerinden incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 26(1): 91-110.

Dertli Ş., Dertli ME. Metaverse'ün disiplinlerarası görünümü: Lisansüstü tez çalışmalarının bibliyometrik profili. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2024; 14(2): 493-521.

Doğan G. Betonarme kolonların deprem sonrası hasar seviyelerinin akıllı sistem tabanlı bir yöntemle belirlenmesi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no:146, Konya, Türkiye, 2018.

Egghe L. Expansion of the field of informetrics: Origins and consequences. Inf. Process. Manag 2005; 41(6): 1311-1316.

Ekmen AB. SPT-CPT ilişkisinin yapay zekâ desteğiyle çeşitli zemin tipleri için araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi 2023; 39(2): 204-216.

Evren S., Kozak N. Bibliometric analysis of tourism and hospitality related articles published in Turkey. Anatolia 2014; 25(1): 61-80.

Gao X., Lin C. Prediction model of the failure mode of beam-column joints using machine learning methods. Engineering Failure Analysis 2021; 120: 105072.

Harle SM. Advancements and challenges in the application of artificial intelligence in civil engineering: a comprehensive review. Asian Journal of Civil Engineering 2023; 25(1): 1061-1078.

Hawkins DT. Bibliometrics of electronic journals in information science. Information Research 2001; 7(1): 7-10.

Kaçın S., Aydın M. Görüntü işleme yöntemi ile betonarme kiriş deplasmanlarının belirlenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 23(2): 107-117.

Kim J., McMillan SJ. Evaluation of internet advertising research: A bibliometric analysis of citations from key sources. Journal of Advertising 2008; 37(1): 99-112.

Kumar M. Application of artificial ıntelligence in civil engineering projects. Mathematical Statistician and Engineering Applications 2021; 70(1): 660-667.

McBurney MK., Novak PL. What is bibliometrics and why should you care? Proceedings. IEEE İnternational Professional Communication Conference 2002.

Mohanaselvi S., Hemapriya G. Application of fuzzy logic to earthquake damage predictions. AIP Conference Proceedings 2019.

Ok Ş. The impact of artificial intelligence on the service industry and consumer behavior: A bibliometric analysis. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics 2024; 27: 203-213.

Okazaki Y., Okazaki S., Asamoto S., Chun PJ. Applicability of machine learning to a crack model in concrete bridges. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 2020; 35(8): 775-792.

Okubo Y. Bibliometric indicators and analysis of research systems: Methods and examples. 1997.

Özen SB. KASKİ atık su arıtma verilerinin yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemleri ile tahmin edilmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:97 Kayseri, Türkiye, 2018.

Özeren Y. Sakarya havzasına ait su kalitesi parametrelerinin yapay zekâ yöntemleri ile modellenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:108, Kayseri, Türkiye, 2022.

Prayogo D. Metaheuristic-based machine learning system for prediction of compressive strength based on concrete mixture properties and early-age strength test results. Civil Engineering Dimension 2018; 20(1): 21-29.

Pritchard A. Statistical bibliography or bibliometrics. Journal of Documentation 1969; 25: 348.

Qiu J., Zhao R., Yang S., Dong K. Informetrics: theory, methods and applications. Springer. 2017.

Shukla AK., Janmaijaya M., Abraham A., Muhuri PK. Engineering applications of artificial intelligence: A bibliometric analysis of 30 years (1988–2018). Engineering Applications of Artificial Intelligence 2019; 85: 517-532.

Vošner HB., Kokol P., Bobek S., Železnik D., Završnik J. A bibliometric retrospective of the Journal Computers in Human Behavior (1991–2015). Computers in Human Behavior 2016; 65: 46-58.

Yi Z., Luo X. Construction cost estimation model and dynamic management control analysis based on artificial intelligence. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering 2023; 48(1): 577-588.

Yörübulut S., Dogan O., Erdugan F., Yörübulut S. Tahribatsız yöntem verileri kullanılarak yapay sinir ağı ve regresyon yöntemi ile beton basınç dayanımının tahmin edilmesi. International Journal of Engineering Research and Development 2020; 12(2): 769-776.

Yücel H., Ekinci K., Karaman A., Yazdıc F., Kar B. Bal arılarının sindirim kanalında bulunan probiyotik kökenli bifidobacterium sp.'nin enzimatik ve bibliyometrik analizi. Journal of the Institute of Science and Technology 2022; 12(2): 622-632.

Yücel Ş. Karar verme teknikleri üzerinde yapılan çalışmaların bibliyometrik analizi. Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi 2024; 16(30): 153-172.

Zengin N., Yamaçlı R. İklim değişikliği konulu lisansüstü çalışmaların bibliyometrik analizi. Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences 2024; 7(2): 27-40.

Zhang W., Li H., Li Y., Liu H., Chen Y., Ding X. Application of deep learning algorithms in geotechnical engineering: a short critical review. Artificial Intelligence Review 2021; 1-41.

Zhang Y. Safety management of civil engineering construction based on artificial intelligence and machine vision technology. Advances in Civil Engineering 2021; 1: 3769634.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2221-2238, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2221-2238, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

The Impact of Barley, Wheat, Maize, Cotton and Olive Production in Türkiye on Climate Change

Tuğçe KAYA[1*]

[1]Cukurova University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Economics, 01330, Adana

[1]https://orcid.org/0000-0002-5376-6144
*Corresponding author: tkaya@cu.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 03.03.2025
Accepted: 14.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Agricultural production
Climate change
Artificial neural network algorithm

ABSTRACT

Although the agricultural sector is one of the most fundamental human activities, it has become a significant contributor to climate change today. Factors such as land cultivation, the use of chemical fertilizers, and dependency on fossil fuels are primary drivers behind the agricultural sector's contribution to climate change. Consequently, identifying the extent to which agricultural production contributes to climate change and implementing appropriate measures is critical in the fight against it. In this study, the effects of maize, wheat, cotton, barley, and olive production in Türkiye on total greenhouse gas emissions and average temperature change are examined. In the analysis employing artificial neural networks, Gross Domestic Product was incorporated into the model as a control variable alongside the crops. Within the neural network algorithm, these variables served as input data, while total greenhouse gas emissions and average annual temperature change were utilized as output data. The results—derived from a neural network model consisting of one input layer, one hidden layer, and one output layer—indicate that, maize and cotton are the crops contributing most significantly to climate change. In contrast, the impacts of barley and olive production on climate change were found to be considerably lower compared to other agricultural products. The findings highlight the need for innovative production techniques, particularly in cotton and maize cultivation, and suggest that adopting artificial intelligence-based applications could help reduce chemical fertilizer usage.

Türkiye'de Arpa, Buğday, Mısır, Pamuk ve Zeytin Üretiminin İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 03.03.2025
Kabul tarihi:14.06.2025
Online Yayınlanma: 15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Tarımsal üretim
İklim değişikliği
Yapay sinir ağları algoritması

ÖZ

Tarım sektörü, insanlık tarihinin en temel faaliyetlerinden biri olmasına rağmen, günümüzde iklim değişikliğiyle doğrudan ilişkilendirilen önemli bir kaynak haline gelmiştir. Toprağın işlenmesi, kimyasal gübre kullanımı, fosil yakıtlara bağımlılık gibi faktörler bu anlamda tarımsal üretimin iklim değişikliğine katkılarının başlıca nedenleridir. Dolayısıyla tarımsal ürün üretiminin iklim değişikliğine katkısının belirlenmesi ve uygun önlemlerin alınması iklim değişikliği ile mücadelede önemli hale gelmektedir. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada Türkiye'de mısır, buğday, pamuk, arpa ve zeytin üretiminin toplam sera gazı emisyonu salınımına ve ortalama sıcaklık değişimi değerleri üzerindeki etkisi incelenmektedir. Yapay sinir ağlarının kullanıldığı analizde mısır, pamuk, buğday, arpa ve zeytin bitkilerine ek olarak Gayri Safi Yurtiçi Hasıla kontrol değişken olarak modele eklenmiştir. Yapay sinir ağı algoritmasında bu değişkenler girdi verisi olarak kullanılırken toplam sera gazı emisyonu ve ortalama yıllık sıcaklık değişimi çıktı verisi olarak kullanılmıştır. Bir girdi katmanı bir gizli katman ve bir çıktı katmanı olarak tahmin edilen yapay sinir ağları algoritması sonuçlarına göre mısır ve pamuk bitkileri iklim değişikliğine en çok katkı yapan bitkilerdir. Bunun yanında arpa ve zeytin üretiminin iklim değişikliği üzerindeki etkisi diğer tarımsal ürünlere kıyasla çok daha düşük hesaplanmıştır. Sonuçlar Türkiye'de özellikle pamuk ve mısır üretiminde yeni üretim teknikleri ihtiyacına ve yapay zeka benzeri uygulamalarla kimyasal gübre kullanımının düşürülmesi ihtiyacına işaret etmektedir.

To Cite: Kaya T. The Impact of Barley, Wheat, Maize, Cotton and Olive Production in Türkiye on Climate Change. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2221-2238.

1. Introduction

Türkiye is a country rich in agricultural production and product diversity. In this respect, the nation's climatic and geographical diversity facilitates the cultivation of a wide range of agricultural products. Wheat, barley, maize, sugar beet, cotton, vegetables, and fruits are among the primary agricultural commodities produced in the country. Additionally, Türkiye holds a significant position in the global production of hazelnuts, apricots, thyme, and raisins. Considering both the diversity of products and the contribution of agricultural production, the agricultural sector plays a vital role not only in the national economy but also in the social and cultural fabric of the country. The economic importance of the agricultural sector for Türkiye is evident in various areas such as employment, gross domestic product (GDP), exports, and regional development. In particular, its contribution to employment underscores the sector's value within the national economy. Turkish agricultural sector has become one of the world's leading agricultural economies due to the fact that agriculture can be practiced on nearly half of the country's land and that approximately one-quarter of the population is employed in this sector (ITA, 2024). Despite the favorable agricultural conditions, Türkiye accounts for only 0.8% of the world's agricultural land. Nevertheless, it produces more than 1.29% of the global agricultural output. Türkiye's share in agricultural exports is also notable. With 1.57% of global agricultural exports and 1.14% of imports, Türkiye stands as an important actor in the global agricultural economy (İstikbal, 2022). In terms of agricultural exports, Türkiye ranks 23rd with a share of approximately 30 billion dollars in a global market valued at 2.1 trillion dollars, and in agricultural imports, it ranks 21st with a share of 23.2 billion dollars (Ministry of Trade, 2022). Furthermore, given its critical role in feeding its own population, Türkiye's agricultural production is of paramount importance. Over the past seventy years, Türkiye's population has risen from approximately 20 million to over 85 million (TÜİK, 2023). Thus, agriculture is essential not only for its economic contributions but also for ensuring food security for the entire population.

Although agricultural production is one of the primary sectors, the global climate crisis also significantly affects Türkiye's agricultural production. However, the relationship between agriculture and climate change is not unidirectional. While rising temperatures naturally lead to increased drought conditions, which in turn reduce agricultural productivity, agricultural activities themselves are among the key factors driving climate change (Çam, 2024). The use of chemical fertilizers, the greenhouse gases emitted from soil cultivation, the utilization of agricultural machinery, and the conversion of forests and green spaces into agricultural land are fundamental causes of agriculture's impact on climate change (Gu et al., 2022; Çam, 2023). Globally, agricultural activities account for approximately 11% of the carbon emissions released into the atmosphere (C2ES, 2025). When the entire food system is considered—including production, transportation, processing, and consumption—this figure increases to about 25-30% of total emissions (Our World in Data, 2025).

In Türkiye specifically, greenhouse gas emissions from the agricultural sector have risen significantly over the past thirty years. In 2022, total greenhouse gas emissions were calculated to be 71.5 million

tons of CO_2 equivalent, representing a 37.9% increase in carbon emissions compared to 1990 (TÜİK, 2023). It is important to note that agricultural production is not solely responsible for the increase in greenhouse gases. The greenhouse gases produced by agricultural activities indirectly causes to rising average temperatures. Indeed, the global average temperature has increased by nearly 2 °C over the past century (NASA, 2023). Although CO_2 emissions are the main reason of this temperature increase, nitrogen oxide and methane gases resulting from agricultural practices are also among the primary contributors (Bayraç, 2010; Mateo-Sagasta et al., 2017).

1.1. The Impact of Agriculture on Greenhouse Gases

The impact of agriculture on greenhouse gases can manifest in various ways (Ağaçaya and Öztürk, 2017; Çevik et al., 2023). Frequent soil tillage, the use of chemical fertilizers, and fossil fuels are among the primary causes of agricultural greenhouse gas emissions. Soil contains high amounts of CO_2 and other gases (European Environment Agency, 2019), and with soil tillage these greenhouse gases are released into the atmosphere. Due to the greenhouse gas effect, average temperatures rise, and consequently, precipitation levels decrease. Thus, while the gases released from soil due to agricultural activities contribute to climate change, climate change in turn plays a role in reducing agricultural productivity. In other words, agriculture and climate change are engaged in a mutual interaction. Moreover, agricultural production is not only responsible for the release of greenhouse gases from soil. Another effect emerges through glaciers. Like undisturbed soil, glaciers store enormous amounts of carbon, and other greenhouse gases (Karki, 2007; Thomazini et al., 2015). As a result of agricultural activities, increasing global average temperatures induce drought while simultaneously causing the melting of glaciers. The melting glaciers, in turn, release additional greenhouse gases, thereby accelerating the effects of the climate crisis. Consequently, both average temperatures increase and agricultural productivity declines. The environmental impact of agriculture is not limited to soil tillage or the conversion of forested areas into agricultural land. Fossil fuels, and chemical fertilizers employed in agricultural production also have similar environmental effects. Türkiye is a country dependent on external energy sources, and a significant portion of its final energy consumption comes from non-renewable energy sources. Thus, nearly all of the energy used in agricultural production causes to climate change. Although the use of chemical fertilizers is necessary to boost agricultural productivity, its environmental consequences are harmful. In this regard, the chemical fertilizers used in agricultural activities oscillate greenhouse gas emissions during both the production, and consumption phases.

Table 1. Fertilizer types, main components, and associated greenhouse gas emissions

Fertilizer Type	**Main Components**	**Greenhouse Gases**	**Description**
Nitrogenous Fertilizers	Ammoniuım Nitrate, Urea, CAN	N_2O	Formed through microbial activities in the soil.
Phosphatic Fertilizers	Superphosphate, DAP, TSP	CO_2	Due to fossil fuel usage during production processes.
Potassic Fertilizers	Potassium Chloride, Potassium Nitrate	CO_2	Attributed to energy consumption in production and transportation.
Organic Fertilizers	Animal Manure, Compost	CH_4, N_2O, CO_2	Generated as a result of decomposition, fermentation and soil cultivation.

CAN: Calcium Ammonium Nitrate, DAP: Diammonium Phosphate, TSP: Triple Superphosphate
Source: This table was created by the author.

Table 1 presents the types of fertilizers intensively used in agriculture, and the associated greenhouse gases they emit. In agricultural practice, four main fertilizer groups are generally employed: nitrogenous fertilizers, phosphatic fertilizers, potassic fertilizers, and organic fertilizers. While nitrogenous fertilizers contribute to N_2O emissions, phosphatic and potassic fertilizers lead to CO_2 emissions, and organic fertilizers result in the release of greenhouse gases such as CH_4, N_2O, and CO_2. Notably, phosphatic fertilizers exert environmental impacts during both the production and consumption phases. Consequently, factors such as soil tillage, deforestation, fertilizer application, and fossil fuel use collectively cause to climate change and drought conditions.

Motivated by the triggering effect of agricultural production on climate change, this study aims to determine the greenhouse gas emissions resulting from the production of wheat, barley, olives, cotton, and maize (Çetin, 2018; Aydın et al., 2022; Kuşcu and Güler, 2024; Kuzu et al., 2024). The analysis employs an Artificial Neural Network (ANN) algorithm to calculate the sensitivity of each agricultural product's impact on total greenhouse gas emissions. Using data from Türkiye spanning the years 1990 to 2021—including total production of wheat (tons), barley (tons), maize (tons), olive production (tons), cotton production (tons), and GDP (in 2015 US dollar prices) —the effects on both total greenhouse gas emissions, and average temperature change were examined. A review of the literature revealed a scarcity of empirical studies providing evidence on this topic, and this study seeks to contribute to the existing body of literature. Moreover, by analyzing the contribution of these agricultural products to climate change using an artificial intelligence-based model rather than traditional econometric methods, the study aims to offer a fresh perspective for future research. Following a summary of the relevant literature, the subsequent section details the ANN algorithm, and the study concludes with sections on the results and references.

2. Literature

Numerous studies investigating the relationship between agriculture and climate change have largely concentrated on how climate change affects agricultural production. For example, Akalın (2014) examined the impacts of climate change on agriculture and assessed various strategies aimed at mitigating these effects. His findings indicated that climate change alters soil and water regimes, leading to a reduction in agricultural output and posing risks to food security. Dağ and Aktaş (2024) explored the impact of climate change on Turkish agriculture using data from 1970 to 2022, with their results confirming significant negative effects on the agricultural sector. Similarly, Başoğlu and Telatar (2013) empirically analyzed the influence of climate change on Türkiye's agricultural sector over the period 1973–2011, reporting that shifts in rainfall patterns tend to increase agriculture's share of GDP, while rising temperatures have a detrimental impact. In another study, Bayraç and Doğan (2016) examined the link between climate and agricultural productivity, revealing that climate change adversely affects not only productivity but also hydrological balances, and input resources. Dellal et al. (2022) focused on the effects of climate change on certain cereals, olives, and viticulture, demonstrating that these climatic shifts negatively influence both the yield, and the total production volumes of these crops.

Research beyond Türkiye has also delved into the effects of climate change on agriculture, with many studies reporting that increased temperatures yield negative outcomes for agricultural productivity. Nelson et al. (2009) analyzed the global repercussions of climate change on agriculture and demonstrated that rising temperatures, along with altered precipitation patterns, can severely undermine productivity, particularly in tropical regions. They further noted that these climatic changes have important implications for food security and economic stability. In the United States, Schlenker and Roberts (2009) found that higher temperatures, and changes in water availability may reduce the yields of essential crops such as maize and soybeans, emphasizing the need for farmers to adopt new agricultural techniques, and diversify crop varieties in order to adapt. Similar findings have been reported for African nations; Lobell and Burke (2010) concluded that, increasing temperatures, coupled with decreasing rainfall, pose a serious threat to agricultural productivity in Sub-Saharan Africa, thereby endangering food security in the region. In India, Kumar and Parikh (2001) determined that modifications in monsoon patterns, and rising temperatures could lead to diminished yields in staples such as rice and wheat. Tao et al. (2006) investigated the effects of climate change on agriculture in China, finding that rising temperatures, and water scarcity could negatively impact the production of maize, wheat, and rice, thus posing risks to the nation's food security. Additionally, studies by Howden and Jones (2004) in Austria, Magrin et al. (2005) in Latin America, and Schlenker and Roberts (2009) in the United States further corroborated the significant impacts of climate change on agricultural production.

All of the studies summarized above have focused on examining the potential effects of climate change on agricultural production. However, there exists a reciprocal interaction between agriculture and climate. While climate change can exert both positive and negative influences on agricultural

production, agricultural activities themselves can also have a variety of positive and negative impacts on the climate (Akyüz and Atış, 2016). Unlike other major sectors, the agricultural sector is distinctive in that it is capable of both reducing, and contributing to greenhouse gas emissions.

Nevertheless, most of the studies in the literature have established a causal relationship that flows from climate to agricultural production (Howden et al., 2007; Aydinalp and Cresser, 2008; Mendelsohn, 2009; Mendelsohn, 2014; Arora, 2019; Praveen and Sharma, 2019). Similarly, several important studies focusing on Türkiye have been conducted (Yano et al., 2007; Dellal et al., 2011; Dumrul and Kilicaslan, 2017; Dudu and Cakmak, 2018; Bozoglu et al., 2019; Pilevneli et al., 2023). In contrast, this study examines the reverse causal effects—that is, the impact of agricultural activities on climate change. Consequently, given the near absence of research on this reverse relationship in the existing literature, it is anticipated that this work will make a significant contribution to the field.

3. Model and Methodology

The analysis covers observations of variables pertaining to Türkiye over the period 1990–2021. In order to assess the impacts of agricultural production on climate change, the study utilizes variables representing wheat production, barley production, maize production, olive production, and cotton production (in tons), along with total greenhouse gas emissions (in metric tons of CO_2 equivalent) and average temperature values. The model,

$$CO_2, Temperature = f(Barley, Wheat, Corn, Cotton, Olive, GDP) \quad (3)$$

As defined above, this model utilizes two output variables (greenhouse gases and temperature values) and six input variables, with GDP incorporated as a control variable. During the optimization of the ANN algorithm, 70% of the observations were designated for training and 30% for testing. The model was designed with one input layer, one hidden layer, and one output layer; a summation function is used between the input and hidden layers, while a sigmoid function is applied between the hidden and output layers. There is no prescribed method for selecting the functional forms required by the neural network algorithm, and, as in many studies employing such models, the functional form in this study was determined through a trial-and-error approach. Subsequently, the effects of each variable on temperature, and greenhouse gases were assessed using sensitivity analysis based on the neural network algorithm.

$$\frac{\partial(CO_2, Temperature)}{\partial x_i} = \frac{df(Barley, Wheat, Corn,\ Cotton, Olive, GDP)}{\partial x_i} \quad (4)$$

In this model, x_i is defined as *Barley, Wheat, Maize, Cotton, Olive, and GDP*. In the given equation, for instance, the effect of barley production on total temperature, and greenhouse gas emissions is determined by the partial derivative of the function *f (Barley, Wheat, Maize, Cotton, Olive, GDP)* with respect to barley production. The resulting ratio indicates the proportion of a 1% increase in temperature, and greenhouse gas emissions attributable to barley production.

3.1. ANN Algorithm

The ANN algorithm is a collection of mathematical formulations that emulate the living cells of the human brain to facilitate learning. The concept of artificial neural networks was first introduced by McCulloch (1943) and later found practical application with contributions from Rosenblatt (1958). Initially, due to its inability to solve even simple problems, the approach was neglected for a period. However, subsequent enhancements—such as expanding the network structure by increasing the number of neurons and layers—led to a significant improvement in its problem-solving capability. With the broadened use of personal computers, especially since the early 2000s, these models have become increasingly popular. In this respect, the ANN algorithm has been successfully implemented across various fields (Sietsma and Dow, 1991; Anderson and McNeill, 1992; Grossi and Buscema, 2007; Zou et al., 2009; Çam and Kılıç, 2018). Today, its applications span nearly every field, from economics and communication to agriculture and entertainment.

A typical ANN model comprises an input layer, a hidden layer, and an output layer. The variables in the input layer correspond to the independent variables in an econometric model, while the variable in the output layer is analogous to the dependent variable in a regression model. In light of these considerations, the graphical representation and mathematical formulation of an ANN can be presented as follows.

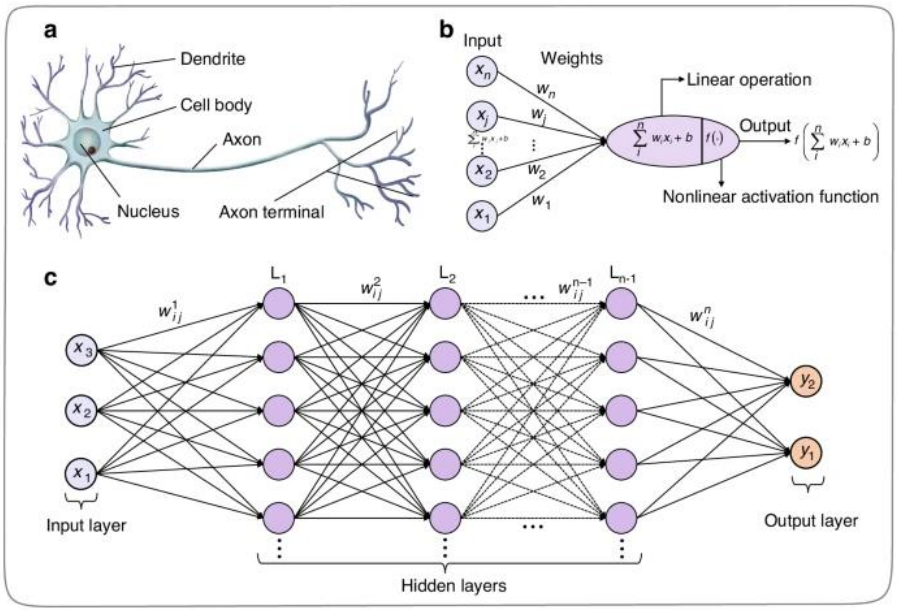


Figure 1. Artificial neural networks algorithm

Figure 1 illustrates the overall structure of the ANN algorithm. In this example, the network comprises an input layer with three variables, followed by n–1 intermediate (or hidden) layers, and an output layer with two variables. The weights denoted by w_{ij}^{1} connect nodes between the input layer and the first hidden layer (specifically, the i-th node to the j-th node); w_{ij}^{2} represent the weights between the first and second hidden layers; w_{ij}^{n-1} denote the weights between the (n–2)[nd] hidden layer and the last hidden

layer; and finally, w_{ij}^{n} represent the weights connecting the final hidden layer to the output layer. Training an ANN involves calculating the weights that best capture the relationship between the input and output layers. Graphically, the mathematical formulation of the ANN algorithm shown above can be represented as follows:

$$\hat{Y}_t = F_2\left[\left(V_t^T F_1(W_t \cdot X_t)\right)\right] \quad (1)$$

Here, F_1 is the function between the hidden layer and the output layer, while F_2 is the overall function between the input layer and the hidden layer. W_t represents the weights between the intermediate (hidden) layer and the output layer. Finally, V_t is the weight matrix between the input layer and the hidden layer. Equation (1) can be written in a more explicit form.

$$\mathrm{F_1(W_tX_t)} = \left(\mathrm{F_2(net_{0(t)}), F_2(net_{1(t)}) \ldots . F_2(\ net\ _{q(t)})}\right)^{\mathrm{T}} \in \mathrm{R^{q+1)x1}} \quad (2)$$

Here, t denotes the time operator (Yu et al., 2010). Due to their inherent structure, artificial neural networks possess both advantages and disadvantages compared to traditional econometric and statistical models. Among the most notable benefits of ANN algorithms are their capacity to solve complex problems, generalize by storing information within the network, provide flexible forecasting procedures, and make predictions using multiple datasets. On the other hand, challenges such as overfitting, difficulties in selecting the appropriate functional forms for the input and hidden layers, and getting trapped in local minima when solving nonlinear problems constitute some of the model's most significant drawbacks

4. Analysis

The impact of agricultural production on greenhouse gases, temperature, and consequently climate change was evident. The contribution of an agricultural product to climate change derived from both the intrinsic characteristics of the product and the specific steps involved in its production process. Table 2 outlines the sources of greenhouse gases for barley, wheat, maize, olive, and cotton, which are examined in this analysis.

Table 2. Agricultural product and greenhouse gas source

Product	**Major Factors Contributing to Greenhouse Gas Emissions**
Wheat	Use of chemical fertilizers, soil processing, diesel consumption
Cotton	Intensive water use (wild irrigation), agricultural machinery, chemical fertilizers, pesticides
Olive	Olive oil processsṣng process, energy use, long-term maintenance, pesticides
Barley	Relatively low input, less fertilizer use
Maize	Intensive water use (wild irrigation), chemical fertilizers, machinery

Source: The table was created by the authors.

Accordingly, in wheat production, the fertilizers used, soil tillage, and the energy consumed during planting served as the primary sources of greenhouse gas emissions. Barley production contributed to

climate change for similar reasons. In barley cultivation, the energy required by machinery and the use of chemical fertilizers were the main contributors to greenhouse gas emissions. Compared to wheat, barley required less pesticide and machinery usage. Cotton production, on the other hand, was characterized by intensive water consumption, significant machinery use, and high pesticide application. In this regard, both cotton and maize production led to substantial greenhouse gas emissions due to similar irrigation and pesticide consumption patterns. Finally, olive cultivation demanded irrigation, pest control, and prolonged maintenance. Notably, a key advantage of olives produced along Türkiye's western coast was that they do not require soil tillage; however, the energy needed during harvesting, transportation, and processing still revealed a considerable greenhouse gas emission potential.

Table 3. Summary statistics

Statistic	Temperature Change	Greenhouse Gas Emissions	Wheat Production (Ton)	Olive (Ton)	Maize (Ton)	Cotton (Ton)	Barley (Ton)	GDP (x1000000)
Mean	0.85	364.44	19796000	1343821	3828500	1249167	7624400	487124
Median	0.83	347.79	20005000	1482358	3673000	1289090	7550000	427142
Std. Deviation	0.82	107.36	1434291	478391	1706171	185243	887015	290072
Minimum	-1.24	219.53	17234000	510000	1850000	895082	5750000	8147
Maximum	2.62	564.39	22600000	2100000	6750000	1542000	9551000	1131776
Kurtosis	0.77	-1.28	-0.85	-1.00	-1.41	-0.53	0.44	-0.29
Skewness	-0.20	0.32	-0.05	-0.59	0.41	-0.54	0.20	0.35

Source: The table was created by the authors.

Table 3 presents the descriptive statistics of the variables used in the study. According to the table, the annual change in Türkiye's average temperatures ranged from -1.24 to +2.62 degrees, with an average change of 0.82 degrees. The annual average greenhouse gas emission was 364.44 metric tons, with the minimum and maximum emissions during the analysis period recorded as 219.53 and 564.39 CO_2 equivalent metric tons, respectively. The subsequent columns display the maximum and minimum production values for wheat, olives, maize, cotton, and barley, in that order. Since the units of measurement for these variables differed, the data were standardized prior to the estimation of the neural network model. This standardization (or normalization) was critical for the sensitivity analysis conducted after estimation. Notably, none of the variables used in the analysis followed a normal distribution; however, this did not pose a problem for the neural network algorithm. One of the major advantages of this algorithm is that it does not rely on any assumptions regarding the data distribution, allowing it to generate highly accurate predictions even with non-normally distributed data.

Table 4. ANN model summary

Training	Sum of Squares Error		5.762
	Average Overall Relative Error		0.303
	Relative Error	Temperature Change (°C)	0.557
		Greenhouse Gas Emissions	0.050
Testing	Sum of Squares Error		3.830
	Average Overall Relative Error		0.315
	Relative Error	Temperature Change (°C)	0.560
		Greenhouse Gas Emissions	0.074

Table 4 presents a summary of the estimated model's values. In this model, the effects of barley, wheat, maize, and cotton production on temperature values and greenhouse gas emissions were examined. Olive production was excluded, because it did not require soil tillage. Additionally, GDP was used as a control variable in the model. Accordingly, the total sum of squared errors was calculated as 5.762 during the training phase, and 3.830 during the testing phase. The model successfully predicted the output variable.

Table 5. ANN parameter estimation

		Predicted			
		Hidden Layer 1		Output Layer	
Predictor		H(1:1)	H(1:2)	Temperature Change	Greenhouse Gas Emissions
Input Layer	(Bias)	-0.497	0.835		
	Wheat	0.025	0.424		
	Maize	-0.235	-1.673		
	Cotton	-0.490	-0.643		
	Barley	-0.240	0.306		
	GDP	0.173	-0.341		
Hidden Layer 1	(Bias)			-0.535	-0.409
	H(1:1)			-0.914	-0.884
	H(1:2)			-1.018	-1.547

Table 5 presents the parameter estimation results. According to Table 5, the model was estimated as comprising an input layer, one hidden layer, and an output layer with two variables. In ANN algorithms, the parameters do not possess a direct interpretation. Since these models performed nonlinear optimization, the weights varied depending on the initial starting point. Nevertheless, regardless of these variations, the computed weights were iteratively determined—using appropriate functional forms—to best predict the output data based on the variables in the input layer.

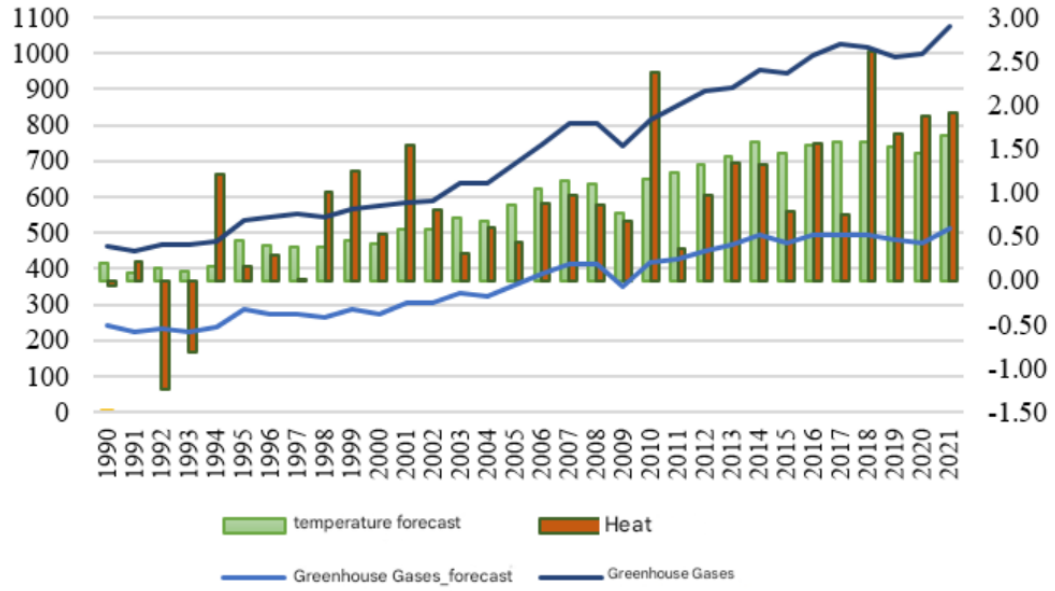


Figure 2. ANN predicted and actual values

Figure 2 displays both the greenhouse gas emissions and temperature values. Although the model tended to predict slightly lower average greenhouse gas emissions, it very successfully captured the rises and falls in these emissions. Similarly, there was a strong alignment between the actual and predicted values for average temperature. While the model was not particularly successful at capturing negative temperature changes, overall the predicted values were sufficient for the purposes of sensitivity analysis, indicating that the importance analysis results derived from this model were reliable.

Table 1. ANN parameter estimation

Training	Sum of Squares Error		5.098
	Average Overall Relative Error		0.222
	Relative Error	Temperature Change (°C)	0.330
		Greenhouse Gas Emissions	0.113
Testing	Sum of Squares Error		3.013
	Average Overall Relative Error		0.370
	Relative Error	Temperature Change (°C)	0.740
		Greenhouse Gas Emissions	0.081

Table 6 presents the summary statistics of the ANN model that estimated the effects of barley, wheat, maize, cotton, and olive production on greenhouse gas emissions and average temperature values. Like the previous model, GDP was used as a control variable. According to the statistics in the table, the sum of squared errors for the estimated neural network was 5.098 during the training phase, and 3.013 during the test phase. These test statistics indicated that the model fit the output data well. In the previous model, the sum of squared errors was calculated as 5.762 and 3.830, respectively. Consequently, the predictive performance of this model was higher than that of the previous model. As is well known, incorporating new variables into a model generally enhances its predictive power.

Table 2. ANN parameter estimation

		Predicted				
		Hidden Layer 1			Output Layer	
Predictor		H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	Temperature Change	Greenhouse Gas Emissions
Input Layer	(Bias)	-0.431	-0.182	-0.204		
	Wheat	-0.866	0.859	-0.394		
	Maize	-0.724	-1.091	0.027		
	Cotton	-0.757	-0.116	0.084		
	Barley	0.157	0.179	-0.224		
	GDP	0.012	0.092	-0.019		
	Olive	-0.322	0.015	0.059		
Hidden Layer 1	(Bias)				-0.092	-0.110
	H(1:1)				-0.491	-0.713
	H(1:2)				-0.926	-0.929
	H(1:3)				-0.029	-0.317

Table 7 presents the ANN parameter estimation results. According to Table 7, the estimated ANN algorithm consisted of an input layer, a hidden layer, and an output layer. The output layer contained both temperature values and greenhouse gas emission values, while the input variables were wheat,

maize, cotton, barley, olive, and GDP. The hidden layer comprised three nodes and utilized a sigmoid activation function.

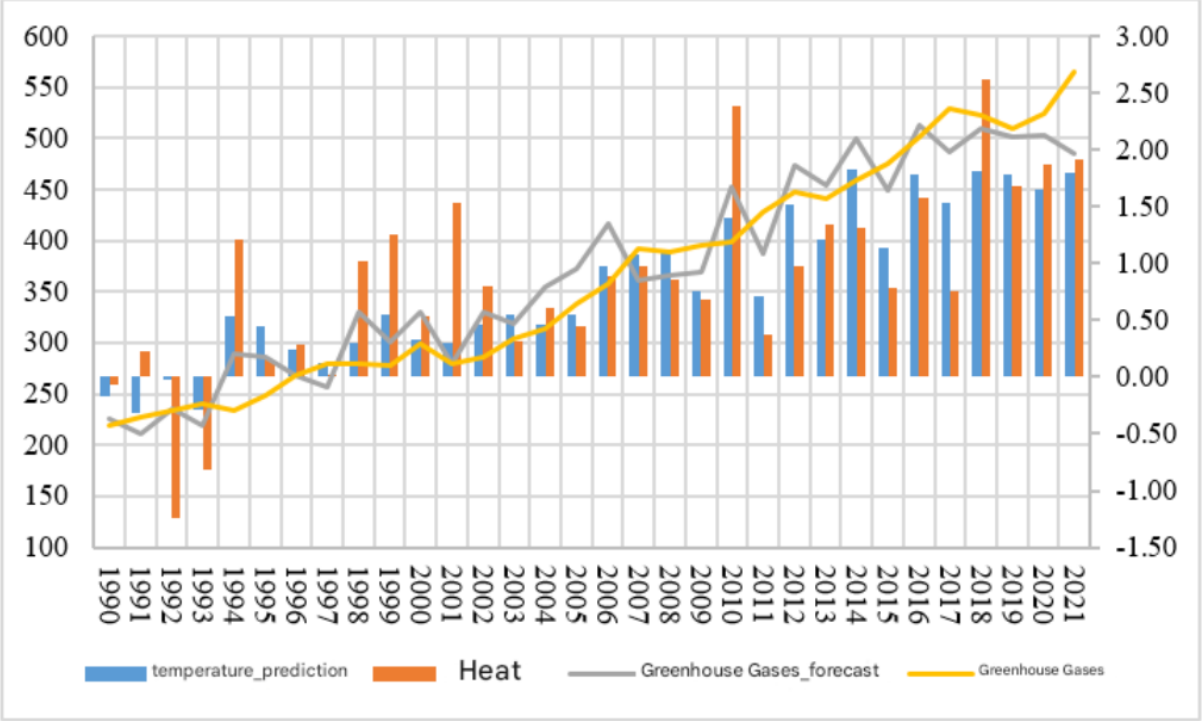


Figure 3. ANN predicted values and actual values

Figure 3 displays the predicted and actual values for the model that utilized wheat, maize, cotton, barley, olive production, and GDP. As can be seen, this model exhibited greater predictive power compared to the previous one. In the earlier model—where olive production was not included—the negative temperature values were not predicted successfully; however, in this model both negative temperature values and greenhouse gas emission levels were forecasted with improved accuracy. The predictive performance of this model was crucial for determining the relative impact of barley, wheat, maize, olive, and cotton production on climate change. Identifying which agricultural product exerted a more significant effect on climate change, alongside its cost and added value, helped in formulating an effective production policy. In accordance with the Kyoto Protocol and the Paris Agreement, Türkiye aims to minimize its carbon emissions by 2050. To achieve this objective, the country must control its agricultural and economic production and implement necessary reforms in critical areas to meet its greenhouse gas emission targets. Meeting these targets will play a vital role in sustaining long-term economic growth.

Table 8. Agricultural products and their contributions to climate change

Product	Model 1	Model 2
Wheat	0.168	0.181
Maize	0.379	0.454
Cotton	0.244	0.189
Barley	0.059	0.090
GDP	0.150	0.044
Olive		0.043

Table 8 presents the contributions of wheat, maize, cotton, barley, olive production, and GDP to total greenhouse gas emissions and average temperature changes. Model 1 excluded olive production. The importance analysis results from Model 1 indicated that maize production was the agricultural product with the most pronounced adverse effect on climate change. Accordingly, a 1% change in greenhouse gas emissions and temperature values could be attributed to 0.379% of maize production. Maize, particularly when grown in hot and arid regions, was a crop that required substantial water. In such environments, irrigation systems not only led to the depletion of water resources but also contributed to soil salinization. Furthermore, irrigation was typically powered by fossil fuels, thereby increasing greenhouse gas emissions. Maize production also relied heavily on nitrogenous fertilizers, which generated high levels of carbon emissions during both production and consumption phases. Approximately 95% of nitrogenous fertilizer production was based on natural gas, making it one of the most significant sources of carbon emissions. When applied to the soil, these fertilizers were decomposed by soil microorganisms, a process that released nitrous oxide (N_2O). Given that nitrous oxide is roughly 300 times more potent as a greenhouse gas than carbon dioxide, its emission had a direct impact on temperature. Cotton production was another major contributor to climate change. According to the sensitivity analysis, the relative impact of cotton production on greenhouse gas emissions and average temperature was about 0.244, making it the second most influential factor after maize. Cotton was among the crops with the highest water requirements. In Türkiye, it was predominantly grown using furrow irrigation in the Southeastern Anatolia and Aegean regions. This method not only depleted water resources but also consumed energy via irrigation pumps, thereby causing additional CO_2 emissions (Yilmaz et al, 2005; Baran, Gökdoğan and Bayhan, 2021). Moreover, cotton cultivation demanded intensive use of nitrogenous fertilizers for achieving high yields, and pesticide application was common to combat pests and diseases. The extensive use of machinery during processes such as sowing, plowing, irrigation, spraying, and harvesting, as well as the energy consumption in ginning factories and the textile industry, resulted in significant carbon dioxide emissions.

Wheat was the third product contributing notably to climate change. In wheat production, intensive application of nitrogen fertilizers (such as urea, ammonium nitrate, and CAN) was required to achieve high yields (Rajaniemi, Mikkola and Ahokas, 2011). Deep plowing was typically performed during wheat sowing, a process that involved the use of tractors and other machinery, leading to increased fossil fuel consumption and CO_2 emissions. Moreover, deep plowing exposed carbon stored in the lower soil layers. Barley, on the other hand, was estimated to be the agricultural product with the least responsible for climate change. Barley production accounted for an average of only 0.09% of the greenhouse gas emissions and temperature changes. Although barley still required nitrogenous fertilizers, it generally demanded less fertilizer than wheat. Additionally, since most barley production in Türkiye was rainfed, the energy consumption and water waste associated with irrigation were considerably lower. Finally, olive trees had the most limited impact on climate change. Olive trees were drought-resistant, and in

regions where they were grown relying on rainfall, irrigation-induced greenhouse gas emissions were minimal. The use of nitrogenous fertilizers in olive cultivation was also lower compared to crops like wheat, maize, and cotton. However, during processing operations such as pressing, squeezing, and separation in factories, energy consumption (from both electricity and fossil fuels) did cause to greenhouse gas emissions. Moreover, the long-term presence of olive trees helped sequester carbon in the soil. Consequently, olive cultivation was regarded as the least environmentally harmful form of agricultural production. According to the ANN algorithm, the relative impact of olive production on climate change was only about 0.04%, which aligned well with expectations for this crop.

5. Conclusion

Türkiye is one of the world's leading economies in terms of agricultural production. Türkiye ranks first in Europe and eighth in the world (FAO, 2023). Although the country has increased its imports of agricultural products in recent years, agriculture remains a key economic sector. However, agricultural production faces several challenges and exerts undesirable effects on climate change. The negative effects of climate change on agricultural production can be traced back to the following: longer periods of drought, extreme rainfall and flooding, increased use of chemicals such as herbicides and pesticides to control pests, loss of livestock and fishing grounds, and an increase in agricultural pests and diseases (Akalın, 2014).The use of chemical fertilizers, intensive soil tillage, and dependence on fossil fuels to boost production or improve productivity lead to substantial greenhouse gas emissions. Yet, each crop has its own requirements, and the methods of soil preparation vary between different types of agricultural production. Consequently, the production of major agricultural products—such as wheat, maize, cotton, barley, and olives—exerts varying levels of impact on climate change.

The results of the estimated ANN algorithm indicate that maize and cotton production incur particularly high environmental costs, whereas barley and olive production result in lower greenhouse gas emissions. In this context, maize production emerges as the most significant contributor to climate change. This is primarily due to the high water and fertilizer demands of the maize crop. Maize, which is predominantly produced in Türkiye's arid and semi-arid regions, relies on irrigation systems that consume considerable energy, thereby contributing to carbon dioxide (CO_2) emissions. Moreover, because maize requires substantial amounts of nitrogenous fertilizers, its production also leads to significant emissions of nitrous oxide (N_2O). Similarly, cotton production contributes to high greenhouse gas emissions due to its heavy reliance on water and chemical inputs. The results reveal that cotton is the second most impactful crop after maize. According to the sensitivity analysis of the neural network models, barley and olives are the least harmful in terms of environmental impact, causing lower greenhouse gas emissions and temperature increases compared to maize, cotton, and wheat. In light of these findings, adopting more efficient production methods for maize and cotton in Türkiye—such as minimizing soil tillage during pre-planting preparation, avoiding excessively deep tillage, reducing the frequency of soil

processing, and lowering fertilizer consumption through the application of artificial intelligence in agriculture—could significantly reduce the impact of agricultural production on climate change.

Conflict of interest

The author declares that she has no competing interests.

Consent for publication

The author declares that she has contributed 100% to the article.

References

Ağaçayak T., Öztürk L. Türkiye'de tarım sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik stratejiler. Sabancı Üniversitesi, İstanbul Politikalar Merkezi Stiftung Mercator Girişim Eylül. 2017.

Akalın M. İklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkileri: Bu etkileri gidermeye yönelik uyum ve azaltım stratejileri. Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2014; 7(2): 351-377.

Akyüz Y., Atış E. Türkiye'de iklim değişikliği tarım etkileşiminin iki yönüyle incelenmesi. Uluslararası Katılımlı 2016; 2: 08-09.

Anderson D., McNeill G. Artificial neural networks technology. Kaman Sciences Corporation 1992; 258(6): 1-83.

Arora NK. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. Environmental Sustainability 2019; 2(2): 95-96.

Aydın B., Özkan E., Gürbüz MA., Kurşun İ., Kayhan İE. Edirne ilinde buğday üretiminde enerji kullanım etkinliği ve sera gazı emisyonunun karşılaştırmalı analizi. Anadolu J. AARI 2022; 32(2): 277-286.

Aydinalp C., Cresser MS. The effects of global climate change on agriculture. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences 2008; 3(5): 672-676.

Baran MF., Gökdoğan O., Bayhan Y. Determination of energy balance and greenhouse gas emissions (GHG) of cotton cultivation in Turkey: A case study from Bismil district of Diyarbakır province. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi 2021; 18(2): 322-332.

Başoğlu A., Telatar OM. İklim değişikliğinin etkileri: tarım sektörü üzerine ekonometrik bir uygulama. Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2013; 6: 7-25.

Bayraç HN. Enerji kullanımının küresel ısınmaya etkisi ve önleyici politikalar. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2010; 11(2): 229-259.

Bayraç HN., Doğan E. Türkiye'de iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi 2016; 11(1): 23-48.

Bozoglu M., Başer U., Eroglu NA., Topuz BK. Impacts of climate change on Turkish agriculture. Journal of International Environmental Application and Science 2019; 14(3): 97-103.

C2ES. Center for Climate Change and Energy Solutions. Global Emissions. Available at: https://www.c2es.org/content/international-emissions/. 2025.

Çam S. Tarımsal üretimde kullanılan kimyasal gübrelerin iklim değişikliği üzerindeki uzun dönemli etkileri: Türkiye örneği. D. Kelgökmen İliç (Ed.), İktisadi ve İdari Bilimler: Modern Değerlendirmeler ve Araştırmalar. Lyon/Fransa: Livre de Lyon. 2023.

Çam S. The Nexus of agricultural efficiency, renewable energy consumption, and climate change in Turkey. Alanya Akademik Bakış 2024; 8(2): 586-599.

Çam S., Sigeze Ç., Ballı E. Türkiye'nin enerji verimliliğinin yapay sinir ağı ve ARDL yaklaşımı ile analizi. Ege Academic Review 2018; 18(4): 661-670.

Çetin MD. Organik tarım ve pamuk. Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü. 2018.

Çevik ÖC., Yeşilkaya F., Karaman N. Sera gazı emisyonunun tarımda işgücü verimliliğine etkisi: Avrupa Birliği ülkeleri bağlamında bir analiz. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2023; 25(2): 639-672.

Dağ K., Aktaş E. İklim değişikliğinin Türkiye tarımına etkileri. Tarım Ekonomisi Dergisi 2024; 30(2): 173-181.

Dellal İ., McCarl BA., Butt T. The economic assessment of climate change on Turkish agriculture. Journal of Environmental Protection and Ecology 2011; 12(1): 376-385.

Dellal İ., Ünüvar Fİ., Topçu P. İklim değişikliğinin Türkiye'de tarım üzerine etkisi: Tahıllar, zeytin, bağcılık. Türkiye Klinikleri Social Pediatrics-Special Topics 2022; 3(2): 96-102.

Dudu H., Cakmak EH. Climate change and agriculture: an integrated approach to evaluate economy-wide effects for Turkey. Climate and Development 2018; 10(3): 275-288.

Dumrul Y., Kilicaslan Z. Economic impacts of climate change on agriculture: Empirical evidence from ARDL approach for Turkey. Journal of Business Economics and Finance 2017; 6(4): 336-347.

European Environment Agency. Toprak, arazi ve iklim değişikliği: İlişkileri anlamak ve eyleme geçmek. Avrupa Çevre Ajansı. 2019. https://www.eea.europa.eu/tr/isaretler/isaretler-2019/makaleler/toprak-arazi-ve-iklim-degisikligi

FAO. Türkiye country profile. FAO Country Profiles. 2023; Retrieved May 16, 2025, from https://www.fao.org/countryprofiles/index/en/?iso3=TUR

Grossi E., Buscema M. Introduction to artificial neural networks. European Journal of Gastroenterology & Hepatology 2007; 19(12): 1046-1054.

Gu X., Weng S., Li YE., Zhou X. Effects of water and fertilizer management practices on methane emissions from Paddy soils: synthesis and perspective. International Journal of Environmental Research and Public Health 2022; 19(12): 7324.

Howden M., Jones RN. Risk assessment of climate change impacts on Australia's wheat industry. In Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia 2004; 26.

Howden SM., Soussana JF., Tubiello FN., Chhetri N., Dunlop M., Meinke H. Adapting agriculture to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 2007; 104(50): 19691-19696.

ITA. İnternational Trade Administration, Agriculture, Turkey Country Commercial Guide. 2024. Available at: https://www.trade.gov/country-commercial-guides/turkey-agriculture

İstikbal D. Küresel trendler çerçevesinde Türkiye tarımının gelişimi ve gelecek vizyonu. SETA| Siyaset, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları Vakfı (SETA), Turkuvaz Haberleşme ve Yayıncılık AŞ, İstanbul. 2022.

Karki KB. Greenhouse gases, global warming and glacier ice melt in Nepal. Journal of Agriculture and Environment 2007; 8: 1-7.

Kumar KK., Parikh J. Indian agriculture and climate sensitivity. Global Environmental Change 2001; 11(2): 147-154.

Kuşcu S., Güler KÇ. Türkiye'de buğday üretiminde kullanılan gübrelerin karbon ayak izine etkisi. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology 2024; 12(3): 418-422.

Kuzu H., Bilgili ME., Aybek A., Özekin M. Doğu Akdeniz Bölgesinde buğday ve mısır üretiminde yakıt tüketiminden kaynaklı karbondioksit emisyonunun belirlenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(2): 684-693.

Lobell DB., Burke MB. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. Agricultural and Forest Meteorology 2010; 150(11): 1443-1452.

Magrin GO., Travasso MI., Rodríguez GR. Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. Climatic Change 2005; 72: 229-249.

Mateo-Sagasta J., Zadeh SM., Turral H., Burke J. Water pollution from agriculture: A global review. Executive summary. 2017.

McCulloch WS., Warren S., McCulloch., Walter Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics 1943; 5: 115-133.

Mendelsohn R. The impact of climate change on agriculture in developing countries. Journal of Natural Resources Policy Research 2009; 1(1): 5-19.

Mendelsohn R. The impact of climate change on agriculture in Asia. Journal of Integrative Agriculture 2014; 13(4): 660-665.

Ministry of Trade, Genel tarım sektörü, İhracat Genel Müdürlüğü Tarım Ürünleri Daire Başkanlığı. 2022. Erişim tarihi: 13/02/2025. Erişim linki: https://ticaret.gov.tr/data/5b8700a513b8761450e18d81/Genel%20Tarım%20Sektörü%20Raporu.pdf

NASA. Global climate change. 2023. Available at: https://climate.nasa.gov/newsletters/120/#:~:text=Global%20ocean%20temperatures%20reached%20record,and%20alerts%20for%20the%20area.&text=As%20the%20climate%20changes%2C%20the,extreme%20weather%20events%20are%20increasing.

Nelson GC., Rosegrant MW., Koo J., Robertson R., Sulser T., Zhu T., Lee D. Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. Intl Food Policy Res Inst. 2009; 21.

Our World in Data. How much of global greenhouse gas emissions come from food? 2025. Available at: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions-food?utm_source=chatgpt.com

Pilevneli T., Capar G., Sánchez-Cerdà C. Investigation of climate change impacts on agricultural production in Turkey using volumetric water footprint approach. Sustainable Production and Consumption 2023; 35: 605-623.

Praveen B., Sharma P. A review of literature on climate change and its impacts on agriculture productivity. Journal of Public Affairs 2019; 19(4): e1960.

Rajaniemi M., Mikkola H., Ahokas J. Greenhouse gas emissions from oats, barley, wheat and rye production. Agron. Res 2011; 9: 189-195.

Rosenblatt F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychoanalytic Review 1958; 65: 386-408.

Schlenker W., Roberts MJ. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 2009; 106(37): 15594-15598.

Sietsma J., Dow RJ. Creating artificial neural networks that generalize. Neural Networks 1991; 4(1): 67-79.

Tao F., Yokozawa M., Xu Y., Hayashi Y., Zhang Z. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. Agricultural and Forest Meteorology 2006; 138(1-4): 82-92.

Thomazini A., Mendonça ES., Teixeira DB., Almeida ICC., La Scala Jr N., Canellas LP., Schaefer CEGR. CO_2 and N2O emissions in a soil chronosequence at a glacier retreat zone in Maritime Antarctica. Science of the Total Environment 2015; 521: 336-345.

TÜİK. 2023. Erişim aderesi: https://www.tuik.gov.tr/

Yano T., Aydin M., Haraguchi T. Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a Mediterranean environment of Turkey. Sensors 2007; 7(10): 2297-2315.

Yilmaz I., Akcaoz H., Ozkan B. An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey. Renewable Energy 2005; 30(2): 145-155.

Yu L., Wang S., Lai KK. Foreign-exchange-rate forecasting with artificial neural networks. Springer Science ve Business Media. 2010.

Zou J., Han Y., So SS. Overview of artificial neural networks. Artificial Neural Networks: Methods and Applications, 2009; 14-22.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2239-2251, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2239-2251, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Zeytinyağı Maserasyon Tekniğiyle Üretilmiş Bazı Tıbbi Bitki Yağlarının Biyolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Zehra Tuğba MURATHAN[1*], Hacer BOYRAZ[2], Nurcan ERBİL[3], Mehmet ARSLAN [4]

[1]Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Battalgazi Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Battalgazi/Malatya
[2]Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Battalgazi Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Battalgazi/Malatya
[3]Ardahan Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Acil Yardım ve Afet Yönetimi Bölümü, Ardahan
[4]Ardahan Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Sağlık Yönetimi Bölümü, Ardahan

[1]https://orcid.org/0000-0002-1468-7240
[2]https://orcid.org/0009-0005-9692-0251
[3]https://orcid.org/0000-0001-9553-2306
[4]https://orcid.org/0000-0002-9015-1798
*Sorumlu yazar: zehra.murathan@ozal.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 07.02.2025
Kabul tarihi:14.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Antibakteriyel
Antioksidan
Maserasyon
Mutajenik etki
Tıbbi bitki

ÖZ

Türkiye bitki biyoçeşitliliği bakımından oldukça zengin olup tıbbi özelliklere sahip çok sayıda bitki türü barındırmaktadır. Tıbbi bitkiler çok eski zamanlardan beri halk tıbbında kullanılmaktadır. Bitkilerden farklı yollarla ekstraktlar hazırlanabilmektedir. Zeytinyağı maserasyon tekniği de bu yollardan biridir. Bu çalışmada kantaron, lavanta, biberiye, nane, kekik ve sinir otu yağlarında fenolik madde ve flavonoid madde içerikleri, antioksidan kapasite (ABTS, DPPH, FRAP), antibakteriyel aktivite ve mutajenik aktivite değerleri belirlenmiştir. Aynı zamanda maserasyonda kullanılan sızma zeytinyağı da kontrol grubu olarak kullanılmıştır. Zeytinyağı ekstraktında fenolik ve flavonoid madde ile antioksidan aktivite değerleri tıbbi bitki yağlarına oranla düşük bulunurken; en yüksek fenolik madde değerleri biberiye yağı ekstraktında tespit edilmiştir. Toplam flavonoid madde içeriği ise en yüksek kantaron yağı ekstraktında (20,62 mg mL^{-1}), en düşük sinir otu yağı ekstraktında (9,47 mg mL^{-1}) bulunmuştur. Zeytinyağı ekstraktının ABTS ve DPPH radikal süpürücü aktiviteleri ve FRAP değeri sırasıyla % 32,6, % 35,36 ve 475,36 µmol L^{-1} olarak belirlenmiştir. ABTS ve DPPH radikal süpürücü aktivite ile FRAP değeri en yüksek biberiye yağ ekstraktında, sırasıyla % 72,27, % 68,23 ve 722,62 µmol L^{-1} olarak tespit edilmiştir. Çalışmada kantaron yağı ve zeytinyağında test bakterilerine karşı antibakteriyel aktivite gözlenmezken, *Bacillus spizizenii*'nin ATCC 6633 suşu ve *Bacillus licheniformis*'in ATCC 14580 suşu'nun biberiye yağı; *Escherichia coli*'nin ATCC 8739 suşunun ise lavanta, sinir otu, kekik ve nane yağına karşı zayıf düzeyde bir hassasiyet gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmada bitkisel yağların hiçbirinin denenen dozlarında TA98 ve TA100 suşlarında istatiksel olarak herhangi bir mutajenik etki tespit edilmemiştir. Bu çalışmada analiz edilen tıbbi bitki yağlarının güvenli dozlarda kullanımının sağlığa olumlu etkiler sunacağı düşünülmektedir.

Determination of Biological Properties of Some Medicinal Plant Oils Produced by Olive Oil Maceration Technique

Research Article

ABSTRACT

Article History:
Received: 07.02.2025
Accepted: 14.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Antibacterial
Antioxidant
Maseration
Mutagenic effect
Medicinal plant

Türkiye is very rich in plant biodiversity and contains many plant species with medicinal properties. Medicinal plants have been used in folk medicine since ancient times. Extracts can be prepared from plants in different ways. Olive oil maceration technique is one of these methods. In this study, phenolic and flavonoid content, antioxidant capacity (ABTS, DPPH, FRAP), antibacterial activity and mutagenic activity values were determined in St. John's wort, lavender, rosemary, mint, thyme and plantain oils. At the same time, virgin olive oil used in maceration was used as a control group. While phenolic and flavonoid content and antioxidant activity values in olive oil extract were found to be lower than in medicinal plant oils; the highest phenolic content was found in rosemary oil extract. The highest total flavonoid content was found in St. John's wort oil extract (20.62 mg mL^{-1}) and the lowest in plantain oil extract (9.47 mg mL^{-1}). ABTS and DPPH radical scavenging activities and FRAP values of olive oil extract were determined as 32.6%, 335.6% and 475.36 µmol L^{-1}, respectively. The highest ABTS and DPPH radical scavenging activities and FRAP values were determined in rosemary oil extract as 72.27%, 68.23% and 722.62 µmol L^{-1}, respectively. In the study, while no antibacterial activity was observed in St. John's wort oil and olive oil against the test bacteria, it was found that *Bacillus spizizenii* strain ATCC 6633 and *Bacillus licheniformis* strain ATCC 14580 showed weak sensitivity to rosemary oil; *Escherichia coli* strain ATCC 8739 showed weak sensitivity to lavender, plantain, thyme and peppermint oil. In the study, no mutagenic effects were statistically detected in TA98 and TA100 strains at the tested doses of any of the vegetable oils. It is thought that the use of medicinal plant oils analyzed in this study in safe doses will have positive effects on health.

To Cite: Murathan ZT., Boyraz H., Erbil N., Arslan M. Zeytinyağı Maserasyon Tekniğiyle Üretilmiş Bazı Tıbbi Bitki Yağlarının Biyolojik Özelliklerinin Belirlenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2239-2251.

1. Giriş

Son yıllarda doğal tedavi yöntemlerindeki artışla birlikte tıbbi ve aromatik bitkilere olan talep artmıştır. Ülkemiz ekolojisinde 174 familyaya ait 1,251 cins ve 12,000'den fazla tür ve tür altı takson bulunmaktadır. Aynı zamanda ülkemiz çok sayıda endemik bitki türünün de gen merkezidir. Türkiye'de yaklaşık 350 tıbbi ve aromatik bitkinin bulunduğu, bu bitkilerden 139 tanesinin ihraç edildiği bildirilmiştir (Özgüven ve ark., 2005). Arkeolojik bulgulardan elde edilen bilgilere göre bitkiler insanlığın başlangıcından beri beslenme ve sağlık problemlerini gidermek amacıyla kullanılmaktadır (Koçyiğit, 2005). Bu bitki türlerinden lavanta, biberiye, nane, kantaron ve kekik ülkemizde doğal olarak yetişmesinin yanı sıra kültürü de yapılan tıbbi bitkilerdendir.

Bitkiler geleneksel tıpta çok farklı şekillerde kullanılmaktadır (özsuyu çıkarılarak, kompres yapılarak, yakı olarak, lapası yapılarak, toz haline getirilerek, tütsü yapılarak, yağı çıkarılarak, çayı yapılarak vs.). Tıbbi bitkilerden üretilen yağlar da tedavi edici olarak kullanılmaktadır. Tıbbi bitki yağı üretim metotlarından bir tanesi zeytinyağı maserasyon tekniğidir. Metot bir çözücü içerisinde kuru bitkilerin belli bir süre sıcak-ılık ortamda bekletilmesi esasına dayanmaktadır (Şenol ve Ertop, 2024). Bekletme aşamasında bitkilerin içerisindeki biyoaktif maddelerin çoğu yağ içerisine geçmektedir. Masere yağların elde edilmesi ucuzdur (Yüngül ve ark., 2014). Bitkilerden yağ ekstraksiyonu metodu kullanılarak maserasyon metoduna kıyasla daha verimli ve etkili yağlar elde edilebilir. Ancak yağ verimi düşük olan bitkilerde maserasyon yöntemi daha ekonomiktir (Anonim, 2015).

Ülkemizde kantaron yağı zeytinyağı maserasyon tekniği kullanılarak yapılmakta ve sağlığı iyileştirici olarak kullanılmaktadır. Lavanta, biberiye, nane, kekik bitkilerinin yağları ise yeni yeni kullanılmaya başlanmıştır. Zeytinyağı maserasyon tekniğiyle üretilen bitkisel yağlar deriye sürülerek kullanımının yanı sıra aç veya tok karnına içilerek te kullanılmaktadır. Bu nedenle bu yağların biyolojik özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Tıbbi bitki yağları farklı amaçlarla sağlık yararına kullanılırken, içerdikleri bazı biyoaktif bileşenlerin toplam miktarları, antioksidan, antibakteriyel özellikleri ve genotoksik etkilerinin olup olmadığının bilinmesi gerekmektedir. Kantaron yağıyla ilgili çok sayıda çalışma mevcutken (Vajs ve ark., 2003; Erdoğrul ve ark., 2004; Saddiqe ve ark., 2010; Orhan ve ark., 2013; Eroğlu ve Girgin, 2021; Makarova ve ark., 2021) diğer bitki yağlarıyla ilgili çalışmalar yok denecek kadar azdır (Günata, 2012; Boran ve Uğur, 2018; Altıntaş ve Kuleşan, 2020; Soares ve ark., 2020). Var olan çalışmalar da genellikle bitkilerin uçucu yağlarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kantaron (*Hypericum perforatum*), lavanta (*Lavandula officinalis*), biberiye (*Rosmarinus officinalis*), nane (*Mentha piperita*), kekik (*Thymus vulgaris*) ve sinir otu (*Plantago major*) masere yağlarından elde edilen ekstraktlarda toplam fenolik madde ve flavonoid madde miktarları, antioksidan aktivite (ABTS, DPPH, FRAP), antibakteriyel aktivite ve mutajenik aktivite değerleri belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Tıbbi bitki toplanması ve maserasyon metodu

Araştırmada kantaron (*Hypericum perforatum*), lavanta (*Lavandula officinalis*), biberiye (*Rosmarinus officinalis*), nane (*Mentha piperita*), kekik (*Thymus vulgaris*) ve sinir otu (*Plantago major*) bitkilerinden elde edilen yağlar kullanılmıştır. Bitki örnekleri Malatya Turgut Özal Üniversitesi Battalgazi Meslek Yüksekokulu Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Bahçesinden temin edilmiştir. Kantaron, biberiye, nane, kekik bitkilerinin toprak üstü kısımları, lavantanın çiçekleri ve sinir otunun yaprakları kullanılmıştır. Bitki örnekleri toplanıp laboratuvar ortamında, gölgede, oda sıcaklığında kurutulduktan sonra küçük parçalar halinde düşük asit içeren sızma zeytinyağı içerisinde 40 gün süreyle bekletilerek masere edilmiştir (1:5) (Ayran ve Kan, 2022). İçeriğinde biyoaktif bileşenler bulunduğu bilinen sızma zeytinyağı da çalışmada ayrıca analiz edilmiştir.

2.2. Ekstraksiyon

Ekstraksiyon icin 2,5 ml zeytinyağı veya masere yağ 5 ml hekzanda çözdürüldükten sonra 5 ml metanol eklenerek karıştırılmış, sonrasında tüpler 10 dakika süre ile çalkalanmış ve 3500 devirde santrifüj edilmiştir. Ayrılan metanolik fazlar alınarak biyokimyasal analizlerde kullanılmak amacıyla derin dondurucuda (-20 °C'de) bekletilmiştir (Murkovich ve ark., 2004).

2.3. Toplam fenolik madde analizi

Tıbbi yağ ekstraktlarının toplam fenolik madde miktarı Gutfinger (1981)' in kullandığı metoda göre belirlenmiştir. Bunun için yağ ekstraktı (200 µL), Folin-Ciocalteu (1000 µL) ve Na_2CO_3 (800 µL (%

7,5)) karışımı 25 °C'de 2 saat inkübasyona bırakıldıktan sonra spektrofotometre 765 nm'de ölçülmüştür. Ekstraktların toplam fenolik madde içeriği mL'de mg gallik asit olarak tespit edilmiştir.

2.4. Toplam flavanoid madde analizi

Flavanoid madde miktarı Asadi ve ark. (2010) kullandığı yöntemle belirlenmiştir. Bir cam tüpe ekstrakt (0,5 ml), su (2 ml) ve $NaNO_2$ (0,15 ml (%15)) eklenmiştir. 6 dakika inkübasyondan sonra $AlCl_3$ (0,15 ml %10'luk) eklenmiş ve bundan 6 dakika sonra NaOH (2 ml %4'lük) ile karıştırılarak 5 ml'ye saf su ile tamamlanmıştır. 15 dakika inkübasyondan sonra absorbans spektrofotometrede 510 nm'de okunmuştur. Örneklerin toplam flavonoid madde içeriği mL'de mg kateşin olarak ifade edilmiştir.

2.5. Antioksidan kapasite analizi

DPPH metodu

DPPH radikal süpürücü aktivite Brand-Williams ve ark. (1995)'e göre belirlenmiştir. 4 ml DPPH (0,1 N) solüsyonu, 1 ml ekstrakt ile karıştırılarak 30 dk karanlık ortamda oda sıcaklığında inkübe edilmiştir. Süre sonunda absorbans ölçümleri spektrofotometrede 515 nm'de yapılmıştır. Antioksidan kapasite %DPPH=(Akontrol-Aörnek)/Akontrol x100 formülüyle hesaplanmıştır.

ABTS metodu

ABTS radikal süpürücü aktivite Saafi ve ark. (2009)'a göre belirlenmiştir. ABTS solüsyonu (7 mM) ve potasyum per sülfat (2,45 mM) solüsyonu 1:1 oranında karıştırılarak 16 saat karanlık ortamda bekletilmiş ve stok solüsyon hazırlanmıştır. Stoğun absorbansı 0,7±0,05 olana kadar 734 nm'de etanolle seyreltilmiştir. 150 µl ekstrakt 2,85 ml ABTS solüsyonuyla karıştırılarak 6 dk karanlıkta inkübe edildikten sonra karışımın absorbans ölçümleri 734 nm'de spektrofotometrede yapılmıştır. Antioksidan kapasite %ABTS=(Akontrol-örnek)/Akontrol x100 formülüyle hesaplanmıştır.

FRAP metodu

FRAP yöntemi Alothman ve ark. (2009) tarafından yapılan metoda göre gercekleştirilmiştir. 25 ml sodyum asetat tamponu (300 mM, pH 3,6), 2,5 ml TPZT solüsyonu (10 mM in 40 mM HCl) ve 2,5 ml $FeCl_3.6H_2O$ (20 mM) karışımı ile FRAP solüsyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan solüsyon 37 °C'de su banyosunda ılıtılmış ve 100 µl ekstrakt ile 3 ml FRAP solüsyonu ile karıştırılmıştır. Karışımın absorbansı 4 dk sonra spektrofotometrede 593 nm dalga boyunda belirlenmiştir. Sonuçlar $FeSO_4$ çözeltisi (100-1000 µl) kullanılarak hazırlanan standart eğri ile 1 L'de µmol Fe (II) olarak tespit edilmiştir.

2.6. Antibakteriyel aktivite analizleri

Antibakteriyel aktivite analizleri disk difüzyon yöntemi ile çalışılmıştır (Collins ve ark., 2004). Bunun için steril boş antibiyogram diskleri kullanılmış olup, disklere 50 µL maserasyon örneklerinden emdirilmiştir. Test bakterisi olarak *Enterobacter aerogenes* ATCC 13048, *Bacillus spizizenii* ATCC 6633, *Escherichia coli* ATCC 8739, *Bacillus licheniformis* ATCC 14580 ve *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 kullanılmıştır. Bakteri örnekleri Nutrient Broth'ta 16 saat inkübasyona bırakılmış ve sonrasında McFarland 0,5'e ayarlanmıştır. Besiyeri olarak Müller Hinton Agar kullanılmış olup, pozitif kontrol olarak Eritromisin antibiyotik disk kullanılmıştır. Petriler 37 °C'de 48 saat inkübe edilmiş ve inhibisyon zonları dijital kumpas ile mm olarak ölçülmüştür.

2.7. Genotoksisite testleri

Salmonella typhimurium geri mutasyon testi

Mutajenite testleri, Maron ve Ames (1983)'in geliştirdikleri Plak inkorporasyon yöntemi uygulanarak yapılmıştır. Mutajen aktivite analizleri *Salmonella typhimurium* TA 98 ve *Salmonella typhi*murium TA 100 suşları üzerinde çalışılmıştır. Plaklar Plak inkorporasyon testinde, test bileşiği, bakteriyel test suşu top agara karıştırılarak, minimal glukoz agarlı plaklara dökülmüştür. Plaklar 37°C'de 48-72 saat inkübe edilip, bu süre sonunda plaklardaki his+ revertant bakteri kolonileri sayılmıştır. Bu yöntemde, histidin ve biotin eklenmiş 45°C'deki 2 ml'lik top agara, test suşu kültüründen 0,1 ml, test edilecek kimyasaldan 0,1 ml eklenip düşük hızda 3 sn vortekslenerek (karıştırılarak) oda sıcaklığındaki minimal glukoz agarlı plaklara yayılmıştır. Top ağarın plağın bütün yüzeyine donmadan yayılmasını sağlamak için karıştırma, dökme ve yayma işlemlerinin tümü 20 saniyeden az bir surede yapılmıştır. Her deneyde, her suşun geri dönme özgüllüklerini doğrulamak için pozitif kontrol olarak mutajen kullanılmış ve böylece rutin olarak, mutajenik etki kontrolleri yapılmıştır. Bakteriyi ve kullanılan çözücüyü içeren, fakat test edilen maddeyi içermeyen negatif kontrol plakları, her suş için kendiliğinden geriye dönen bakteri sayısının saptanmasında kullanılmıştır. Test maddesi, pozitif ve negatif kontrol eşliğinde test edilmiştir.

Her test suşu kendine özgü sayıda revertant koloni oluşturduğundan, test materyallerinin mutajenik etkilerini araştırırken muhakkak negatif kontrol grubunun kullanılması gerekmektedir. Test maddesinin oluşturduğu revertant koloniler ile kontrol revertant koloniler karşılaştırılarak test maddesinin mutajenik etkileri olup olmadığı hakkında karar verilmiştir.

2.8. İstatistiksel analizler

Biyokimyasal analizler bakımından üzerinde çalışılan bitki çeşitlerinin (zeytinyağı, nane, kantaron, sinir otu, biberiye, lavanta, kekik) 3 tekrarlı analizlerinin ortalamaları arasında istatistik olarak önemli farklılıklar olup olmadığının belirlenmesinde Duncan testi kullanılmış olup I. tip hata olasılığı 0,05 olarak belirlenmiştir. Mutajenite testinin istatistiksel analizi için öncelikle veri setlerinin normalitesi Shapiro-Wilk testi ile belirlenmiştir. Normal dağılım gösteren verilerin homojeniteleri Levene's

değişkenleri homojenitesi testine tabi tutulmuştur. OneWay ANOVA testine göre homojen dağılan veriler Duncan, homojen olmayan veriler Dunnett's C post-hoc testleri ile değerlendirilmiştir. İstatistik analizler IBM SPSS Statistics 20 paket programından yararlanılarak yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bitkilerin zeytinyağında maserasyonu ucuz ve etkili bir tekniktir. Bu yöntemde bitkinin içeriğinde bulunan fitokimyasallar yağ içerisine geçmektedir ancak masere yağlar bitki uçucu yağlarına oranla daha az fitokimyasal bulundurmaktadırlar. Bu nedenle de toksik özellik göstermezler (Crockett, 2010). Masere yağların antiseptik, mide ve barsak rahatlatıcı, antiinflamatuar, cilt hastalıklarını giderici olarak kullanılabileceği önerilmektedir (Price, 1999). Çalışmada kullanılan tıbbi bitkilere ait maserasyon ekstraktlarının biyokimyasal analiz sonuçları Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Bitki örneklerinin zeytinyağlı maserasyon ekstraktlarına ait biyokimyasal analiz sonuçları

	Toplam Fenolik Madde (mg mL^{-1})	Toplam Flavonoid Madde (mg mL^{-1})	ABTS (%)	DPPH (%)	FRAP (µmol L^{-1})
Zeytinyağı	177,6±13,31 ^{e}	9,37±0,68 ^{d}	32,6±9,23 ^{d}	35,36±0,96 ^{e}	475,36±18,17 ^{d}
Nane	421,3±9,21 ^{c}	15,35±0,11 ^{b}	56,89±0,93 ^{b}	53,77±1,80 ^{b}	596,61±33,78 ^{bc}
Kantaron	359,9±11,82 ^{d}	20,62±0,35 ^{ab}	55,55±2,16 ^{b}	50,13±0,42 ^{b}	583,53±19,75 ^{c}
Sinir otu	362,0±20,00 ^{cd}	9,47±1,28 ^{d}	49,66±0,54 ^{c}	47,75±2,61 ^{c}	594,86±2,43 bc
Biberiye	729,3±12,81 ^{a}	15,57±0,11 ^{b}	72,27±1,31 ^{a}	68,23±2,93 ^{a}	722,62±50,63 ^{a}
Lavanta	542,6±19,46 ^{b}	11,95±0,03 ^{cd}	50,12±2,37 ^{c}	52,69±0,66 ^{b}	608,40±2,97 ^{b}
Kekik	586,8±13,45 ^{b}	13,72±0,14 ^{c}	47,85±2,40 ^{c}	40,40±2,43 ^{d}	571,43±18,62 ^{cd}

Aynı sütunda gösterilen farklı harfler (a-e) istatistik olarak farklı ortalamaları göstermektedir.$P<0.05$ ±: Standart sapma

Çalışmada toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde içerikleri masere yağlara oranla en düşük zeytinyağı ekstraktında bulunmuştur (Tablo 1). Masere yağlar içerisinde fenolik madde içeriği en yüksek olan örnek 729,3 mg mL^{-1} değeri ile biberiye yağ ekstraktı, en düşük olan örnek ise 359,9 mg mL^{-1} değeri ile kantaron yağ ekstraktı olmuştur. Toplam flavonoid madde miktarı en yüksek kantaron yağ ekstraktında (20,62 mg mL^{-1}), en düşük sinir otu yağ ekstraktında (9,47 mg mL^{-1}) belirlenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde Eroğlu ve Girgin (2021)'in kantaron bitkisinin zeytinyağı maseratının DMSO ekstraktlarında toplam fenolik madde içeriğini 417,75 mg mL^{-1} olarak belirlediği görülmektedir. Yine Soares ve ark. (2020) biberiye ve fesleğen bitkilerinin zeytinyağı maseratlarında toplam fenolik madde miktarının sırasıyla 106,36 ile 185,35 ve 20,43 ile 153,73 mg kg^{-1} aralığında olduğunu bildirmişlerdir. Belbahi ve ark. (2023) *Pistachia lentiscus* yaprağının zeytinyağı maseratının toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde içeriklerini 189,35 ile 12,02 mg g^{-1} olarak belirlemişlerdir. Ammar ve ark. (2017) *Opuntia ficus-indica* çiçeklerinin % 5'lik ve % 10'luk zeytinyağı maseratlarının toplam fenolik madde içeriklerinin 258,8 ile 262 mg kg^{-1} olduğunu bildirmişlerdir. Aynı çalışmada zeytinyağı örneğinde toplam fenolik madde içeriği 254,5 mg kg^{-1} olarak belirlenmiştir. Literatür sonuçlarıyla çalışmadaki sonuçlar karşılaştırıldığında benzerlik ve

farklılıklar görülebilmektedir. Bu durum bitkilerdeki genetiksel farklılıklardan, yetişme koşullarının farklılıklarından veya analiz metotlarındaki farklılıklardan kaynaklanabilmektedir.

Çalışmada örneklerin antioksidan aktivite değerleri Tablo 1.'de verilmiştir. Bitkilerin maserasyonunda kullanılan zeytinyağı ekstraktının analiz sonuçları bitkisel yağ ekstraktlarının sonuçlarından düşük bulunmuştur. Zeytinyağı ekstraktının ABTS ve DPPH radikal süpürücü aktiviteleri ve FRAP değeri sırasıyla % 32,6, % 35,36 ve 475,36 µmol L^{-1} olarak belirlenmiştir. Çalışmada ABTS ve DPPH radikal süpürücü aktivite ile FRAP değeri en yüksek biberiye yağ ekstraktında, sırasıyla % 72,27, % 68,23 ve 722,62 µmol L^{-1} olarak tespit edilmiştir. Bu değerleri en düşük olan yağ ekstraktı ise kekik bitkisidir (sırasıyla % 47,85, % 40,40, 571,43 µmol L^{-1}). Makarova ve ark. (2021) kantaron bitkisinin FRAP aktivitesini 2,27-2,87 mmol/g olarak bildirmişlerdir. Altun ve ark. (2013) kantaron bitkisinin DPPH radikal süpürücü aktivitesini metanollü ekstrede %89,80, etanollü ekstrede %63,25 ve sulu ekstrede %20,35 olarak belirlemişlerdir.

Tıbbi bitkilere ait maserasyon yağlarının antibakteriyel aktivite değerleri mm cinsinden Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. Bitki örneklerinin zeytinyağlı maserasyon yağlarına ait antibakteriyel aktivite sonuçları (mm)

	Zeytinyağı	Nane	Kantaron	Sinir otu	Biberiye	Lavanta	Kekik	Eritromisin
				(mm)				
Enterobacter aerogenes ATCC 13048	-	-	-	-	-	-	-	11,13±0,31
Bacillus spizizenii ATCC 6633	-	-	-	-	8,60±0,62	-	-	35,06±0,25
Escherichia coli ATCC 8739	-	8,10±0,98	-	9,33±0,25	-	8,96±1,06	8,00±0,63	10,60±0,44
Bacillus licheniformis ATCC 14580	-	-	-	-	7,70±0,30	-	-	35,57±0,47
Staphylococcus aureus ATCC 6538	-	-	-	-	-	-	-	24,10±1,75

Farklı bitkilerin zeytinyağı maserasyon örnekleri ve bu örneklerin hazırlandığı zeytinyağı, test bakterilerine karşı disk difüzyon yöntemi ile test edilmiştir. Analizler sonucunda kantaron yağı ve zeytinyağında test bakterilerine karşı hiç antibakteriyel aktivite gözlenmemiştir. Benzer şekilde Erdoğrul ve ark. (2004) *Hypericum scabrum*'un zeytinyağı maseratının antibakteriyel aktivitesinin olmadığını bildirmişlerdir. Saddiqe ve ark. (2010) ise kantaron bitkisinin içerdiği hypericin ve hyperforin maddelerinin antibakteriyel aktivite gösterdiğini tespit etmişlerdir. Orhan ve ark. (2013) zeytinyağı maseratında hypericin ve hyperforin bulunmadığını, bu nedenle de maseratın antibakteriyel aktivite göstermediğini bildirmişlerdir.

Çalışmada *Bacillus spizizenii* ATCC 6633 ve *Bacillus licheniformis* ATCC 14580'in biberiye yağı; *Escherichia coli* ATCC 8739'nin ise lavanta, sinir otu, kekik ve nane yağına karşı zayıf düzeyde bir hassasiyet gösterdiği tespit edilmiştir. Orhan ve ark. (2013) geleneksel ve ev tipi olarak hazırlanmış 21 masere kantaron yağının *Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Candida albicans, Trichophyton*

rubrum ve *Aspergillus fumigatus*'a karşı antibakteriyel aktivitesini incelemişlerdir. Çalışmada sadece bir yağ örneğinin *Staphylococcus aureus*'a karşı antibakteriyel aktivite gösterdiğini belirlemişlerdir (IC50 = 88,7 µg mL^{-1}). Altıntaş ve Kuleşan (2020) zeytin yaprağı, biberiye ve günlük yaprağı bitkilerinin zeytinyağı maseratlarının antibakteriyel aktivitesini incelemişlerdir. En yüksek antibakteriyel aktiviteyi *Staphylococcus aureus*'a karşı zeytin yaprağı maseratında, *Micrococcus luteus* ve *Escherichia coli* O157:H7'ye karşı biberiye maseratında, *Staphylococcus aureus, Yersinia enterocolitica, Micrococcus luteus*'a karşı günlük yaprağı maseratında tespit etmişlerdir. Vajs ve ark. (2003) kantaron bitkisinin gram pozitif *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Bacillus subtilis* BGA (Merck) ve gram negatif *Escherichia coli* ATCC 25922'ye karşı antibakteriyel aktivitesini incelemişlerdir.Çalışmada kantaron bitkisinin gram negatif bakterilere karşı etki göstermediğini; *Staphylococcus aureus*'a karşı antibakteriyel etki gösterdiğini bildirmişlerdir. Günata (2012) *Thymus vulgaris* ve *Mentha piperita* yağlarının *Escherichia coli*'ye karşı antibakteriyel etki gösterdiğini belirlemiştir. Masere yağların antibakteriyel aktivitesi yağın içeriğinde çözünen bitkisel biyoaktif bileşenlerin çeşidi ve miktarıyla ilişkilidir. Çalışmalardaki farklılıklar bitkilerin genetik özelliklerindeki ve yetişme ortamlarındaki farklılıklar kaynaklı olabilmektedir.

Tıbbi bitkilere ait maserasyon yağlarının mutajenik etki değerleri Tablo 3, 4, 5, 6'da verilmiştir.

Tablo 3. Zeytinyağına ait mutajenik etki sonuçları

Zeytinyağı	TA98	TA100
Kontrol	16,00±2,52	82,60± 5,23
PK	860,70±86,4	851,32± 86,90
12,5 µl $plak^{-1}$	32,30±8,2	113,33±35,91
25 µl $plak^{-1}$	36,30±8,9	233,01±26,66
50 µl $plak^{-1}$	34,60±15,3	157,05±24,10
100 µl $plak^{-1}$	17,00±5,1	170,04±11,12

PK:Pozitif Kontrol
a: kontrol ile aradaki fark önemlidir.
b: Pozitif kontrol ile arasındaki fark önemlidir.
c: çözücü kontrol ile arasındaki fark önemlidir.

Zeytinyağının denenen dozlarında TA98 ve TA100 suşlarında istatiksel olarak herhangi bir mutajenik etki tespit edilmemiştir

Tablo 4. Nane ve Kantaron örneklerinin zeytinyağlı maserasyon yağlarına ait mutajenik etki sonuçları

NANE	TA98	TA100	KANTARON	TA98	TA100
Kontrol	29,67±6,06	149,00±1,53	Kontrol	29,67±6,06	149,00±1,53
PK	920,70±47,50	309,30±19,70	PK	920,70±47,50	309,30±19,70
ÇK	25,33±2,03	128,70±12,70	ÇK	25,33±2,03	128,70±12,70
12,5 µl $plak^{-1}$	28,67±3,84	131,33±2,33	12,5 µl $plak^{-1}$	28,00±2,65	91,00±6,66 [ac]
25 µl $plak^{-1}$	26,00±2,52	131,67±6,12	25 µl $plak^{-1}$	24,33±2,60	102,67±0,88 [a]
50 µl $plak^{-1}$	25,00±2,65	137,00±4,51	50 µl $plak^{-1}$	21,33±4,67	110,33±6,01
100 µl $plak^{-1}$	19,00±8,72	117,67±7,42	100 µl $plak^{-1}$	30,00±3,21	76,00±16,20 [ac]

PK:Pozitif Kontrol, ÇK: Çözücü Kontrol
a: kontrol ile aradaki fark önemlidir.
b: Pozitif kontrol ile arasındaki fark önemlidir.
c: çözücü kontrol ile arasındaki fark önemlidir.

Nane yağının denenen dozlarında TA98 ve TA100 suşlarında istatiksel olarak herhangi bir mutajenik etki tespit edilmemiştir.

Kantaron yağının denenen dozlarında TA98 ve TA100 suşlarında istatiksel olarak herhangi bir mutajenik etki tespit edilmemiştir. TA100 suşunun 12,5 µl plak^{-1}, 25 µl plak^{-1} ve 100 µl plak^{-1} dozlarında kontrole göre; 12,5 µl plak^{-1} ve 100 µl plak^{-1} dozlarında çözücü kontrole göre istatiksel olarak bir azalma görülmüştür. Eroğlu ve Girgin (2021) kantaron bitkisinin zeytinyağı maseratının DMSO ekstraktlarının PC-3 hücrelerine karşı in vitro antikanser aktiviteye sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Tablo 5. Sinir otu ve Biberiye örneklerinin zeytinyağlı maserasyon yağlarına ait mutajenik etki sonuçları

SİNİR OTU	TA98	TA100	BİBERİYE	TA98	TA100
Kontrol	29,67±6,06	149,00±1,53	Kontrol	29,67± 6,06	149,00±1,53
PK	920,70±47,5	309,30±19,72	PK	920,75±47,50	309,32±19,72
ÇK	25,33±2,03	128,70±12,71	ÇK	25,33± 2,03	128,78±12,75
12,5 µl plak^{-1}	27,00±5,69	94,670±7,13 [a]	12,5 µl plak^{-1}	35,00±4,51	114,06±15,51
25 µl plak^{-1}	22,67±2,60	119,00±11,00	25 µl plak^{-1}	25,67±7,13	122,33±14,26
50 µl plak^{-1}	29,33±6,64	110,04±11,82	50 µl plak^{-1}	39,35±20,50	140,01±10,13
100 µl plak^{-1}	22,00±3,46	92,00±5,69 [a]	100 µl plak^{-1}	16,00±0,577	118,30±10,59

PK:Pozitif Kontrol, ÇK: Çözücü Kontrol
a: kontrol ile aradaki fark önemlidir.
b: Pozitif kontrol ile arasındaki fark önemlidir.
c: çözücü kontrol ile arasındaki fark önemlidir.

Sinir otu yağının denenen dozlarında TA98 ve TA100 suşlarında istatiksel olarak herhangi bir mutajenik etki tespit edilmemiştir. Ancak TA100 suşunun 12,5 µl plak^{-1} ve 100 µl plak^{-1} dozlarında kontrole göre istatiksel olarak koloni sayılarında azalma görülmüştür. Biberiye yağının denenen dozlarında TA98 ve TA100 suşlarında istatiksel olarak herhangi bir mutajenik etki tespit edilmemiştir.

Tablo 6. Lavanta ve Kekik örneklerinin zeytinyağlı maserasyon yağlarına ait mutajenik etki sonuçları

LAVANTA	TA98	TA100	KEKİK	TA98	TA100
Kontrol	29,75±6,12	149,00±1,53	Kontrol	29,67±6,06	149,00±1,53
PK	920,76±48	309,33±19,76	PK	920,76±47,52	309,36±19,73
ÇK	25,33±2,16	128,72±12,75	ÇK	25,33±2,03	128,72±12,74
12,5 µl plak^{-1}	26,39±6,11	132,00±4,73	12,5 µl plak^{-1}	17,67±2,73	126,00±3,46
25 µl plak^{-1}	23,06±0,60	97,00±4,36 [ac]	25 µl plak^{-1}	21,33±2,96	124,00±10,62
50 µl plak^{-1}	34,32±3,23	117,00±1,73	50 µl plak^{-1}	12,67±1,86 [c]	99,71±17,00 a
100 µl plak^{-1}	25,03±0,58	98,00±3,51 [ac]	100 µl plak^{-1}	13,00±3,00 [c]	94,67±4,26 [a]

PK:Pozitif Kontrol, ÇK: Çözücü Kontrol
a: kontrol ile aradaki fark önemlidir.
b: Pozitif kontrol ile arasındaki fark önemlidir.
c: çözücü kontrol ile arasındaki fark önemlidir.

Lavanta yağının denenen dozlarında TA98 ve TA100 suşlarında mutajenik etki tespit edilmemiştir. TA100 suşunun 25 µl plak^{-1} ve 100 µl plak^{-1} dozlarında kontrol ve çözücü kontrole göre istatiksel olarak koloni sayısında azalma görülmüştür. Kekik yağının denenen dozlarında TA98 ve TA100 suşlarında mutajenik etki tespit edilmemiştir. Ancak TA98 suşunun 50 µl plak^{-1} ve 100 µl plak^{-1}

dozlarında çözücü kontrole göre, TA 100 suşunun 100 µl plak^{-1} dozunda kontrole göre koloni sayısında azalma görülmüştür. Bitkilerin uçucu bileşenlerinin mutajenik aktivitesiyle ilgili çalışmalar mevcuttur ancak masere bitki yağlarının mutajenik aktivitesi daha önce çalışılmamıştır. Boran ve Uğur (2018) nane bitkisinin uçucu yağının denenen hiçbir konsantrasyonunun (2-10 µl plak^{-1}) mutajenik etki göstermediğini bildirmişlerdir.

5.Sonuçlar

Bazı bitkilerin masere yağlarının uzun yıllardan beri haricen kullanıldığı bilinmektedir. Bu amaçla en çok kullanılan bitki kantaron, en fazla kullanılan yağ ise zeytinyağıdır. Kantaronun yanısıra nane, biberiye, sinir otu, kekik, lavanta gibi bitkilerin de maserasyon tekniğiyle yağları yapılmakta ve çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bitkilerden elde edilen uçucu yağlar çok yüksek fiyatlıdır. Bu sebeple piyasada uçucu yağ adı altında satılan yağların çoğu maserasyon tekniğiyle elde edilmektedir. Aynı zamanda elde edilmeleri kolay olduğundan halk tarafından da yapıldığı; gerek ağız yoluyla gerekse deri yoluyla kullanıldığı bilinmektedir. Özellikle kantaron yağı yaygın bir kullanıma sahiptir. Sinir otu ve kekik bitkileri ise antiviral özelliklerinden ötürü son 5 yılda Covid-19 virüsüne etkisi nedeniyle oldukça popülarite kazanmışlardır. Eczanelerde bu bitkilerin uçucu yağlarıyla hazırlanmış çok sayıda pastil mevcuttur. Ülkemizde de Covid-19 enfeksiyonu geçiren kişilerin, hastalığın bıraktığı hasarları önlemek amacıyla aktarlardan yoğun olarak sinir otu ve kekik satın aldığı bilinmektedir. Halk tarafından yoğun olarak tüketilen bu yağların biyolojik özelliklerinin bilinmesi önem taşımaktadır.

Çalışmada bitkilerin maserasyonunda kullanılan zeytinyağı ekstraktlarının tüm biyokimyasal analiz sonuçları bitkisel yağ ekstralarının sonuçlarından düşük bulunmuştur. Maserasyon sonucu elde edilen yağlarda ise toplam fenolik madde ve 3 metotla yapılan antioksidan aktivite analiz sonuçları en yüksek biberiye yağında bulunmuştur. Toplam flavonoid madde miktarı ise kantaron yağında yüksek olarak tespit edilmiştir. Bilindiği gibi kantaron yağı içerisinde bitkinin çiçekli toprak üstü organları kullanılmaktadır. Kantaronun sarı renkli çiçeklerinin flavonoid içerdiği düşünüldüğünde en yüksek flavonoid değerinin bu bitkinin yağında çıkması beklenen bir sonuçtur.

Antibiyotik dirençliliğinin oldukça arttığı günümüzde alternatif ve doğal antibiyotik kaynaklarının belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır. Bu nedenle bitkilerin insan patojeni olan bazı bakterilere karşı antibakteriyel aktiviteye sahip olup olmadıklarının bilinmesi gerekmektedir. Analizler sonucunda kantaron yağı ve zeytinyağında test bakterilerine karşı antibakteriyel aktivite tespit edilmemiştir. Ancak, *Bacillus spizizenii* ATCC 6633 ve *Bacillus licheniformis* ATCC 14580'in biberiye yağı; *Escherichia coli* ATCC 8739'nin ise lavanta, sinir otu, kekik ve nane yağına karşı zayıf düzeyde bir hassasiyet gösterdiği belirlenmiştir. Bilindiği gibi bitkilerde çok farklı miktarda ve çeşitte sekonder metabolitler bulunmaktadır. Bu maddelerin çoğu vücutta yaptıkları işlerden ötürü biyoaktif bileşen olarak adlandırılmakta ve sağlığa faydaları bulunmaktadır. Ancak bitkilerin bileşiminde bulunan bazı maddeler belirli bir dozun üzerinde alındıklarında mutajenik etki göstermekte ve sağlığa zarar vermektedir. Çalışmada bitkisel yağların denenen dozlarının hiçbirinin TA98 ve TA100 suşlarına karşı

istatiksel olarak mutajenik etki göstermediği tespit edimiştir. İlerleyen aşamalarda kromatografik analizlerle tıbbi yağların fitokimyasal içeriklerinin ayrıntılı olarak belirlenmesinin, yağların tedavi edici etkileri konusunda daha ayrıntılı bilgi edinilmesine destek olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A "Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı" kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynaklar

Alothman M., Bhat R., Karim AA. Antioxidant capacity of phenolic content of selected tropical fruits from Malaysia, extracted with different solvents. Food Chemistry 2009; 115: 785-788.

Altıntaş AK., Kuleaşan H. Soğuk sıkma ve soğuk maserasyon yöntemiyle elde edilen bitki ekstraktlarının yaygın patojenler üzerindeki etkileri. Gıda 2020; 45(1): 161-170.

Altun ML., Yılmaz BS., Orhan IE., Citoglu GS. Assessment of cholinesterase and tyrosinase inhibitory and antioxidant effects of *Hypericum perforatum* L. (St. John's wort). Industrial Crops and Products 2013; 43: 87-92.

Ammar I., BenAmira A., Khemakem I., Attia H., Ennouri M. Effect of *Opuntia ficus-indica* flowers maceration on quality and on heat stability of olive oil. Journal of Food Science and Technology 2017; 54: 1502-1510.

Anonim. Tıbbi aromatik bitkiler sektör raporu. 2015. Orta Anadolu Kalkınma Ajansı, Kayseri (Erişim tarihi: 15.11.2023).

Asadi S., Ahmadiani A., Esmaeili MA., Sonboli A., Ansari N., Khodagholi F. In vitro antioxidant activities and an investigation of neuroprotection by six Salvia L. species from Iran: A comparative study. Food Chemical Toxicolology 2010; 48: 1341-1349.

Ayran İ., Kan Y. Geleneksel tıp uygulamalarında kullanılan sarı kantaron (*Hypericum perforatum* L.) yağının standardizasyonunun belirlenmesine yönelik yürütülen bazı kalite analizlerinin incelenmesi. Biyolojik Çeşitlilik ve Koruma 2022; 15(2): 249-257.

Belbahi A., Dairi S., Aoun O., Dahmoune F., Kadri N., Remini H., Boulekbache-Makhlouf L. Ultrasound assisted maceration with *Pistachia lentiscus* (lentisk) leaves to enhance the antioxidant activity and the oxidative stability of extra virgin olive oil. Journal of Food Measurement and Characterization 2023; 17: 4715-4726.

Boran R., Uğur A. *Mentha longifolia* (L.) ssp. longifolia essential oil: source of natural antioxidant and antimutagen as food additive. Suleyman Demirel University Science Institute Journal 2018; 22(1): 64-69.

Brand W., Cuvelier MC., Berset C. Use of the free radical method to assess antioxidant activity. Food Science and Technology 1995; 28: 25-30.

Collins CH., Lyne PM., Grange JM., Falkinham JO. Collins and Lyne's microbiological methods (8. Baskı). Arnold, A Member of the Hodder Headline Group; 2004.

Crockett SL. Essential oil and volatile components of the genus *Hypericum* (Hypericaceae). Natural Product Communication 2010; 5(9): 1493-1506.

Erdogrul O., Azirak S., Tosyali C. Antimicrobial activities of *Hypericum scabrum* L. extracts. KSU Journal of Science and Engineering 2004; 7: 38-42.

Eroglu E., Girgin SN. A unique phenolic extraction method from olive oil macerate of Hypericum perforatum using DMSO: Assessment of in vitro anticancer activity, LC-MS/MS profile, total phenolic content and antioxidant capacity. South African Journal of Botany 2021; 139: 6-11.

Gutfinger T. Polyphenols in olive oils. Journal of American Oils Chemists' Society 1981; 58: 966-968.

Koçyiğit M. Yalova İlinde etnobotanik bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2005.

Makarova K., Sajkowska-Kozielewicz JJ., Zawada K., Olchowik-Grabarek E., Ciach MA., Gogolewski K., Dobros N., Ciechowicz P., Freichels H., Gambin A. Harvest time affects antioxidant capacity, total polyphenol and flavonoid content of Polish St John's wort's (*Hypericum perforatum* L.) flowers, Scientific Reports 2021; 11(1): 1-12.

Maron DM., Ames BN. Revised methods for the Salmonella mutagenicity test. Mutation Research 1983; 113: 173-215.

Murkovich M., Lenchner S., Pietzka A., Bratacos M., Katzogiannos E. Analysis of minor components in olive oil. Journal of Biochemical and Biophysical Methods 2004; 61: 155-160.

Orhan IE., Kartal M., Gülpinar AR., Cos P., Matheeussen A., Maes L., Tasdemir D. Assessment of antimicrobial and antiprotozoal activity of the olive oil macerate samples of Hypericum perforatum and their LC–DAD–MS analyses. Food Chemistry 2013; 138(2-3): 870-875.

Özgüven M., Sekin S., Gürbüz B., Şekeroğlu N., Ayanoğlu F., Ekren S. Tütün, tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi ve ticareti. Türkiye Ziraat Mühendisliği VI. Teknik Kongresi 2005; 1: 481-501.

Price S. Practical aromatherapy. How to use essential oils to restore health and vitality. Thorsons; 1999.

Saafi EB., Arem AE., Issaoui M., Hammami M., Achour L. Phenolic content and antioxidant activity of four date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruit varieties grown in Tunisia. International Journal of Food Science and Technology 2009; 44: 2314-2319.

Saddiqe Z., Naeem I., Maimoona A. A review of the antibacterial activity of *Hypericum perforatum* L. Journal of Ethnopharmacology 2010; 131: 511-521.

Soares VP., Fagundes MB., Guerra DR., Leães YSV., Speroni CS., Robalo SS., Ballus CA. Ultrasound assisted maceration for improving the aromatization of extra-virgin olive oil with rosemary and basil. Food Research International 2020; 135: 109305.

Şenol Yazkan SN., Hendek Ertop M. Maserasyon, refluks ve ultrasonik destekli ekstraksiyon yöntemleri ile üretilen kestane propolis ekstraktlarının farklı gıda modellerinde kullanımı: Fizikokimyasal, duyusal ve biyoaktif niteliklere etkisi. Food and Health 2024; 10(1): 22-39.

Yüngül M., Altınterim B., Dörücü M. The investigation of antibacterial effects of macerated and distilled oil obtained from endemic plants against *Yersinia ruckeri* with aromatogram method. Science and Youth Magazine 2014; 2(2): 1-7.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2252-2262, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2252-2262, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Aspir (*Carthamus tinctorius* L.) Çeşitlerinin Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Tarımsal Performanslarının Belirlenmesi

Şerif KAHRAMAN[1]*

[1]Malatya Turgut Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Battalgazi, Malatya, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-1160-0792
*Sorumlu yazar: serif.kahraman@ozal.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 04.03.2025
Kabul tarihi:12.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Aspir
Yağ oranı
Yağ verimi
Çeşit

ÖZ

Bu çalışma, 2016 ve 2017 yetiştirme sezonlarında, Diyarbakır'ın iklim koşullarına uygun aspir çeşitlerini belirlemek amacıyla yürütülmüştür. Deneme, Tesadüf Blokları Deneme Desenine göre üç tekrarlı olarak tasarlanmıştır. Çalışmada Balcı, Dinçer 5-18-1, Linas, Olas ve Remzibey-05 çeşitleri kullanılmıştır. İki yıllık ortalamalardan elde edilen sonuçlara göre; en yüksek tohum verimi Balcı çeşidinden (236,0 kg/da) elde edilirken, en düşük tohum verimi Linas çeşidinden (201,5 kg/da) elde edilmiştir. Diğer önemli bulgulara göre en yüksek yağ verimi Balcı çeşidinden (78,9 kg/da) elde edilirken, en düşük yağ verimi Linas çeşidinden (60,1 kg/da) ve en yüksek yağ oranı Olas çeşidinden (%34,6), en düşük yağ oranı ise Dinçer 5-18-1 çeşidinden (%26,6) elde edilmiştir. Ayrıca, bitki boyu (108,2-119,0 cm), bitki başına tabla sayısı (15,2-16,1), tabla çapı (2,09-2,22 cm) ve bin tane ağırlığı (34,8-39,6 g) belirlenmiştir. İki yıllık bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, Diyarbakır'ın ekolojik koşullarında ve gecikmiş kışlık aspir ekimlerinde Balcı çeşidini yetiştirmenin en uygun seçim olduğu görülmektedir.

Determination of Agricultural Performances of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Under Diyarbakır Ecological Conditions

Research Article

Article History:
Received: 04.03.2025
Accepted: 12.05.2025
Publishedonline:15.12.2025

Keywords:
Safflower
Oil ratio
Oil yield
Cultivar

ABSTRACT

This study aimed to identify suitable safflower cultivars for the climatic conditions of Diyarbakır, conducted over the 2016 and 2017 growing seasons. The experiment was designed using a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. The cultivars used in this study were Balcı, Dinçer 5-18-1, Linas, Olas, and Remzibey-05. Based on the two-year average, the highest seed yield was obtained from the Balcı cultivar (2360 kg ha^{-1}), while the Linas cultivar produced the lowest seed yield (2015 kg ha^{-1}). Other key findings the highest oil yield was obtained from the Balcı cultivar (789 kg ha^{-1}), while the Remzibey-05 cultivar produced the lowest oil yield (601 kg ha^{-1}) and the highest oil content was obtained from the Olas cultivar (34.6%), while the Dinçer 5-18-1 cultivar produced the lowest oil content (26.6%). Besides, plant height (108.2-119.0 cm), head number per plant (15.2-16.1), head diameter (2.09-2.22 cm), and thousand seed weight (34.8-39.6 g) were determined. Based on the results of this two-year study, the Balcı cultivar seems to be the most suitable choice for cultivation under the ecological conditions of Diyarbakır and in delayed winter safflower sowing.

To Cite: Kahraman Ş. Determination of Agricultural Performances of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Under Diyarbakır Ecological Conditions. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2252-2262.

1. Introduction

Safflower is considered more tolerant to cold, drought, and salinity conditions than other oil crops, offering significant potential for contributing to edible oil production in Türkiye (Kayacetin et al., 2012). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.), recognized as a high-quality oilseed crop, is reported to have originated in southern Russia, Iran, Türkiye, Jordan, Iraq, and Israel (Knowles, 1989; Yasar and Sezgin, 2023). Safflower plays a vital role in contributing to the biodiesel, dye, high-quality oil, and fatty acid composition suitable for human consumption (Huth et al., 2015; Subaşı et al., 2023) and the feed industry. It is easily adaptable to crop rotation, effective in reducing fallow areas, capable of growing in different soil types, does not require special equipment during cultivation, and contributes to the sustainability of agricultural production and employment (Akgün and Söylemez, 2022).

The oil quality of safflower is very high due to its fatty acid composition. Safflower oil is an essential source of polyunsaturated fatty acids, recognized as healthy fatty acids for humans (Shivani et al., 2010). The oil content of registered commercial safflower varieties in Türkiye ranges from 24% to 41%, and varieties rich in linoleic and oleic acids are cultivated (Arslan et al., 2019). The nutrient content of safflower meals varies depending on the extraction methods used. Compared to soybean meal, dehulled safflower meal has almost the same nutritional value (Ozek, 2016). Safflower is used in a wide range of industries, including pharmaceutical production, paint production, cosmetic product development, various food production, ruminant and poultry nutrition, and biodiesel production, and it has applications in both traditional and modern medicine (Dinçel, 2024).

Türkiye's safflower production was 39.000 tons, on 321.298 ha^{-1}. The provinces with the highest safflower production ratio in 2023 were Kayseri at 29.5%, Isparta at 13.1%, Konya at 12.4%, Kırşehir at 9.3%, Nevşehir at 8.8%, Ankara at 6.2% and Aksaray at 5.9%. In Türkiye, 85.2% of the total safflower production ratio occurs in these provinces. Diyarbakır province's production was 12 tons, on 9.9 ha in 2023 (Anonymous, 2023a).

The world's safflower production was 723 874 tons on 910 848 hectares, with an average yield of 795 kg ha^{-1} in 2023 (Anonymous, 2023b). In Türkiye, edible vegetable oil production does not meet domestic demand, resulting in a vegetable oil deficit (Babaoglu and Guzel, 2015). In 2022, 3.17 billion dollars were spent on oilseed imports, and 3.02 billion on vegetable and animal oils in Türkiye (Duru, 2024). Türkiye has very favorable climatic and soil conditions for safflower cultivation (Eryılmaz et al., 2014). The gene center of the safflower plant is Anatolia. It is highly adaptable to different ecologies, and its cultivation is similar to seed production, which farmers are accustomed to. It is compatible with seed mechanization and can be planted in spring and winter.

The introduction of safflower as a new crop to a regional cropping system requires information concerning its performance under local environmental conditions (Sayılır et al., 2019). Studies conducted in various environments suggest that variations in yield, environmental conditions, genetic structures of varieties, and breeding practices are significant (Yasar and Sezgin, 2022). Kahraman et al.,

(2025) reported that sowing dates of 15th November and 15th December for yield and other characteristics, may be suitable for Diyarbakır conditions. In a study conducted by Atan et al., (2019), it was reported that the highest grain yield (2.628 kg ha^{-1}) and oil yield (38.49%) were obtained from the Asol variety in Hatay conditions. This study was conducted to determine safflower cultivars suitable under Diyarbakır conditions.

2. Material and Method

This study was conducted in Diyarbakır, Türkiye during the 2016 and 2017 growing seasons. The research site is located between 37°30′ and 38°43′ North latitudes and 40°37′ and 41°20′ East longitudes, at an altitude of 600 meters above sea level. Soil samples from the 0-20 cm depth were analyzed (analysis was conducted in the GAP UTAEM Laboratory). The soil structure was clay-loam, with a pH of 7.9, total salt concentration of 0.085%, phosphorus content of 16.1 kg ha^{-1}, potassium content of 1273.4 kg ha^{-1}, and an organic matter ratio of 0.91%. Phosphorus content and organic matter ratio are low in amount in the soil. Therefore, phosphorus and nitrogen fertilization was applied in safflower trials.

Sowing was carried out at the GAP International Agricultural Research and Training Center. The experiment was designed as a Randomized Complete Block Design with three replicates. The cultivars used in this experiment were Balcı, Dinçer 5-18-1, Linas, Olas, and Remzibey-05. Before sowing, the soil (15-20 cm deep) was ploughed and harrowed. The seeds were trial sowing machine sown at a rate of 120 seeds per square meter on 16 February 2016 and 25 January 2017. Each plot consisted of four rows, with 30 cm between rows and a length of 5 meters. A total of 100 kg ha^{-1} of nitrogen was applied in two stages: 50 kg ha^{-1} before sowing, and the remaining 50 kg ha^{-1} when the plants reached a height of 20-30 cm. Additionally, 50 kg ha^{-1} of phosphorus was applied before sowing (Anonymous, 2002). In the province Diyarbakır, where the field experiments were conducted, the annual rainfall predominantly occurs between October and June. The relative humidity is relatively low. Summers are typically hot, dry, and clear, while winters are cold and partly cloudy. In 2016, average temperature, precipitation and average humidity values were mostlyhigher than in 2017 (Table 1). The amount and timing of rainfall had a positive impact on safflower yield in 2016. During the growing season, no irrigation was provided. Plants in each plot were trial harvester machine harvested for grain yield measurements on 27 July 2016 and 28 July 2017.

Procedures for the features examined

Plant height (cm): The distance between the root collar (soil surface) and the top point of 10 plants at harvest maturity in each plot was measured (Anonymous, 2002).

Number of heads per plant: The number of mature heads on the main stem and lateral branches of 10 plants at harvest maturity in each plot was determined.

Head diameter (cm): The head diameter of 10 plants at harvest maturity in each plot was measured using callipers.

Thousand seed weight (g): After harvest, the weight of 4x100 seeds randomly taken from each parcel was averaged and multiplied by 10 to calculate the thousand seed weight.

Seed yield (kg ha^{-1}): After harvest, the yield per hectare was calculated based on the seed yield obtained from each plot (Anonymous, 2002).

Oil content (%): After harvest, safflower seeds were kept in the oven at 70° for 48 hours to remove moisture. The % crude oil content of 4 g seeds with moisture removed was calculated in the Nuclear Magnetic Resonance (NMR) device.

Oil yield (kg ha^{-1}): Oil yield was calculated by multiplying the oil content and the seed yield of each individual plot (Anonymous, 2002).

Analysis of variance (ANOVA) was performed using the JMP Statistics program. The LSD (Least Significant Difference) test was applied to determine the groups formed, the differences between the groups, and the significance levels (Steel and Torrie, 1980).

Table 1. Climate data for the Diyarbakır province over the long term and for the 2015-16 and 2016-17* years

Months	Average Temperature			Total Precipitation (mm)			Average humidity (%)		
	2016	2017	LY	2016	2017	LY	2016	2017	LY
January	1.1	1.5	1.8	77.2	20.6	68.0	79.3	71.6	77.1
February	7.9	1.5	3.5	69.2	3.8	68.8	71.7	55.0	72.8
March	9.7	9.4	8.5	55.6	90.2	67.3	66.1	69.5	65.6
April	15.7	12.8	13.8	29.0	98.8	68.7	56.2	68.5	63.2
May	19.9	18.8	19.3	41.4	30.6	41.3	51.9	57.6	56.3
June	26.8	26.9	26.3	18.4	2.6	7.9	32.0	30.0	35.9
Mean/Tota	13.5	11.8	12.2	290.8	246.6	281	59.5	58.7	61.8

LY: Over the long term *(Anonymous, 2017).

Table 2. Comparison of some properties of registered safflower varieties

Cultivars	Spininess	Flower color	Registrant institution	Registration year
Balcı	spiny	yellow	Transitional Zone Agricultural Research Institute	2011
Dinçer 5-18-	spineless	red	Transitional Zone Agricultural Research Institute	1983
Linas	thorny	yellow	Thrace Agricultural Research Institute	2013
Olas	thorny	yellow	Thrace Agricultural Research Institute	2015
Remzibey-05	thorny	yellow	Transitional Zone Agricultural Research Institute	2005

Reference: Arslan et al. 2019

3. Results and Discussion

Plant height (cm): Statistically significant differences ($p<0.05$) among the cultivars were found regarding plant height (Table 3). According to the results of this experiment, the highest plant height was recorded for the cultivars Olas (119.0 cm), Linas (117.5 cm), and Dinçer 5-18-1 (112.5 cm) while the Balcı cultivar exhibited the lowest height at 108.2 cm (Table 4). Although the highest plant height was observed in the Olas cultivar, no statistical difference was found between it and the Linas and Dinçer 5-18-1 cultivars. Coşkun (2014) reported that the plant height of safflower ranges from 108.89 to 118.67 cm. Similarly, Oz (2016) reported that the plant height of safflower ranges from 100.5 to 158.6 cm. In

another study, Atan et al. (2019) observed that safflower plant height ranged from 143.83 to 163.67 cm. Sayılır et al., (2019) observed that the plant height of safflower ranged from 86.3 to 103.3 cm. The plant height values obtained in this study were greater than those reported by Sayılır et al., (2019) in İzmir, while our values were found to be lower than those reported by Oz (2016) in Bursa and Atan et al., (2019) in Hatay. Additionally, the results were similar to those reported by Coşkun (2014) in Çanakkale. The observed differences may be attributed to environmental factors (e.g., winter versus spring sowing, amount and timing of precipitation, soil structure) and variations in the cultivation practices and cultivars used.

Table 3. Mean squares values of the examined features

Source	Degree of freedoom	Plant height	The number of heads per plant	Head diameter	Thousand seed weight	Seed yield	Oil content	Oil yield
Years (Y)	1	1.633	3.072	0.0177	539.328*	11926.8	3.4	1377.34
Cultivar (C)	4	125.55*	0.617	0.0161*	20.247**	1501.38	75.44**	346.132
YxC	4	10.216	1.994	0.0067	4.425**	589.346	0.286	35.1759
Error	29	39.63	2.4735	0.0064	23.839	2033.09	10.756	238.423

significant at 0.05 level, **: significant at 0.01 level

Table 4. Average values for plant height, number of heads per plant, and head diameter of safflower cultivars

Cultivars	Plant height (cm)			The number of heads per plant			Head diameter (cm)		
	2016	2017	Mean	2016	2017	Mean	2016	2017	Mean
Balcı	107.7	108.7	108.2 c	15.0	16.3	15.7	2.22	2.15	2.19 a
Dinçer 5-18-1	112.3	112.7	112.5 ac	16.1	15.3	15.7	2.05	2.12	2.09 b
Linas	119.0	116.0	117.5 ab	15.6	14.8	15.2	2.16	2.24	2.20 a
Olas	120.7	117.3	119.0 a	16.2	15.3	15.8	2.18	2.26	2.22 a
Remzibey-05	109.3	112.0	110.7 bc	17.0	15.2	16.1	2.12	2.21	2.17 a
Mean	113.8	113.3	113.6	16.0	15.4	15.7	2.15	2.20	2.17
CV (%)		5.2			9.1			2.9	
LSD cultivar		7.2*			ns				
LSD year		ns			ns			ns	
LSD interaction		ns			ns			ns	

ns: none significant, *: significant at 0,05 level

Number of heads per plant: No significant differences were observed among cultivars, years, and their interaction in terms of number of heads per plant (Table 3). The head number per plant ranged between 15.2 and 16.1 (Table 4). Katar et al., (2014) reported that the head number per plant varied between 12.5 and 18.7. Similarly, in a study conducted by Oz (2016), the head number per plant was found to range from 17.1 to 29.4. Atan et al., (2019) observed that the head number per plant ranged between 11.83 and 16.20, while Sayılır et al., (2019) reported values between 13.38 and 25.61. The head numbers obtained in this study were lower than those reported by Oz (2016) and Sayılır et al., (2019), though they were partially consistent with other findings. Oz (2016) utilized a row and intra-row spacing of 40 × 15 cm in their experiment. The observed differences may stem from variations in agricultural practices,

climatic conditions (e.g., winter versus spring sowing, timing and amount of precipitation), or the cultivars utilized. Moreover, Zarei et al., (2011) highlighted that the number of heads per plant is significantly affected by environmental factors, particularly plant density.

Head diameter (cm): Statistically significant differences ($p<0.05$) among cultivars were observed regarding head diameter (Table 3). The largest head diameter was recorded for the Olas cultivar (2.22 cm), followed by Linas (2.20 cm), Balcı (2.19 cm), and Remzibey (2.17 cm), all within the same statistical group. The Dinçer 5-18-1 cultivar, with a head diameter of 2.09 cm, formed the last statistical group (Table 4). In previous studies, head diameters were reported as 1.63–2.07 cm by Hatipoğlu et al., (2012), 1.90–2.62 cm by Adalı and Öztürk (2016), and 1.8–2.3 cm by Sayılır et al., (2019). Similarly, Aslantaş and Akinerdem (2020) recorded head diameters ranging from 2.06 to 2.25 cm. Additionally, our the findings obtained partially coincide with those reported in other studies. Tahernezhad et al., (2018) noted that head diameter is less influenced by environmental factors and is largely determined by genetic factors. In contrast, Çamaş and Esendal (2006) emphasized the significant impact of environmental conditions on head diameter.

Thousand-seed weight (g): Statistically significant differences ($p<0.01$) were observed regarding thousand-seed weight among the interactions between cultivars and years. Additionally, statistically significant differences ($p< 0.05$) were noted for the interaction effects (Table 3). The highest thousand-seed weight was recorded for the cultivars Linas (44.3 g), Olas (44.3 g), and Balcı (42.4 g) in 2016, whereas the Remzibey cultivar exhibited the lowest value (31.4 g) in 2017. Similarly, the highest thousand-seed weights in 2017 were observed in the cultivars Olas (39.6 g), Linas (38.8 g), and Balcı (38.4 g), while the Remzibey-05 cultivar exhibited the lowest value (34.8 g) (Table 5). In a study conducted by Coşkun (2014), thousand-seed weight values ranged between 33.78 and 39.00 g. Similarly, Oz (2016) reported values ranging between 34.1 and 36.9 g. Adalı and Öztürk (2016) documented thousand-seed weights between 32.77 and 43.28 g. Sayılır et al., (2019) reported a range of 42.8 to 54.1 g, while Yazdani et al., (2019) found thousand-seed weights between 29.27 and 47.58 g. Köse et al., (2021) observed values ranging from 32.1 to 40.4 g. The thousand-seed weights obtained in this study were lower than those reported by Yazdani et al., (2019) and Sayılır et al., (2019) but showed partial similarities with the findings of other researchers. Tahernezhad et al., (2018) noted that environmental factors less influence head diameter and are primarily determined by genetic factors. In contrast, Çamaş and Esendal (2006) emphasized the significant impact of environmental conditions on head diameter. Additionally, the findings obtained partially coincide with those reported in other studies.

Seed yield (kg ha^{-1}): No statistically significant differences were observed among cultivars, years, or their interactions concerning seed yield (Table 3). The statistically insignificant finding may be due to the difference between the replications of the varieties. The seed yield in this study ranged from 2015

to 2360 kg ha^{-1} (Table 4). The timing and amount of rainfall may have affected seed yield in 2016 and 2017. Coşkun (2014) reported seed yields between 2374.4 and 2643.3 kg ha^{-1}. In previous studies, Katar et al., (2014) observed yields ranging from 1485 to 1838 kg ha^{-1}. Ghorbanzadeh et al., (2014) recorded 2330 kg ha^{-1} for autumn sowing. Hatipoğlu et al., (2017) noted a seed yield of 2300 kg ha^{-1} from sowing on February 20. Gürsoy et al., (2018) documented seed yields between 1040 and 1577 kg ha^{-1}. Atan et al., (2019) reported seed yields ranging from 1883.3 to 2627.8 kg ha^{-1}, while Sayılır et al., (2019) reported values between 1560 and 2500 kg ha^{-1}. Arslan and Çulpan (2020) found seed yields ranging from 982 to 1712 kg ha^{-1}, and Köse et al., (2021) recorded values between 834 and 1795 kg ha^{-1}. Aslan and Sirat (2022) reported seed yields ranging from 935.2 to 1280.6 kg ha^{-1}. The seed yields obtained in this study were lower than those reported by Coşkun (2014) but higher than the findings of Katar et al., (2014), Gürsoy et al., (2018), Köse et al., (2021), Arslan and Çulpan (2020), and Aslan and Sirat (2022). Furthermore, our results showed partial similarity with other studies. The observed differences may be attributed to environmental factors, such as the timing of precipitation, soil structure, and the differences between winter and spring sowing, as well as variations in cultivars and management practices. Studies conducted by Köse et al., (2021), Arslan and Culpan (2020), and Aslan and Sirat (2022) were based on spring sowing. It is well established that the yield potential of winter sowing is generally higher than that of spring sowing.

Oil content (%): Statistically significant differences ($p<0.01$) were observed among the cultivars in terms of oil content (Table 3). The highest oil content was recorded in the Olas cultivar at 34.6%, while the lowest was observed in the Dinçer 5-18-1 cultivar at 26.6% (Table 5). Similarly, Coşkun (2014), Koç et al., (2017), Köse et al., (2018), Sayılır et al., (2019), Koç (2019), and Atan et al., (2019) reported oil ratios ranging from 28.67% to 30.44%, 31.0% to 36.4%, 31.2% to 39.3%, 25.35% to 35.03%, 28.8% to 36.5%, and 34.38% to 38.49%, respectively. Our results partially align with these findings. Variations in oil ratios may be attributed to environmental conditions, genotypesdifferences, oil analysis methods, and cultivation practices.

Oil yield (kg ha^{-1}): No significant differences were observed among cultivars, years, and their interaction for oil yield (Table 6). The highest oil yield was obtained from the Balcı cultivar (789 kg ha^{-1}), while the Remzibey-05 cultivar produced the lowest oil yield (601 kg ha^{-1}). Oil yield ranged between 503 and 820 kg ha^{-1} in interaction (Table 6). Coşkun (2014) reported oil yields ranging from 578 to 875 kg ha^{-1}, while Koç (2019) recorded values between 820 and 1100 kg ha^{-1}. Atan et al., (2019) reported a range of 723 to 1012 kg ha^{-1}, and Sayılır et al., (2019) noted values between 492 and 873 kg ha^{-1}. Arslan and Culpan (2020) stated that oil yield ranged between 334 and 558 kg ha^{-1}, and Köse et al., (2021) found values between 273 and 599 kg ha^{-1}. Our findings were lower than those of Koç (2019) and Atan et al., (2019) but higher than those reported by Köse et al., (2021) and Arslan and Culpan (2020). However, our results closely aligned with the findings of Sayılır et al., (2019).

Table 5. Average values of thousand-seed weight, seed yield, and oil content for safflower cultivars

Cultivars	Thousand-seed weight (g)			Seed yield (kg ha^{-1})			Oil content (%)		
	2016	2017	Mean	2016	2017	Mean	2016	2017	Mean
Balcı	42.4 ab	34.5 d	38.4 ab	2407	2314	2360	34.0	32.7	33.4 b
Dinçer 5-18-1	41.7 b	34.4 d	38.0 b	2536	2069	2303	26.7	26.6	26.6 d
Linas	44.3 a	33.4 de	38.8 ab	2227	1803	2015	34.0	33.3	33.6 b
Olas	44.3 a	34.8 d	39.6 a	2222	1850	2036	34.9	34.3	34.6 a
Remzibey-05	38.2 c	31.4 e	34.8 c	2422	1783	2103	28.9	28.2	28.5 c
Mean	42.2 a	33.7 b	37.9	2363	1964	2163	31.7	31.0	31.4
CV (%)		3.2			15.9			1.19	
LSD cultivar		1.46**			ns				
LSD year		2.79**			ns			ns	
LSD interaction		2.06*			ns			ns	

ns: none significant, *: significant at 0.05 level, **: significant at 0.01 level

Table 6. Average values of oil yield for safflower cultivars

Cultivars	Oil yield (kg ha^{-1})		
	2016	2017	Mean
Balcı	820	757	789
Dinçer 5-18-1	677	551	614
Linas	755	600	678
Olas	774	635	705
Remzibey-05	698	503	601
Mean	745	609	677
CV (%)		16.3	
LSD cultivar		ns	
LSD year		ns	
LSD interaction		ns	

ns: none significant

4. Conclusion

In conclusion, based on the two years of this study, the cultivar Olas exhibited good performance in terms of plant height (119.0 cm), head diameter (2.22 cm), thousand-seed weight (39.6 g), and oil rate (34.6%). Similarly, the Balcı cultivar exhibited high values in seed yield (2360 kg ha^{-1}), oil yield (789 kg ha^{-1}), thousand-seed weight (38.4 g), and head diameter (2.19 cm) under Diyarbakır conditions. For this reason, the Balcı cultivar seems to be the most suitable choice for cultivation under the specific conditions of Diyarbakır and in delayed winter safflower sowings.

Conflict of Interest Declaration

The author of the article declares that he has no conflict of interest.

Researchers' Contribution

The author declares that he has contributed 100% to the article.

References

Adalı M., Öztürk Ö. Determination of yield and some yield components of safflower of Konya Conditions. Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences 2016; 3(2): 233–237.

Akgün M., Söylemez E. Determining the future trends of safflower plant in Türkiye. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences, 2022; 6(1): 50-57.

Anonymous. Agricultural values measurement experiments technical instructions, 2002.

Anonymous. Turkish State Meteorological Service: Meteorological Data Information Sales and Presentation System, 2019.

Anonymous. Turkish Statistical Institute. 2023a; Agriculture/Crop Production Statistics. Source: [https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr]. (Access Date: 13.6.2024).

Anonymous. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2023b; Source: [https://www.fao.org/faostat/en/?#data/QCL/visualize]. (Access date: 27.02.2025).

Arslan B., Çakır H., Culpan E. Yeni geliştirilen aspir (*Carthamus tinctorius* L.) çeşitlerinin bazı özellikleri bakımından karşılaştırılması. 2. Uluslararasi 19 Mayıs Yenilikçi Bilimsel Yaklaşimlar Kongresi, Uygulamalı Bilimler 2019; 113-121.

Arslan B., Culpan E. Melezleme ile geliştirilmiş bazı aspir (*Carthamus tinctorius* L.) genotiplerinin tarımsal ve teknolojik özelliklerinin belirlenmesi. Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences 2020; 30(4): 742-750.

Aslan D., Sirat A. Gümüşhane (Kelkit) koşullarında bazı aspir (*Carthamus tinctorius* L.) çeşitlerinin verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. Akademik Ziraat Dergisi 2022; 11(2): 263-276.

Aslantaş Ş., Akınerdem F. Effects of different sowing dates on yield, yield component and quality of some winter safflower cultivars. Journal of Bahri Dagdas Crop Research 2020; 9(1): 21-28.

Atan M., Şahin CB., İşler N. Determination of yield, yield components and oil content of different safflower varieties grown under Hatay conditions. KSU J. Agric Nat 2019; 22(5): 678-684.

Babaoglu M., Guzel M. Safflower (*Carthamus tinctorius L.)* breeding activities at Trakya Agricultural Research Institute. Ekin J Crop Breed and Gen 2015; 1(1): 20-25.

Coşkun Y. Winter and summer sowing facilities of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences 2014; 1(4): 462-468.

Çamaş N., Esendal E. Estimates of broad sense heritability for seed yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Hereditas 2006: 143: 55-57.

Dinçel NGK. Yağ bitkileri içinde kıymetli bir alternatif; Aspir (*Carthamus tinctorius* L.). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2024; 11(1): 195-203.

Eryılmaz T., Cesur C., Yesilyurt MM., Aydın E. Safflower (*Carthamus tinctorius l.*). remzibey-05 seed oil methyl ester: fuel Properties for Potential Diesel Engine Application. Turkish Journal of Agricultural and Natural Science 2014; 1(1): 85-90.

Duru S. The current status of Türkiye vegetable oil foreign trade and analysis of the competitiveness. Customs Trade Journal 2024; 11(35): 25-39.

Eryılmaz T., Cesur C., Yesilyurt MM., Aydın E. Safflower (*Carthamus tinctorius L.*). Remzibey-05 seed oil methyl ester: Fuel properties for potential diesel engine application. Turkish Journal of Agricultural and Natural Science 2014; 1(1): 85-90.

Ghorbanzadeh N., Rassam M., Dadkhah AR. Evaluation of yield and seed fatty acid compositions of safflower (*carthamus tinctorius* l.) cultivars in Shirvan region. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plant 2014; 39(3): 382-390.

Gürsoy M,, Başalma D., Nofouzi F. Effects of safflower cultivars (*Carthamus tinctorius* L.) on yield and yield components of different row and row spaces. Selcuk Journal of Agriculture and Food Science 2018; 32(1): 20-28.

Hatipoglu H., Arslan H., Karakus M., Köse A. Determination suitable sowing time of different safflower (C*arthamus tinctorius l.)* cultivars on Sanliurfa conditions. Journal of Agricultural Faculty of Uludag University2012; 26(1): 1-16.

Hatipoğlu H., Nacar AS., Abrak S., Saraçoğlu M., Arslan H. Safflower Studies Specially in Şanlıurfa. Selcuk Journal of Agriculture and Food Science 2017; 31(2): 44–53.

Huth PJ., Fulgoni VL., Larson BT. A systematic review of high-oleic vegetable oilsubstitutions for other fats and oils on cardiovascular disease risk factors:implications for novel high-oleic soybean oils. Adv Nutr. 2015; 6(6): 674-693.

Kahraman Ş., Karaaslan D., Hatipoğlu A. Determination of suitable sowing date of safflower in Diyarbakır conditions. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences 2025; 9(1): 27-33.

Katar D., Arslan Y., Kodas R., Subası I., Mutlu H. Determination of effect of different doses of boron on the yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Journal of Tekirdag Agricultural Faculty 2014; 11(2): 71-79.

Kayacetin F., Katar D., Arslan Y. Flower structure and biology of fertilization of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Field Crops 2012; 21(2): 75-80.

Knowles PF. Safflower. In: Röbbelen G, Downey RK., Ashri A (Editors)–Oilcrops ofthe world: their breeding and utilization. New York: McGraw Hill 1989; pp. 363–374.

Koç H., Güne A., Aydoğa S. Safflower breeding activities in Bahri Dagdas International Agricultural Research Institute. Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences 2017; 31(3): 58–61.

Koç H. Aspir (*Carthamus tinctorius* L.) çeşitlerinin farklı yağış koşullarında verim ve yağ oranı bakımından değerlendirilmesi. Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences 2019; 6(3): 518-526.

Köse A., Koşar F., Bilir Ö. Agricultural performances of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.) lines developed by single plant selection method. Journal of Agricultural Sciences 2018; 1-11.

Köse A., Çelikoğlu Koşar F., Bilir Ö. Mutasyon ıslahı ile geliştirilmiş bazı aspir (*Carthamus tinctorius* L.) hatlarının tarımsal performansları. Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences 2021; 8(2): 262-273.

Oz M. Sowing time. Variety and yield relationship in safflower. Isparta University of Applied Sciences, Journal of Agriculture Faculty, 2016; 11 (1):71-81.

Ozek K. Feed value of safflower and the possibilities of using in farm animal nutrition: I. the using and effects in poultry nutrition. Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology 2016;6(4): 171-180.

Sayılır C., Çınar VM., Ünay A. Determination of yield and yield components in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under Menemen-Izmir ecological conditions. Journal of Aegean Agricultural Research Institute Journal of Agriculture Faculty 2019; 29(1): 71-75.

Shivani D., Sreelakshmi CH., Kumar CVS. Genetic divergence studies in safflower (*Carthamus tinctorius L.*). Electronic Journal of Plant Breeding 2010; 1(5): 1354-1357.

Steel RGD., Torrie JH. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. 2nd edition. McGraw-Hill, New York, USA, 1980; pp. 20-90.

Subaşı İ., Arslan Y., Yasar M. Aspir (*Carthamus tinctorus* L.) and its nutraceutic potential.In book; Strategic Sector: Agriculture-2, Editor: M.Yasar, A.Akkaya, ISBN: 978-625-6404-81-6, Iksad Publications March, 2023.

Tahernezhad Z., Saba J., Zeinalabedini M., Pourdad SS., Ghaffari MR. Estimation of broad-sense heritability and variance components for seed yield and agronomic traits in native and exotic safflower (C*arthamus tinctorius* l.) genotypes. Bangladesh Journal of Botany 2018; 47(3): 501-508.

Yasar M., Sezgin M. Investigation of yield and yield components of rapeseed (*Brassica napus ssp. oleifera* L.) genotypes in Trakya Region conditions. Revista de Investigaciones Universidad del Quindío 2022; 34(S5): 203-216.

Yasar M., Sezgin M. Evaluation of yield performance of some safflower varieties in different environments. 5 th International Cukurova Agriculture and Veterinary Congress 21-23 July 2023, p:976-983, Adana/Türkiye.

Yazdani AA., Saffari M., Ranjbar G. Effect of application of treated wastewater on seed yield and heavy metals content of safflower cultivars. Journal Agriculture Sciences Technology 2019; 21(5): 1277-1286.

Zarei G., Shamsi H., Fazeli F. Effect of planting density on yield and yield components of safflower cultivars in spring. International Scholarly and Scientific Research & Innovation 2011; 5(12): 118-120.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2263-2276, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2263-2276, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Farklı Katılım Oranları ve En Boy Oranları ile Çimento Kaplanmış Tekstil Atığı (CCTW) Kullanılarak Karayolu Alt Taban Zemini Mukavemetinin Artırılması

Yakup ÖNAL[1*], Mitat ÖZTÜRK[2]

[1,2]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-4975-9897
[2]https://orcid.org/0000-0003-4685-7088
*Sorumlu yazar: yakuponal@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 08.02.2025
Kabul tarihi:15.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
CBR testi
Tekstil atığı
Zemin iyileştirme
Atık yönetimi

ÖZ

Zemin stabilizasyonu, özellikle zayıf zeminlerin taşıma kapasitesini artırmada, geoteknik ve ulaştırma mühendisliğinin kritik bir yönüdür. Geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak yapılan sürdürülebilir güçlendirme yöntemleri, ekonomik ve çevresel faydaları nedeniyle ilgi görmektedir. Bu çalışma, çimento kaplı tekstil atıklarının (CCTW) Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testi aracılığıyla kötü derecelenmiş kumun dayanımını artırmadaki etkinliğini araştırmaktadır. Çalışmanın temel amacı, CCTW'nin farklı en/boy oranlarında (AR1, AR2, AR4) ve katılım oranlarında (kuru ağırlıkça %2, %4 ve %6) zemin dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmektir. CCTW, tekstil atıklarının Portland çimento hamuru ile kaplanıp 28 gün kürlenmesi ve ardından belirlenen oranlarda zemin ile karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Sonuçlar, tüm güçlendirilmiş numunelerin CBR değerlerinde, güçlendirilmemiş zemine kıyasla önemli bir artış olduğunu göstermektedir. En iyi iyileşme, AR2 ve AR4 liflerinin en yüksek güçlendirme etkisini sağladığı %4 katılım oranında gözlemlenmiş olup, CBR değerleri sırasıyla %6.97 ve %6.87'ye ulaşmıştır. Ancak %4'ün üzerindeki aşırı katılım oranı, zemin performansında düşüşe yol açmıştır. İyileştirme faktörü analizi de güçlendirmenin etkinliğini doğrulamış olup, AR4-%4 ve AR2-%4 en yüksek kazançları sağlamıştır. Bu çalışma, CCTW'nin çevre dostu bir zemin stabilizatörü olarak potansiyelini vurgulayarak sürdürülebilir atık yönetimi ve maliyet etkin mühendislik çözümlerine katkı sağlamaktadır. Bulgular, maksimum zemin güçlendirme faydalarını sağlamak için optimal lif dozajının ve geometrik özelliklerin kritik öneme sahip olduğunu göstererek önemli çevresel, ekonomik ve mühendislik avantajları sunmaktadır.

Enhancement of Highway Subgrade Soil Strength Using Cement-Coated Textile Waste (CCTW) with Varying Inclusion Rates and Aspect Ratios

Research Article

Article History:
Received: 08.02.2025
Accepted: 15.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
CBR test
Textile waste
Soil improvement
Waste management

ABSTRACT

Soil stabilization is a critical aspect of geotechnical and transportation engineering, particularly in enhancing the load-bearing capacity of weak subgrade soils. Sustainable reinforcement methods using recycled materials have gained attention due to their economic and environmental benefits. This study investigates the effectiveness of cement-coated textile waste (CCTW) in improving the strength of poorly graded sand via California Bearing Ratio (CBR) testing. The main objective of this study is to evaluate the impact of incorporating CCTW at varying aspect ratios (AR1, AR2, AR4) and inclusion rates (2%, 4%, and 6% by dry weight) on soil strength. CCTW was prepared by coating textile waste with Portland cement paste, curing for 28 days, and then mixing with the soil at designated ratios. The results indicate a significant

enhancement in the CBR values of all reinforced specimens compared to unreinforced soil. The optimal improvement was observed at a 4% inclusion rate, where AR2 and AR4 fibers provided the highest reinforcement effect, with CBR values reaching up to 6.97% and 6.87%, respectively. However, beyond 4%, excessive inclusion rate led to a decline in soil performance. The improvement factor analysis further confirmed the efficiency of reinforcement, with AR4-4% and AR2-4% yielding the highest gains. This study highlights the potential of CCTW as an eco-friendly soil stabilizer, promoting sustainable waste management and cost-effective engineering solutions. The findings suggest that optimal fiber dosage and geometric properties are crucial in maximizing soil reinforcement benefits, offering significant environmental, economic, and engineering advantages.

To Cite: Önal Y., Öztürk M. Enhancement of Highway Subgrade Soil Strength Using Cement-Coated Textile Waste (CCTW) with Varying Inclusion Rates and Aspect Ratios. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2263-2276.

1. Introduction

Textile and apparel products are fundamental necessities for humans, with the global textile industry playing a crucial role in ensuring consumer comfort since its inception. However, due to the accelerated expansion and transformation of fashion trends over the past century, the rates of textile manufacturing and waste accumulation have significantly escalated (Uddin, 2019; Ruuth et al., 2022). The waste generated throughout the energy-intensive manufacturing processes of new garments primarily consists of fibrous residues and discharged chemical compounds. These solid fibrous materials comprise a mixture of natural and synthetic polymer-based substances, including cotton, polypropylene, nylon, polyester, and various others (Rahman et al., 2022). The escalating environmental challenges arising from the excessive accumulation of non-biodegradable textile waste, coupled with the diminishing availability of landfill space, have necessitated a shift toward sustainable practices within the textile and fashion industries. In response, these sectors are increasingly adopting and implementing eco-conscious strategies at every stage of a product's lifecycle, including raw material selection, manufacturing processes, consumer usage, and end-of-life disposal (Haawley, 2009). These efforts aim to mitigate environmental impact, promote circular economy principles, and enhance resource efficiency in the long run.

The improper disposal of hazardous textile waste into municipal landfills is primarily driven by economic constraints and a general lack of public awareness regarding its detrimental environmental consequences. This uncontrolled accumulation of textile waste poses significant sustainability challenges, necessitating developing and implementing innovative solutions that integrate environmental responsibility, economic feasibility, and material performance optimization. Sustainable strategies must be explored across various sectors to mitigate the negative impact of excessive waste generation from the rapidly expanding textile industry.

In the field of civil engineering, particularly within the domains of transportation and geotechnical engineering, various soil and pavement improvement techniques have been widely adopted to enhance the performance and durability of infrastructure systems. Among these techniques, the incorporation of materials such as geosynthetics (Kaplan et al., 2022; Kayadelen et al., 2023; Önal et al., 2023; Öztürk

et al., 2023; Öztürk et al., 2024; Öztürk, 2024), fibers (Serin et al., 2023a), as well as recycled and industrial waste products (Bora et al., 2022; Önal et al., 2022; Serin et al., 2023b; Öztürk, 2024), has proven effective in addressing critical challenges. These methods are commonly employed to improve the structural stability and crack resistance of asphalt concrete layers, as well as to enhance the static and cyclic behavior of subgrade, subbase, and base layers used in highway construction. Furthermore, such reinforcement strategies contribute to the improvement of shear strength, bearing capacity, and overall mechanical properties of different soil types, offering sustainable and cost-efficient solutions for modern infrastructure development.

In geotechnical engineering, textile waste has shown potential for diverse applications that contribute to both waste reduction and infrastructure enhancement. Notable utilization areas include improving the strength and load-bearing capacity of subgrade soils (Abbaspour et al., 2019; Fareghian et al., 2023), stabilizing rammed earth structures and engineered slopes (Abbaspour et al., 2019; Zare et al., 2020; Nouri et al., 2023), and enhancing the physical and mechanical properties of engineered backfill materials (Rahman et al., 2022). By repurposing textile waste in these applications, it is possible to reduce environmental pollution, lower raw material consumption, and promote circular economic principles within the construction and engineering industries.

Numerous studies in the literature investigate the impact of incorporating waste materials on the California Bearing Ratio (CBR) values and shear characteristics of soils exploring the potential benefits of various waste by-products for soil stabilization and strength enhancement (Miraftab and Lickfold, 2008; Abbaspour et al., 2019; Habibi et al., 2021; Önal et al., 2022). Habibi et al. (2022) have demonstrated the effectiveness of waste tire textile fibres (WTTFs) and lime in enhancing the mechanical properties of low-plasticity clays. Experimental results indicated that the inclusion of 1.5% WTTFs improves soil strength parameters, while lime stabilization enhances cohesion and internal friction angle. The combined addition of 1.5% fibres and 6% lime significantly increased unconfined compressive strength (UCS) by up to 10.66 times and California bearing ratio (CBR) by more than 100%. Furthermore, fibre reinforcement mitigated the brittleness induced by lime treatment, improving soil ductility and durability. These findings highlight the potential of WTTFs and lime as an effective soil stabilization technique for geotechnical applications. Abbaspour et al. (2019) have investigated the reuse of WTTFs as a soil reinforcement material through a series of laboratory tests, including compaction, direct shear, UCS, CBR, and split tensile strength (STS) tests. Experimental results indicated that WTTFs effectively enhance the strength and ductility of sandy soils, while in clayey soils, they primarily improve ductility and tensile strength despite reductions in UCS and CBR. The distinct behavior of WTTFs in different soil types has been further analyzed using an optical microscope. These findings suggest that rather than being discarded, WTTFs can be effectively repurposed to enhance the mechanical properties of various soils, offering a sustainable solution for soil stabilization. Ghiassian et al. (2004) were investigated the reuse of fibrous carpet waste as a sustainable material for soil reinforcement through drained triaxial tests on compacted silty sand specimens. Key parameters,

including the aspect ratio and weight percentage of fibrous strips, were examined to assess their influence on shear strength. The findings demonstrate that fibrous inclusions derived from carpet waste significantly enhance the shear strength of silty sands. Furthermore, a predictive model accurately simulated the effects of strip content, aspect ratio, and confining pressure on reinforced sand, highlighting the potential of carpet waste fibres in geotechnical applications. In their study, Miraftab and Lickfold (2008) investigated incorporating carpet fibrous waste into clayey and substandard soils to improve their mechanical properties by conducting triaxial compression tests. They concluded that up to 10% fibre inclusion enhances internal cohesion, shear strength, compressive strength, and load-bearing capacity, with soil moisture content playing a crucial role in optimizing these improvements.

Numerous studies in literature have investigated the treatment of soil reinforcement materials with cement to enhance their load-bearing performance (Ouria and Mahmoudi, 2018; Öztürk et al., 2023; Öztürk et al., 2024). In their study, Öztürk et al. (2023) conducted an experimental study to investigate using cement-coated geotextile as soil reinforcement material via CBR tests. They also utilized conventional geotextile to compare the performance of cement-coated geotextile on the CBR values. The inclusion of geotextile and cement-coated geotextile as reinforcement in sand soil resulted in CBR enhancements of 1.68 and 3.25 times, respectively. While the geotextile-reinforced base material exhibited a 4% reduction in CBR, the cement-coated geotextile reinforcement led to a significant 59% increase in CBR performance. Ouria and Mahmoudi (2018) investigated both experimental and numerical analyses of cement treatment at the geotextile-sand interface and its impact on the bearing capacity of foundations on reinforced sand. Laboratory findings revealed that cement treatment enhances bearing capacity by 6%–17%, depending on the reinforcement length.

In this study, the influence of cement-coated textile waste (CCTW) on improving the strength of poorly graded sand is evaluated through California Bearing Ratio (CBR) testing. To analyze the effects of aspect ratios and inclusion rates of CCTWs on load-bearing capacity, a total of ten CBR tests were performed. The results of this study underscore the potential of CCTW as an effective and sustainable reinforcement material for use in geotechnical engineering applications.

2. Materials and Method

2.1. Sand Soil

The soil used in this study is classified as SP (poorly graded sand) according to the Unified Soil Classification System (USCS), as described in ASTM D2487 (2006). A poorly graded sand, selected intentionally to represent a conservative soil condition that is often encountered in arid and semi-arid regions. This type of soil is characterized by low cohesion and high permeability, which can lead to reduced load-bearing capacity and increased deformation under loading. These properties make it particularly suitable for evaluating the effectiveness of soil reinforcement techniques. Additionally, the uniformity of particle size distribution in poorly graded sand allows for more controlled and repeatable testing conditions, thereby enhancing the reliability of the comparative analysis between reinforced and

unreinforced samples. The sand samples were prepared under controlled laboratory conditions to ensure homogeneity. The samples were air-dried and sieved through a series of standard sieves to obtain the required grain size distribution as specified in ASTM D6913 (2006). The grain size distribution of the sand was determined through sieve analysis. The resulting data were plotted to produce the grain size distribution curve, as shown in **Figure 1**. Basic physical properties of the sand, such as the specific gravity, maximum and minimum dry densities respectively were measured and recorded in **Table 1**.

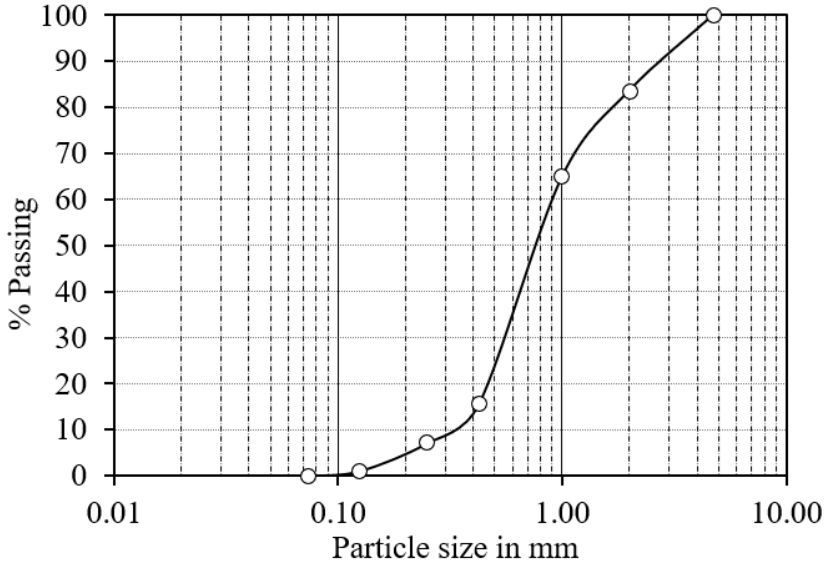


Figure 1. The soil's particle size distribution curve

Table 1. Main properties of the soil

Properties	Value
Specific gravity	2.73
D_{10} (mm)	0.35
D_{30} (mm)	0.55
D_{60} (mm)	0.90
Coefficient of uniformity, C_u	2.57
Coefficient of curvature, C_c	0.96
Minimum dry density (kN/m^3)	15.24
Maximum dry density (kN/m^3)	17.69
Maximum void ratio, e_{max}	0.757
Minimum void ratio, e_{min}	0.514

2.1. Cement-Coated Textile Waste

The waste textiles used in this study were sourced from a local tailor shop and primarily consisted of cotton and polyester blends, which are typical of off-cuts and remnants generated during garment manufacturing. These textiles were clean and free of contaminants, such as adhesives or finishes, which could interfere with the cement coating or soil interaction.

The waste textiles were cut into three different dimensions to achieve varying aspect ratios: 12 × 12 mm (Aspect Ratio 1; AR1), 12 × 24 mm (Aspect Ratio 2; AR2), and 6 × 24 mm (Aspect Ratio 4; AR4). These dimensions were selected to explore the influence of aspect ratio on reinforcement efficiency guided by findings from previous studies (Pinho-Loopes, 2022). The textiles were coated with Portland

cement paste prepared with a water-to-cement ratio of 0.5. Prior to coating, the textile pieces were lightly moistened to enhance adhesion with the cement matrix. The coated textiles were allowed to dry under laboratory conditions for 1 day to ensure initial cement setting. The dried, coated textiles were then submerged in a standard curing tank and left to cure for 28 days to achieve proper cement hydration. At the end of the curing process, the cement-coated textile waste (CCTW) was ready for incorporation into the sand matrix for further testing. The final thickness of the CCTW after curing was approximately 2.5 mm, and their surface exhibited a rough, textured finish due to the cement layer, which may enhance mechanical interlocking with surrounding soil particles. The prepared CCTW are illustrated in Figure 2.

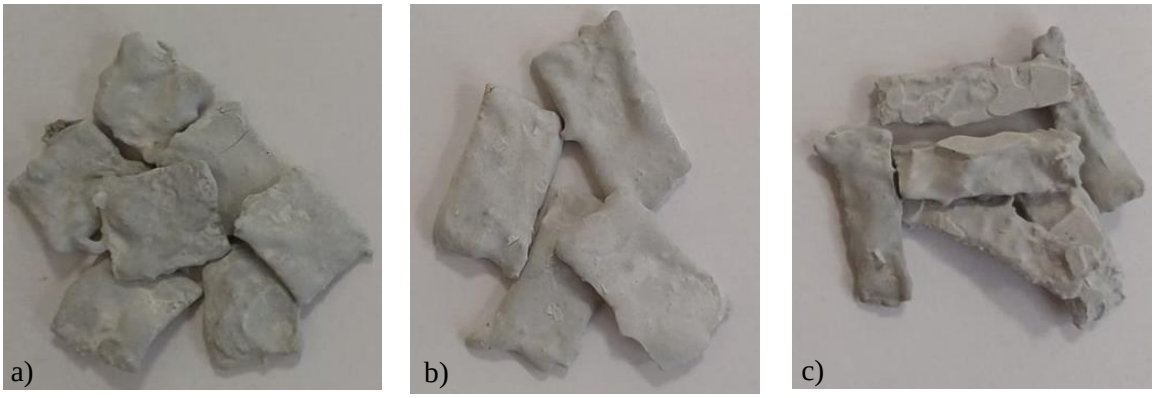


Figure 2. Cement coated waste textiles a) AR1 b) AR2 c) AR4

CBR tests were conducted on a dense sand subgrade material, which was prepared at a relative density of 90% to represent field compaction conditions typically encountered in practice. This density level was achieved through a standardized compaction procedure to ensure uniformity and repeatability across all samples. To compare the effects of reinforcement, an unreinforced California Bearing Ratio (CBR) test was initially conducted as a control. For the reinforced tests, the soil reinforcement was applied only to the upper H/3 depth of the CBR mold. The CBR test setup is illustrated in Figure 3 to provide visual confirmation of the experimental configuration and procedures. CCTW were incorporated into the soil at varying percentages of 2%, 4%, and 6% by weight. All tests were conducted in accordance with ASTM D1883 (2016) to ensure consistency and reliability of the results. For comparison purposes, the unreinforced soil was labeled as UR, while the soil reinforced with Aspect Ratio 1 (AR1) textiles at a 2% inclusion ratio was labeled as AR1-2%.



Figure 3. CBR test setup

3. Results and Discussion

Figure 4 illustrates the load-displacement behavior of both unreinforced and cement-coated textile waste (CCTW)-reinforced CBR specimens under the same waste inclusion rates. The results clearly demonstrate a substantial improvement in the load-bearing capacity of reinforced soils compared to unreinforced specimen, regardless of the variation in waste content. This improvement highlights the potential of CCTW as an effective soil stabilizer, provided that the appropriate waste type and dosage are selected. Reinforced soils exhibit similar behavior in terms of load-displacement behavior. According to Figure 4a, the trends of the reinforced soils are almost identical. The better load-displacement behavior of the reinforced soil is due to the stress distribution of the CCTW to the underlying soil and the compaction and strengthening of the underlying soil. Compared to the unreinforced soil, the reinforced soil suffered a sudden loss of load bearing capacity after about 6 mm of deformation. This is due to the failure of the compressed soil under CCTW. Additionally, although CBR values are conventionally determined at 2.5 mm and 5.0 mm penetrations, in this study, the tests were extended to a penetration depth of 8.0 mm. This extension was intended to observe the post-peak behavior of the reinforced and unreinforced samples. It also enabled a better comparison of the residual strength performance beyond the conventional limits, thereby offering deeper insights into the deformation resistance of each configuration.

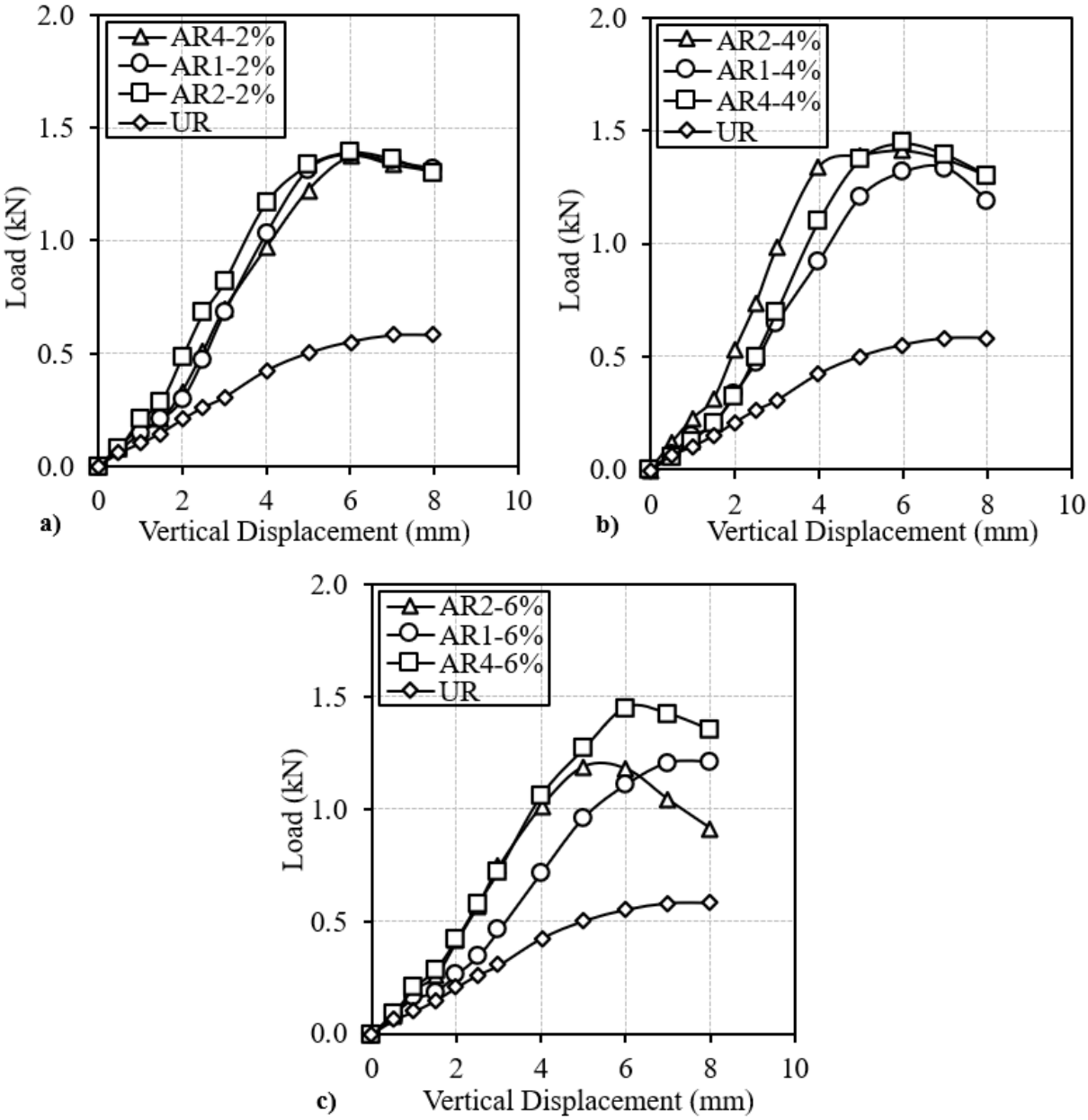


Figure 4. Load-displacement curves of UR and CCTW-reinforced CBR specimens at a) 2% b) 4% c) 6% waste rate

Figure 5 illustrates the load-displacement behavior of both unreinforced and CCTW-reinforced CBR specimens under varying waste inclusion rates. From Figure 5a and Figure 5b, it can be inferred that the inclusion of CCTW at 2% and 4% waste rates for AR1 and AR2 resulted in similar load-displacement behavior. However, it can be said that the inclusion of CCTW at a 6% waste rate led to a deterioration in load-displacement performance. In contrast, Figure 2c shows that varying the waste rate for AR4 had less impact on the load-displacement behavior compared to AR1 and AR2, with similar load-displacement behavior observed.

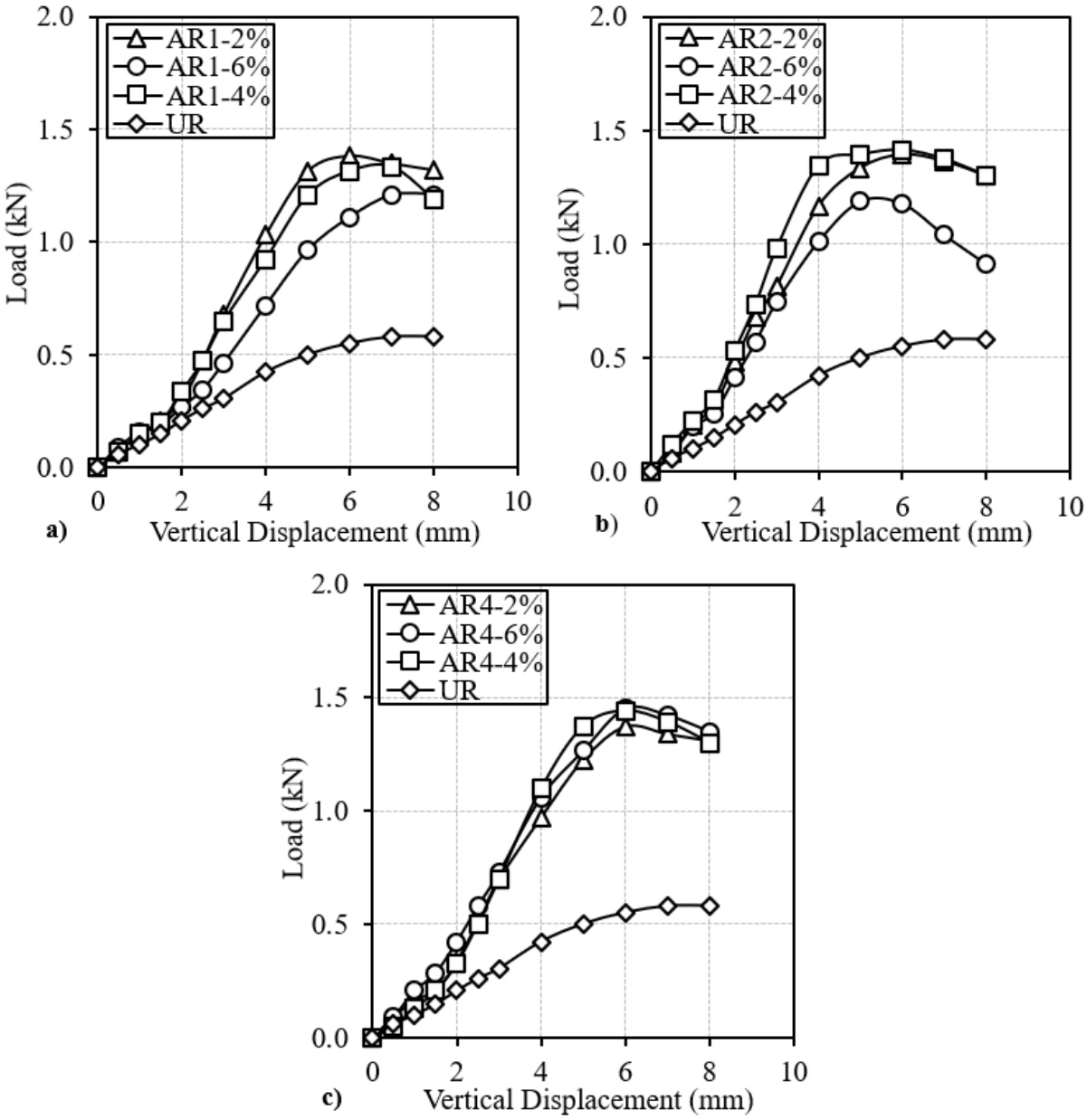


Figure 5. Load-displacement curves of UR and CCTW-reinforced a) AR1 b) AR2 c) AR-4 CBR specimens

Figure 6 presents the corresponding changes in CBR values. When AR2 was incorporated at a 2% waste rate, the CBR value was measured at 6.67%, demonstrating an initial improvement in load-bearing capacity compared to unreinforced soil, which had a CBR value of 2.50%. As the waste rate increased to 4%, a further enhancement in soil strength was observed, with the CBR value reaching its peak at 6.97%. This suggests that at moderate fiber inclusion levels, AR2 fibers effectively contribute to soil stabilization by improving inter-particle bonding and increasing resistance to deformation under loading conditions. However, beyond the 4% waste content, the reinforcing efficiency of AR2 fibers exhibited a declining trend. At a 6% waste rate, the CBR value decreased to 5.94%, indicating that excessive fiber content may negatively affect soil performance. A similar behavior was obtained when AR4 was used as fiber. When AR1 fibers were used as reinforcement, the highest CBR value was recorded as 6.57% at a waste inclusion rate of 2%, indicating an initial improvement in the soil's load-bearing capacity.

However, as the waste rate increased to 4%, a decline in CBR performance was observed, with the value decreasing to 6.03%. This downward trend became more pronounced at a 6% waste rate, where the CBR value further dropped to 4.81%.

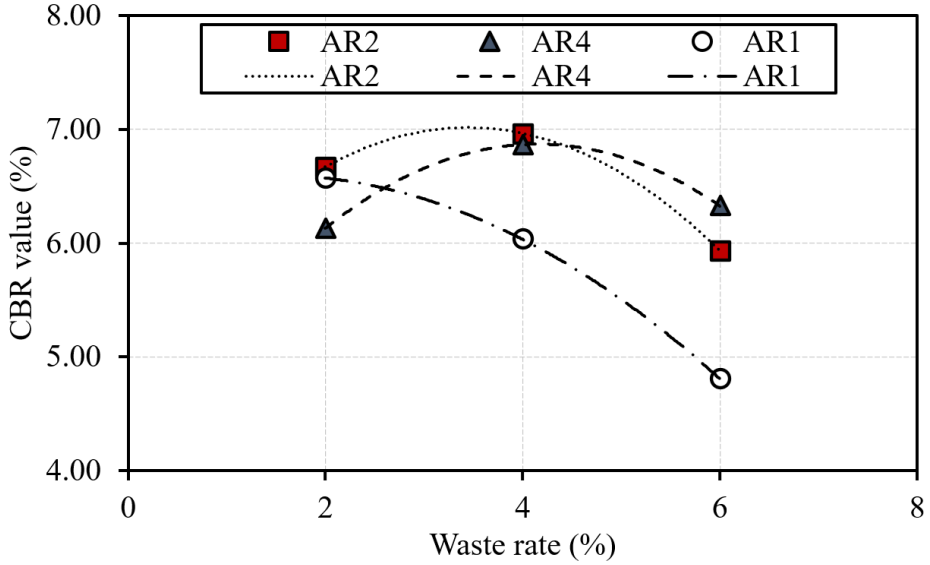


Figure 6. CBR values for all waste types with varying waste rates

At a waste rate of 2%, the highest CBR value was recorded as 6.67% when AR2 was used, indicating its superior reinforcing capability at this specific dosage. A similar result was obtained with AR1, where the CBR value was measured as 6.57%. However, when AR4 was employed at the same waste content, a reduction in CBR performance was observed, with the value dropping to 6.13%. This suggests that the effectiveness of reinforcement is highly dependent on the aspect ratio and fiber distribution within the soil matrix. Fibers with certain geometrical properties may contribute more effectively to interlocking mechanisms and load transfer, while others may create discontinuities or excessive voids, leading to performance reductions. At a waste rate of 4%, the trend remained consistent, with AR2 yielding the highest CBR value of 6.97%. Interestingly, AR4, which had shown a lower CBR at the 4% waste rate, exhibited a significant increase in effectiveness at this higher waste inclusion rate, achieving a CBR value of 6.87%. In contrast, AR1 demonstrated the lowest CBR value of 6.03% at this waste content. These variations indicate that an optimal balance between fiber dosage and geometric characteristics is crucial to maximizing soil reinforcement benefits. The improved performance of AR4 at 4% suggests that, while it may be less effective at lower dosages, its reinforcing ability becomes more pronounced as the fiber content increases, possibly due to enhanced inter-fiber bonding and particle confinement. At the highest waste rate of 6%, the results exhibited a different trend. The maximum CBR value was observed when AR4 was used, reaching 6.33%, followed by AR2, which provided a slightly lower CBR of 5.94%. However, a substantial reduction in reinforcement efficiency was noted when AR1 was used, with the lowest CBR value dropping to 4.81%. This finding suggests that beyond a certain threshold, excessive waste inclusion may lead to diminishing returns, possibly due to fiber clustering, increased void formation, or inadequate particle interlock. Such effects could compromise the overall integrity of

the soil structure, reducing its capacity to sustain higher loads. The reduction in CBR with increasing fiber content suggests that while AR1 fibers provide reinforcement at lower inclusion rates, excessive fiber addition may lead to adverse effects on soil performance.

Figure 7 illustrates the improvement factor in CBR values for different reinforcement types and percentages. Improvement factor can be expressed as the CBR value of reinforced soil to that of the unreinforced soil. All reinforcement types significantly enhance the CBR value, with improvement factors consistently exceeding 1.5. The highest improvement factors are observed for AR4-4% and AR2-4%, both exceeding 2.5. AR1-6% shows the lowest improvement factor among the tested configurations, yet it remains above 1.5. A general trend suggests that reinforcement at 4% concentration AR4, AR2, and AR1 yields a higher CBR enhancement compared to 2% or 6% concentrations. The variation in improvement factors of all reinforcement types suggests that these reinforcements play a role in CBR enhancement.

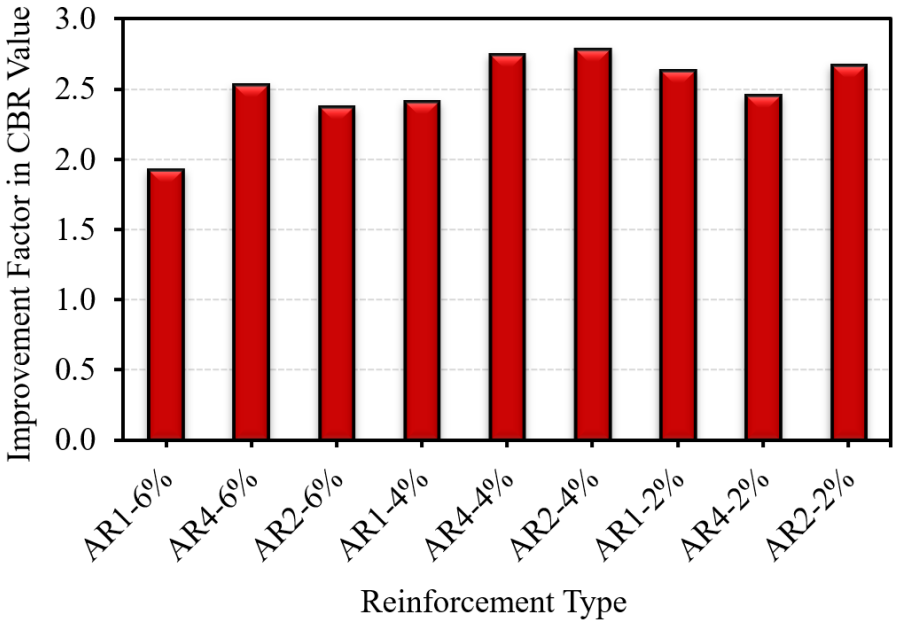


Figure 7. Improvement Factor in CBR Value for all waste types with varying waste rates

4. Limitations and Recommendations

This study was limited to experimental evaluations using California Bearing Ratio (CBR) tests conducted on dry, non-cohesive, poorly graded sand. Due to the cohesionless nature of the soil, unconfined compressive strength (UCS) testing was not applicable, as the specimens could not maintain their shape without confinement. Therefore, UCS tests were not included in this study. Additionally, the tests were performed under dry conditions, and the influence of moisture content and the associated compaction characteristics (e.g., dry density vs. water content relationship) were not investigated. These factors may significantly influence the mechanical performance of soil-reinforcement mixtures and should be explored in future research.

Furthermore, the anisotropic nature of CCTW-reinforced soils, especially due to varying aspect ratios, was not examined in this study. Anisotropy effects are expected to influence the mechanical response of the reinforced soil and warrant separate experimental analysis in future studies.

To broaden the understanding of CCTW's reinforcing potential, it is recommended that future work investigate the behavior of CCTW in cohesive soils such as clays, where UCS testing is applicable, and explore the impact of different moisture contents on compaction and strength behavior.

4. Conclusions

This study examines the effectiveness of cement-coated textile waste (CCTW) in enhancing the mechanical properties of poorly graded sand, with a particular focus on its influence on strength improvement. The evaluation was carried out using California Bearing Ratio (CBR) tests to quantify the impact of CCTW inclusion. Additionally, to better understand how different aspect ratios and inclusion rates of CCTWs affect the load-bearing capacity of the sand, a series of ten CBR tests were systematically conducted. The findings aim to provide insights into the potential use of CCTW as a sustainable reinforcement material in geotechnical applications.

- The inclusion of CCTW significantly enhanced CBR values of unreinforced condition (2.50%), with the highest performance observed at a 4% waste content for AR2 (6.97%) and AR4 (6.87%), while AR1 achieved its peak value of 6.57% at a 2% waste content.
- At a 6% waste content, excessive fiber inclusion resulted in diminishing returns, leading to fiber clustering, increased void formation, and a decline in soil integrity, as evidenced by the reduction in CBR value for AR1 to 4.81%.
- The incorporation of CCTW has led to significant improvements in CBR values. When expressed as improvement factors, the maximum enhancements are observed to be 2.78 and 2.75 for AR2 and AR4, respectively, at a 4% waste inclusion rate, while AR1 at a 2% waste inclusion rate shows an improvement factor of 2.63.
- The improvement factor analysis confirmed that a moderate reinforcement level of 4% provides the most effective and stable soil performance.
- CCTW offers a sustainable, cost-effective, and environmentally friendly alternative for soil stabilization and waste management. This method supports circular economy initiatives by repurposing textile waste in geotechnical applications.
- Future studies should explore the long-term durability, large-scale field applications, and varying curing conditions to further validate CCTW's geotechnical performance.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Summary of Researchers' Contribution Rate Declaration

The authors declare that they have contributed equally to the article.

References

Abbaspour M., Aflaki E., Nejad FM. Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. Journal of Cleaner Production 2019; 207: 1059-1071.

ASTM D1883. Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM D2487. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

ASTM D6913. Standard test methods for particle-size distribution (Gradation) of soils using sieve analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

Bora NC., Kayadelen C., Altay G., Önal Y., Öztürk M. Comparative effectiveness research of palm tree pruning waste and geotextiles on subgrade stabilization. Građevinar 2022; 74(10): 829-839.

Fareghian M., Afrazi M., Fakhimi A. Soil reinforcement by waste tire textile fibers: small-scale experimental tests. Journal of Materials in Civil Engineering 2023; 35(2): 1-14.

Ghiassian H., Poorebrahim G., Gray DH. Soil reinforcement with recycled carpet wastes. Waste Management & Research 2004; 22(2): 108-114.

Habibi AA., Tafti MF., Narani S., Abbaspour M. Effects of waste tire textile fibres on geotechnical properties of compacted lime-stabilized low plastic clays. International Journal of Geotechnical Engineering 2021; 15(9): 1118-1134.

Hawley JM. Understanding and improving textile recycling: a systems perspective. In: Sustainable textiles. Woodhead Publishing 2009; 179-199.

Kaplan E., Kayadelen C., Öztürk M., Önal Y., Altay G. Experimental evaluation of the usability of palm tree pruning waste (PTPW) as an alternative to geotextile. Revista de la Construcción 2022; 21(1): 69-82.

Kayadelen C., Altay G., Önal Y., Öztürk M. Particle shape effect on interfacial properties between granular materials and geotextile. Geosynthetics International 2023; 31(3): 345-357.

Miraftab M., Lickfold A. Utilization of carpet waste in reinforcement of substandard soils. Journal of Industrial Textiles 2008; 38(2): 167-174.

Nouri H., Safehian M., Hosseini SMMM. Rammed earth structures reinforced by waste tire textile fibers as an attempt to reduce the environmental impacts. International Journal of Environmental Science and Technology 2023; 20(1): 437-450.

Önal Y., Öztürk M., Altay G., Kayadelen C. Comparison of the effect of geotextile and palm tree pruning waste on CBR value of sand soil. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(2): 570-579.

Önal Y., Çalışıcı M., Kayadelen C., Altay G. A comparative experimental study of geocell and geogrid-reinforced highway base layers under repeated loads. Road Materials and Pavement Design 2023; 24(12): 2877-2892.

Ouria A., Mahmoudi A. Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface. Geotextiles and Geomembranes 2018; 46(1): 29-39.

Öztürk M., Kayadelen C., Altay G., Önal Y. Investigation of load-displacement behavior of cement-coated geotextile reinforced sandy soils. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 12(4): 1232-1238.

Öztürk M. Effect of aperture size on the interface shear behavior of gridded cementitious geocomposite on sand soil with different relative densities. Construction and Building Materials 2024; 432: 136653.

Öztürk M. Strength characteristics of lightweight soil with waste modified expanded polystyrene particles. Construction and Building Materials 2024; 442: 137635.

Öztürk M., Altay G., Kayadelen C. Assessment of the utilization of cement-treated geotextile as a reinforcement element for highway base layer under cyclic loading. Transportation Geotechnics 2024; 48: 101333.

Pinho-Lopes M. Sand reinforced with recycled cotton textiles from waste blue-jeans: Stress–strain response. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering 2022; 8(5): 59.

Rahman SS., Siddiqua S., Cherian C. Sustainable applications of textile waste fiber in the construction and geotechnical industries: A retrospect. Cleaner Engineering and Technology 2022; 6: 100420.

Ruuth E., Sanchis-Sebastiá M., Larsson PT., Teleman A., Jiménez-Quero A., Delestig S., Sahlberg V., Salén P., Ortiz MS., Vadher S., Wallberg, O. Reclaiming the value of cotton waste textiles: A new improved method to recycle cotton waste textiles via acid hydrolysis. Recycling 2022; 7(4): 1-15.

Serin S., Önal Y., Emiroğlu M., Demir E. Comparison of the effect of basalt and glass fibers on the fracture energy of asphalt mixes using semi-circular bending test. Construction and Building Materials 2023a; 406: 133460.

Serin S., Önal Y., Kayadelen C., Morova N. Utilization of recyclable concrete and ceramic waste as filling material in hot mix asphalt. Periodica Polytechnica Civil Engineering 2023b; 67(3): 846-854.

Uddin F. Introductory chapter: Textile manufacturing processes. In: Textile manufacturing processes. IntechOpen 2019; ISBN 978-1-78985-106-109.

Zare P., Narani SS., Abbaspour M., Fahimifar A., Hosseini SMMM., Zare P. Experimental investigation of non-stabilized and cement-stabilized rammed earth reinforcement by waste tire textile fibers (WTTFs). Construction and Building Materials 2020; 260: 120432.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2277-2290, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2277-2290, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Elektrikli ve Konvansiyonel Otomobil Klimalarının Donanımsal Karşılaştırılması

Kenan SAKA[1], Abdulkadir AYANOGLU[2*]

[1]Bursa Uludağ Üniversitesi Yenişehir İbrahim Orhan MYO-Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Bursa
[2]Mardin Artuklu Üniversitesi MYO-Makine Bölümü, Mardin

[1]https://orcid.org/0000-0002-2296-894X
[2]https://orcid.org/0000-0001-5894-898
*Sorumlu yazar: ayanoglu@artuklu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 31.03.2025
Kabul tarihi:15.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Taşıt kliması
Soğutma
Elektrikli araç
Kompresör
Batarya

ÖZ

Sürücüler ve yolculara konforlu bir yolculuk sağlayan otomobil klima sistemleri uzun süredir otomobillerin vazgeçilmez bir parçası durumuna gelmiştir. Elektrikli otomobil kullanımı ise içten yanmalı motorla çalışan araçlara bir alternatif olarak her geçen gün daha da artmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan klima sistemi teorikte aynı buhar sıkıştırmalı mekanik soğutma çevrimi olmasına rağmen konvansiyonel taşıt klima sistemlerine göre donanımsal farklılıklara sahiptir. Bu çalışmada içten yanmalı motorla çalışan araçlara ait klima sistemleriyle elektrikli araçlara ait klima sistemlerinin tasarım karşılaştırmasına yer verilmiştir. Çalışmaya her iki tür araç klimalarından beklenilen soğutma görevinin karşılaştırılmasıyla başlanmıştır. Daha sonra bir klima sistemini oluşturan kompresör, evaporatör, kondansör ve kısılma vanası karşılaştırmasıyla devam edilmiştir. Sonuç olarak içten yanmalı otomobillerde bulunan klima sistemi sadece konfor şartlarının iyileştirilmesine katkıda bulunurken elektrikli araçlarda bulunan klima sistemi kabin içi soğutma görevinin yanında batarya ve motor soğutma görevini de yerine getirmektedir. İçten yanmalı otomobillerde ısı pompası uygulamasına gerek yokken elektrikli otomobil klimalarında ısı pompası uygulaması ticari olarak başlamıştır

Hardware Comparison of Electric and Conventional Automobile Air Conditioners

Research Article

Article History:
Received: 31.03.2025
Accepted: 15.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Vehicle air conditioner
Cooling
Electrical vehicle
Compressor
Battery

ABSTRACT

Automobile air conditioning systems, which provide a comfortable journey for drivers and passengers, have long been an indispensable part of cars. The use of electrical cars is increasing day by day as an alternative to vehicles powered by internal combustion engines. Although the air conditioning system used in electric vehicles is theoretically same vapor compression mechanical cooling cycle, it has hardware differences. This study includes a design comparison of air conditioning systems of vehicles powered by internal combustion engines and air conditioning systems of electric vehicles. The study began with a comparison of the cooling task expected from both types of vehicle air conditioners. Then, it continued with a comparison of the compressor, evaporator, condenser and expansion valve that make up an air conditioning system. As a result, the air conditioning system in internal combustion cars only contributes to the improvement of comfort conditions, while the air conditioning system in electric vehicles performs the battery and motor cooling task in addition to the cabin cooling task. While there is no need for heat pump application in internal combustion cars, heat pump application in electric car air conditioners has started commercially.

To Cite: Saka K., Ayanoğlu A. Elektrikli ve Konvansiyonel Otomobil Klimalarının Donanımsal Karşılaştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2277-2290.

1. Giriş

Taşıtlar, binalarla karşılaştırıldığında atmosfer şartlarından daha fazla etkilenen iç hacme sahip yapılardır. Bu duruma daha az izolasyona sahip olmalarıyla birlikte güneş ışığı, yağmur, kar ve rüzgâr gibi direk atmosfer koşullarına maruz kalmaları sebep gösterilebilir. Ayrıca otomobillerin geniş camlarından taşıt içine direkt gelen güneş ışınları sera etkisiyle yaz zamanlarında taşıt içi sıcaklığının çok fazla yükselmesine neden olmaktadır. Taşıtların kabin içi hava şartlarının insan konfor şartlarına yakınlaşması için taşıt klima sistemlerinden yararlanılmaktadır. Taşıt klima sistemlerinin geliştirilmesi araştırmacıların dikkati çeken konulardan biri olmuştur. Bu sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir**.** Yakubu ve ark. (2024) bir taşıt klima sisteminin termal yönetimi üzerinde yaptıkları araştırmada bulanık taban yöntemini kullandılar. Bununla bir otomobil klimasının sıcaklık kontrolünü otomatik olarak sağlamayı hedeflemişlerdir. Kim ve ark. (2024) ise çift kondansöre sahip bir elektrikli taşıt klimasını geliştirmeye çalıştılar. Ele aldıkları klima sistemi konfor uygulaması için kullanılırken aynı zamanda batarya soğutması da yapmaktaydı. Çalışmanın sonucunda sistem verimliliğini %14,6 dan %15,7 ye çıkarmayı başardılar. Lee ve ark. (2024) üzerinde çalıştıkları sistem yine elektrikli araç klimasıydı. Araç bir yakıt hücresiyle desteklenmişti ve klimanın bir görevi de bu yakıt hücresini soğutmaktı. Yaptıkları tasarım sayesinde yakıt hücresinin sıcaklığını 62 °C'nin altında tutmayı başarmışlardır. Zhang ve ark. (2024) bir elektrikli taşıt klima sistemini yeni bir serbest soğutma metoduyla desteklediler. Bu metot sayesinde soğuk bölgelerde elektrik tüketiminin %24,9 azaltılabileceğini rapor etmişlerdir. Yu ve ark. (2024) ise taze hava kullanımının elektrikli bir taşıt klimasının enerji kullanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak bu tür bir uygulamanın enerji tüketimini %11,3 azaltabileceğini bildirmişlerdir.

Elektrikli taşıt klimaları üzerine yapılan çalışmalar araştırmacılar arasında popüler olduğu gibi konvansiyonel taşıt klimaları üzerine yapılan çalışmalar da devam etmektedir. Ikhtiar ve ark. (2023) içten yanmalı bir taşıtta bulunan klima sisteminde lamelli ısı eşanjörü kullanımını deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak lamelli ısı değiştiricisi kullanmanın motor performansını iyileştirmede önemli bir katkısı olacağı sonucuna varmışlardır.

He ve ark. (2024) ise derin öğrenmeye dayalı elektrikli araç klima sisteminin akıllı kontrolü üzerine yoğunlaştılar. Çalışmalarında derin öğrenmeye dayalı kontrolün üstün enerji verimliliği sağlamanın yanında, aynı zamanda geleneksel kontrol yöntemlerine kıyasla enerji tüketimini %6 oranında azaltabileceğini bildirmişlerdir. Lei ve ark. (2023) elektrikli bir araca ait taşıt klima sisteminin ısı pompası olarak kullanımına bağlı ekserji analizi üzerinde çalışmışlardır. Farklı soğutucu akışkan kullanımına bağlı termodinamik çıktıları çalışmalarında not etmişlerdir.

Ko ve ark. (2021) ise sadece kompresör üzerine odaklanmışlardır. İnceledikleri kompresör değişken kapasiteli kayışla tahrik edilen bir kompresördür. Yaptıkları deneyler sonucunda sistemin 900 devirde 1,2 kW güç tükettiği ve buna karşılık 4 kW soğutma yaptığını, 2500 devirde ise 4,6 kW kapasiteye karşı 2 kW güç kullandığını gözlemlemişlerdir.

Lee ve ark. (2021) yine manyetik kavramalı kompresör üzerinde çalışmışlardır. R1234yf gazı basan kompresörün tasarım optimizasyonu sonucunda kompresör gücünün artması nedeniyle soğutma kapasitesinde sadece %4 ten az bir azalma olduğu, performans katsayısında ise %17'ye kadar düşüş olduğu tespit edilmiştir. Pan ve ark. (2019) ise taşıt kliması içindeki dolaştırılan havanın enerji tasarrufu üzerindeki etkisini incelemişleridir. Kabin içinde havanın tekrar dolaştırılmasının elektrikli ısıtıcının yükünü %14 azaltabileceği sonucuna varmışlarıdır. Bazı optimizasyon çalışmalarında ise taşıt klimasının enerji tüketiminin %20,8 oranında azaltılabileceği bildirilmiştir (Oh ve ark., 2014).

Khayyam ve ark. (2012) motorla birleştirilmiş araç klima sisteminin akıllı enerji yönetimi kontrolünü simüle etmişlerdir. Simülasyonlarda taşıt klima sistemine ait kapasitenin 4kW olduğu görülmektedir. Zhang ve ark. (2018) ise elektrikli taşıt klimaları üzerine kapsamlı literatür taraması yaparak geliştiren sistemlerin artı ve eksilerini paylaşmışlarıdır. Son olarak Khayyam ve ark. (2011) bir taşıt klimasına ait geliştirilen koordineli enerji yönetim sisteminin enerji tasarrufuna etkisini göstermek için üç simülasyon gerçekleştirmiştir. Taşıt klima sistemleri üzerine yapılan bu tür çalışmalar elbette taşıtlar üzerine yapılan çalışmaların sadece bir yönünü ifade etmektedir. Taşıtların malzemesi, aerodinamik yapıları ve yakıtları gibi birçok açıdan taşıt teknolojisi gelişmeye devam etmektedir. Behçet ve Yakın (2021) benzine alkol ilave edilmesi durumunda motorda yaşanan performans değişimlerini araştırmışlardır. Elektrikli bir araçla konvansiyonel bir aracın gövde, şasi ve iç tasarımlarında farklıklar olduğu gibi klima sistemleri arasında da farklılıklar vardır (Işılak, 2020).

Valıyev ve Uçar (2021) elektrikli otobüsler için HVAC hava kanalları tasarımı ve CFD yöntemi ile akış analizi yapmıştır. Yapılan ölçümlerle, yolcu kabininde düzgün sıcaklık dağılımın sağlandığı ve sıcaklığın 17°C'ye kadar düşürüldüğü belirlenmiştir. Yalçın ve Kavaklı (2010) egzoz gazı atık ısısından faydalanan otobüs kliması sistemi için absorpsiyonlu soğutma sistemi kaynatıcı tasarımı yapmıştır. Dahlan ve ark. (2014), kompresör hızının motor krank mili hızından bağımsız olmasını sağlayan bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Sistemde yer alan otomobil klima sisteminin tipik kayış tahrikli kompresörü, soğutma kapasitesinin motor hızına göre değişmesine neden olmuştur.

Li ve ark. (2024) elektrikli araç enerji tüketim optimizasyonunu sağlamak için yeni kontrol yöntemleri önermişlerdir. Testi yapılan elektrikli araca ait elektrik motorunun maksimum gücünü 132 kW ve araçta yer alan klima sisteminin soğutma kapasitesini 4,3 kW olarak rapor etmişlerdir.

Literatürde bazı araştırmacıların araç klima sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanın sistem performansı üzerindeki etkilerini araştırdıkları görülmektedir. Ko ve Jeong (2024) elektrikli araçlarda kullanılan buhar sıkıştırmalı klima ve ısı pompası sistemlerinde yaşanan zorlukları incelemiştir. Çalışmada elektrikli araçlar ve içten yanmalı motorla çalışan araçlarda bulunan klima sistemlerinde tercih edilen soğutucu akışkanlar için ayrıntılı bilgi verilmiştir. Huang ve ark. (2022) elektrikli araç ısı pompası klima sisteminde R290 soğutucu akışkanın kullanımını incelemiştir. R290 gazına ait küresel ısınma potansiyelini gösteren değeri 3,3 olarak rapor etmişlerdir.

Bazı araştırmacılar ise elektrikli araçlardaki kontrol sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Yu ve ark. (2023) elektrikli araçlarda bulunan atık ısı geri kazanımıyla entegre ısı pompalı klimalar için yeni bir enerji-ekonomik-çevresel değerlendirme modeli önermişlerdir. Göltz ve Sawodny (2023) elektrikli bir araçtaki otomobil klima sistemi için dört farklı kontrol tasarımı ve karşılaştırılması yapmıştır.

Elektrikli araçlarda bulunan klima sistemlerinin tükettiği enerji miktarı ise araştırılmaya değer bir konudur. Zhang ve ark. (2017) Çin'de elektrikli araç klimalarının yıllık enerji tüketimini incelemişlerdir. 30 farklı il için yapılan araştırmada PTC ısıtması için harcanan yıllık elektriğin 800 kWh üzerine çıktığını bildirmişlerdir. Isı pompasının kullanımı halinde mevcut tüketimden %41 oranında tasarruf edilebileceğini tahmin etmişlerdir. Zhou ve ark. (2017) ise elektrikli bir araçta yer alan ısı pompası sisteminin defrost durumunda harcadığı enerjiyi deneysel olarak incelemişlerdir.

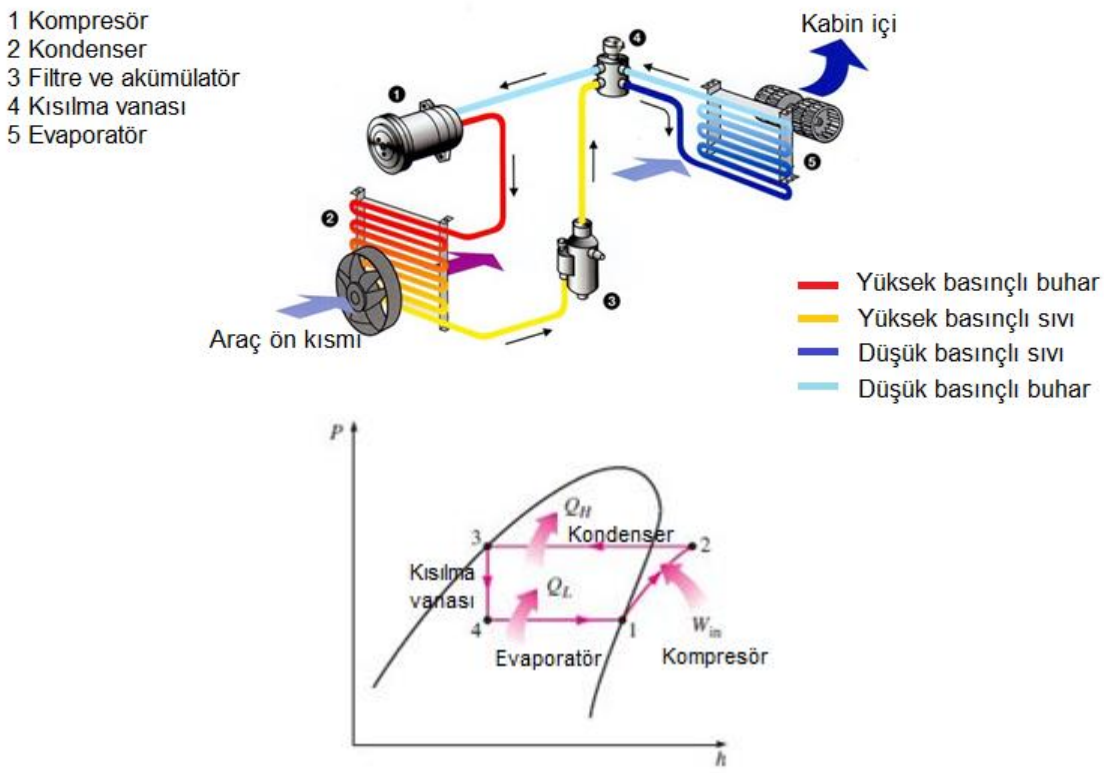
Buraya kadar olan çalışmalar ışığında taşıt klimalarına karşı araştırmacıların ilgisinin elektrikli ve konvansiyonel sistemler olmak üzere iki yönden devam ettiği, çalışmalarda taşıt klima sisteminin tamamına bağlı analizler yapıldığı gibi sistemin sadece bir komponenti üzerinde yoğunlaşan araştırmacılar da bulunduğu görülmektedir. Yapılan literatür taraması sonucunda elektrikli ve konvansiyonel taşıt klima sistemlerinin görev ve ekipmanlarının farklılıklarını ortaya koyan bir çalışma olmadığından bu çalışmada bir elektrikli taşıt klimasından beklenilenler ile bir konvansiyonel sistemden beklenenler açıklanacaktır. Ayrıca sistemi oluşturan kompresör, yoğuşturucu, evaporatör, kısılma vanası, dolaşım boruları ve soğutucu akışkan farklılıkları karşılaştırmalı olarak anlatılacaktır.

Her iki taşıt türüne ait klima sistemleri buhar sıkıştırmalı olmalarına rağmen donanımsal olarak birbirinin aynı sistem elemanları kullanılmaz. Bu tür farklıları ortaya koymak için kapsamlı bir literatür taraması ve saha bilgisi gerektirdiğinden bu çalışmada literatürdeki bu boşluğun doldurulması hedeflenmektedir.

2. Metodoloji

Bu çalışmada elektrikli bir taşıtta bulunan klima sistemiyle konvansiyonel bir taşıt klima sisteminin donanım farklılıkları ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Çalışmanın metodolojisi saha gözlemlerine ve literatür bilgisine dayanmaktadır. Bir taşıt klimasının çalışma döngüsü şu şekilde özetlenebilir.

Kompresör yardımıyla soğutucu akışkan kondansöre basılır. Kondansör çıkışında sıvı fazda filtreden geçen soğutucu akışkan kısılma vanasına gelir. Kısılma vanasından çıkan akışkanın basıncı düşerek evaporatöre gelir. Evaporatörde tamamen gaz fazına geçen soğutucu akışkan tekrar kompresöre gelerek çevrim tamamlanmış olur. Soğutucu gazın evaporatörde gaz fazına geçerken kabin içinden ısı çekmesi şoför ve yolcular üzerinde serinlik etkisine neden olur. Kabinden soğutucu akışkana çekilen ısı enerjisi kondansör vasıtasıyla araç dışına atılır. Aşağıda verilen Şekil 1 üzerinde buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimine ait şema ve basınç entalpi diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1. Buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimine ait şema ve basınç entalpi diyagramı

Elektrikli taşıtlarda bulunan klima sistemleriyle içten yanmalı motorla çalışan konvansiyonel taşıt klima sistemleri, buhar sıkıştırmalı mekanik soğutma çevriminin birer uygulamasıdır. Dolayısıyla aynı çevrimden oluşurlar. Teorik olarak aynı çevrimde, aynı isimle anılan cihazlar olmalarına rağmen sistemlerin kurulumunu gerçekleştirmek için aslında farklılıkları olan cihazlar kullanılır. Bu ince farklılıkları ifade etmek literatürde yer alan her çalışmada bulunmadığından her bir sistem elemanı göz önüne alınarak alt başlıklar altında bu farklılıkların açıklanması bu çalışmanın ana konusunu oluşturacaktır.

Birbirine son derece benzeyen iki sistem arasındaki farklar güncel tasarımların gözlemlenmesiyle tespit edilmiştir. Öncelikle her iki sistemin tanımını yapmakta fayda vardır.

- Elektrikli taşıt kliması, elektrikli motor yardımıyla hareket eden araçlarda bulunan ve kompresörü yine elektrikle çalıştırılan sistemlerdir.
- Konvansiyonel taşıt kliması ise dizel ya da benzinli herhangi bir içten yanmalı motor yardımıyla hareket eden taşıtlarda bulunan ve kompresörü kayış yardımıyla motordan gelen bir hareketle tahrik edilen sistemlerdir.

Elektrikli araçta bulunan klimanın görevi ile konvansiyonel bir taşıt klimasının görevinin de tam olarak aynı olmadığının bilinmesi gerekir. Elektrikli araçlarda kullanılan kompresör çeşitleriyle birlikte konvansiyonel sistemlerde tercih edilen kompresör tasarımları da aynı değildir.

Bu farklılıklar kondansör, evaporatör, kısılma vanası, taşıyıcı borular ve soğutucu gaz seçiminde devam eder. Soğutucu gaz seçimi elektrikli ve konvansiyonel türüne bağlı olarak yapılmasa da alternatif gazlar bu cihazların gelişen diğer bir yönünü oluşturur. Gelen bölümlerde başlıklar altında bu karşılaştırmalar yapılacaktır.

Bu noktada ifade edilmesi gerekir ki bir taşıt klima sistemi tamamen kapalı bir döngüdür. Araç içinde bulunan diğer yağ, su ve hava döngüleriyle bir alakası yoktur. Soğutucu akışkan kendine ait bir hacim içinde döngüsüne devam eder. Bu durum sistemin elektrikli ya da konvansiyonel olmasına göre değişmez.

Önemli olan diğer bir nokta ise taşıt klima sistemleri isimlerinden anlaşılacağı üzere klima sistemlerinin birer çeşididirler. Dolayısıyla bu alanda bilgi derinliğine ihtiyacı olanların soğutma ve iklimlendirme teorilerine başvurmaları ve soğutma cihazlarıyla iklimlendirme cihazlarının farklılıklarını incelemeleri gerekir. Yine bu alanda temel bilgi olarak kabul edilen basınç-entalpi diyagramı ve sikometri diyagramlarına ait ayrıntılardan bahsedilmeyecektir.

Bu çalışma da paylaşılan bilgiler otomobil öncelikli olmakla birlikte kamyon, otobüs ve minibüs gibi taşıtlarda da hemen aynı sistemler kullanılmaktadır. Dolayısıyla benzer karşılaştırmalar onlar içinde geçerlidir.

3. Bulgular ve Tartışma

İster konvansiyonel ister elektrikli olsun taşıt klima sistemleri belli amaçları yerine getirmek için tasarlanan sistemlerdir. Öncelikle taşıt klima sistemlerinden beklenilen görevler ve tasarım amaçlarına değinilecektir.

3.1. Taşıt klima sistemlerinde görev farklılıkları

Konvansiyonel bir taşıt klima sistemi sadece kabin içi soğutma görevi yapan bir sistemdir. Bu tür sistemler evsel uygulamalarda kullanılan split klimalara benzemekle birlikte sistemleri birbirine karıştırmamak daha doğru olur. Yazın soğutma modunda çalışan bir bireysel klima kış şartlarında ısı pompası olarak görev yapar. Her iki görev arasındaki geçiş ise sistem dâhilinde bulunan dört yollu vana ile mümkün olur. Konvansiyonel taşıt klimalarında dört yollu vana bulunmaz çünkü sistemin ısı pompası olarak çalışmasına gerek yoktur. Konvansiyonel bir taşıt klima sisteminde soğutma görevini klima yerine getirirken ısıtma ihtiyacı ise içten yanmalı motorda yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan ve radyatörden araç dışına atılan ısının bir kısmının kabin içine yönlendirmesiyle gerçekleştirilir. Isıtma işlemi taşıt klimasının bir parçası gibi gözükse de aslında klima çevrimiyle bir alakası yoktur.

Elektrikli taşıtlarda yer alan klima sistemlerinin ise görev durumunda farklılıklar vardır. Elektrikli taşıtlarda bulunan bir taşıt klimasının kabin içini soğutması birinci görevidir. Fakat bunun yanında ikinci önemli bir görevi ise batarya soğutmasıdır. Bir elektrikli aracın enerji kaynağı batarya olduğundan bataryanın sürdürülebilir bir şekilde görev yapmasının araç için hayati bir önemi vardır. Bataryalar enerji yüklü cihazlar oldukları için ısınma durumları söz konusudur ve sıcaklıklarının kontrolsüz olarak

artması istenmez. Bu noktada bataryanın termal yönetimi ve soğutulmasında önemli görev klima sistemine düşmektedir. Bu noktada birden fazla batarya soğutma sistemi literatüre kazandırılmıştır (Yenigün ve Utlu, 2018). Günümüzde üretilen elektrikli araçlarda bu sistemlerin biri tercih edilerek klima sistemi yardımıyla batarya soğutma ihtiyacı karşılanır. Bunu yapmak için sisteme çiller olarak tanımlanan ikinci bir evaporatör eklenir. Bazı gelişmiş araçlarda batarya soğutmanın yanında bir de motor soğutma görevlerinin olduğu bilinmektedir.

Elektrikli araçlarla ilgili diğer bir nokta ise araç içinin ısıtılmasıdır. Elektrikli araçlarda atık ısı olmadığından araç kabininin ısıtılması PTC vasıtasıyla gerçekleştirilir. PTC'ler (Positive temperature coefficient) elektrik enerjisini ısıya çeviren rezistanslardır. Bu durum ise fazladan enerji sarfiyatı gerektirdiğinden araç bataryasının işini zorlaştırır. İşte bu noktada dünya da ve ülkemizde taşıt klimalarına ısı pompası özelliği kazandırılarak daha verimli ısıtma sağlanması için çalışmaların devam ettiği bilinmektedir. Ayrıca ticari olarak üretimi yapılan elektrikli araçların bazılarında ısı pompası özelliği eklenmiştir (Di Grezia, 2022).

Aşağıda verilen Tablo 1 üzerinde elektrikli ve konvansiyonel taşıt klimalarında kabin içi soğutma, kabin içi ısıtma, batarya soğutma, motor soğutma ve ısı pompası özelikleri bir tablo yardımıyla özetlenmeye çalışılmıştır.

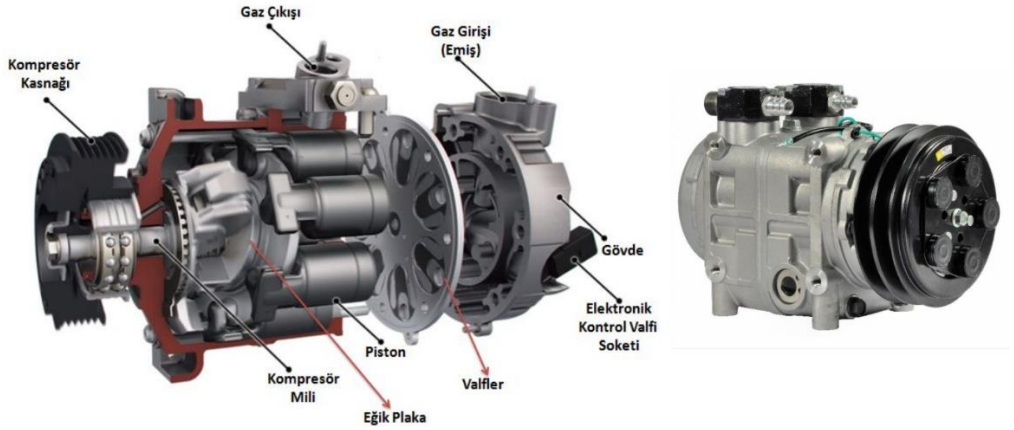
Tablo 1. Elektrikli ve konvansiyonel taşıt klimalarında işlev dağılımı

Klima türü	Kabin soğutma	Kabin ısıtma	Batarya soğutma	Motor soğutma
Konvansiyonel taşıt kliması	Var	Atık ısıyla	Yok	Yok
Elektrikli taşıt kliması	Var	PTC (Elektrik)	Var	Opsiyonel

3.2. Kompresör farklıkları

Bir taşıt klima sisteminin en önemli parçası kompresördür demek yanlış olmaz. Kompresör, sistemde yer alan fanlar dışında sistemin hareketli olan tek ve en pahalı parçasıdır. Konvansiyonel taşıt klima sistemlerinde kompresörün enerji ihtiyacı taşıt motorundan sağlanmıştır. Eski ya da gücü düşük bir taşıtta klimanın çalışmasıyla birlikte taşıt motorunun da zorlandığı hissedilir. Hissedilmese bile klimanın sürekli açık olduğu yolculuklarda taşıtın daha fazla yakıt tükettiği kullanıcıların dikkatinden kaçmaz. Manyetik kavramalı olarak geliştirilen bu tip kompresörlerin yanında manyetik bir debriyaj bulunur. Sistemin kapalı olduğu şartlarda boşa dönen bu kısım kullanıcıların iç kabinde bulunan A/C tuşuna basmalarının ardından elektrik verilerek manyetik olarak kitlenir ve motora bağlı olan kayış yardımıyla motorla birlikte kompresör de dönmeye başlar. Kompresör tipi olarak pistonlu tipte olan bu kompresörler yan yana bir plaka üzerinde sıralanmış beş pistonlu olarak üretilirler. Plaka açısına bağlı olarak piston strok boyu fazla olur dolayısıyla sisteme basılan gaz ve sistemin soğutma kapasitesi fazladır. Sistem termal dengeye geldikçe plaka açısı değişerek strok boyu azalır ve sisteme basılan gaz miktarı azalır.

Tüm bu değişimler kompresörün motordan çekeceği enerjiyi azaltır ve kullanıcılara daha az yakıt olarak yansır. Aşağıda Şekil 2 üzerinde manyetik kavramalı bir kompresörün dış görünüşüne ve iç tasarımına yer verilmiştir. Bahsedilen bu bilgiler ışığında konvansiyonel bir taşıt klima kompresörünü, pistonlu, manyetik kavramalı, değişken hacimli taşıt klima kompresörü şeklinde tanımlamak yanlış olmaz.



Şekil 2. Pistonlu, manyetik kavramalı ve değişken hacimli bir taşıt klima kompresörünün görünümü

Elektrikli taşıt klimalarında ise kompresör taşıt bataryasından gelen 12V/24V elektrik ile tahrik edilir. Kompresörlerin farklı elektriksel özelliklere sahip olması da mümkündür. Kompresör tipi olarak scroll (spiral) tipte olan bu kompresörlerin devir ve kademe sayısının kontrolü taşıt bilgisayarı yardımıyla yapılır. Bu sayede taşıtın termal dengeye gelmesiyle birlikte daha yavaş dönerek enerji tasarrufu sağlaması bu tip kompresörlerden de beklenir. Scroll kompresörler soğutucu akışkan gazını spiral olarak işlenen ve iç içe çalışan iki kompresör kanadı arasında basarlar.

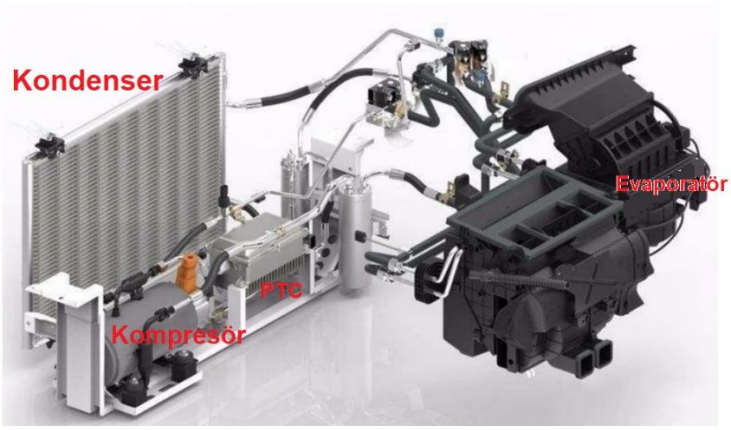
Aşağıda Şekil 3 üzerinde scroll bir kompresörün iç tasarımına ve elektrikli bir taşıt klima kompresörünün dış görünüşüne yer verilmiştir. Sonuç olarak elektrikli bir taşıt klima kompresörüne ait tanımı scroll, elektrikli, devir kontrollü taşıt klima kompresörü şeklinde tanımlamak yanlış olmaz.



Şekil 3. Scroll, elektrikli ve devir kontrollü bir taşıt klima kompresörünün görünümü

3.3. Evaporatörler

Herhangi bir taşıt klimasında soğutmanın gerçekleştiği tek eleman evaporatördür. Konvansiyonel taşıt klimaları için alüminyumdan imal edilen evaporatör serpantinlerinin zaman içinde delinmeleri söz konusudur. Bu durumda gözle görülmeyecek düzeyde bir çatlak bile olsa taşıt içine soğutucu gaz sızıntısı meydana gelir. Kompresör yağını da birlikte taşıyan bu gaz sızıntısı taşıt ön camında normal buhardan çok farklı bir buğulanma etkisi oluşturur. Konvansiyonel taşıtların ısınma prensiplerinden daha önce bahsedilmişti. Bu durum evaporatör üzerinde ek bir görev getirmediğinden konvansiyonel sistemlerde evaporatörün fanla desteklenmesi yeterlidir.



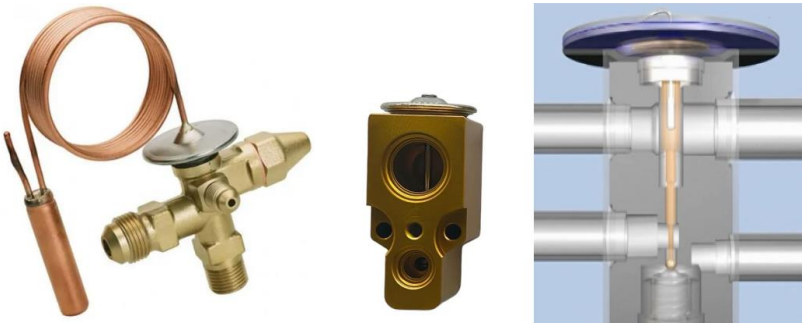
Şekil 4. Bir elektrikli taşıt klima sistemine ait görünüm

Elektrikli taşıtların kabin içi havasının ısınmasının bataryadan beslenen bir rezistansla yapıldığından daha önce bahsedilmişti. Elektrikli taşıt klimaları ısıtma rezistansıyla birlikte üretilirler. Hatta sisteme ait kısılma vanası da yekpare olarak evaporatörlerle birlikte üretilirler. Şekil 4 üzerinde bir taşıt klima sistemine ait kısımlar evaporatör ile gösterilmiştir.

3.4. Kısılma vanaları

Kısılma vanası yüksek basınçlı soğutucu akışkanı buharlaşma basıncına düşürdüğü için sistemde ayrı bir önemi vardır. Genel soğutma sistemlerinde kılcal boru, otomatik genleşme valfi ya da termostatik genleşme valflerinden biri kısılma vanası olarak tercih edilir. Kılcal boru tasarımı gereği değişken soğutma yüküne maruz bir sisteme uyum sağlayamaz. Otomatik genleşme vanası ise manuel olarak müdahale ihtiyacı gerektiren bir yapısı vardır. Değişken soğutma yükü bir klima sisteminden daha fazla soğutma yapmasının beklenmesi olarak ifade edilebilir. Taşıtlar direk güneş ışığına maruz sistemler olduğundan iç hacimlerinde çok fazla sıcaklık artışı yaşanır. Taşıt klimasının bu sıcaklık artışına uyum sağlaması işlevselliğini artıracaktır. Kısılma vanaları taşıt klima sistemlerinin değişken soğutma yüküne karşı klima sistemine uyum yeteneği vermek üzere tasarlanırlar. Kısılma vanası türlerinde bir giriş bir çıkış bulunurken taşıt klimalarına ait kısılma vanası tasarımlarında iki giriş iki çıkış gösterilir. Buradan kasıt evaporatör çıkışından kısılma vanasına sinyal alındığını ve evaporatörün değişken soğutma yüküne uyum sağladığını göstermektir. Kısılma vanaları evaporatör çıkışındaki sıcaklık değişimlerini algılayarak evaporatör basıncını değiştirirler. Bu sayede belli bir aralıkta, değişen soğutma yüküne karşı

klima sisteminin uyum sağlanması gerçekleşir. Son zamanlarda ticari taşıtlar için geliştirilen elektrikli kompakt taşıt klima sistemlerinde dıştan dengeli termostatik genleşme vanalarının tercih edildiği bilinmektedir. Termostatik genleşme vanaları da evaporatör çıkışında yaşanan değişimleri içi soğutucu gaz dolu olan bir kuyruk vasıtasıyla takip eder. Kısılma vana türleri arasında tasarım farklılıklarının anlatılması bu çalışmanın kapsamı dışında kaldığı için daha fazla ayrıntıya girilmeyecektir. Aşağıda Şekil 5 üzerinde termostatik genleşme vanası ile bir taşıt kliması genleşme vanasının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5. Termostatik genleşme vanası ve taşıt kliması genleşme vanası

3.5. Otomobil dışındaki taşıt klima sistemleri

Bir önceki bölümde ticari taşıtların klima sistemlerinden bahsedildiği için bu bölümde bu konu hakkında bilgi vermek faydalı olacaktır. Günümüze otomobiller dışında birçok ticari araç üretildikten sonra ekstra bir klima sistemine ihtiyaç duyarlar. Bu eksiği kapatmak için kompakt ve elektrikle çalışan tavan tipi klima üniteleri geliştirilmiştir. Genellikle ticari aracın tavanına monte edilen bu ünitelerin alt kısmı evaporatör olarak tasarlanır ve kabin içinde kalırken kondansör olarak tasarlanan üst kısmı araç dışında kalır.

Günümüzde sadece ticari taşıt klima sistemleri üreten ve geliştiren bir sektörün devamı bu cihazların önemini göstermektedir. Çok farklı kapasitede üretilen bu ünitelerin kamyon, otobüs, karavan, raylı sistem ve minibüslere montajının yaygın olarak yapıldığı bilinmektedir.

Tavan tipi taşıt klima sistemleri konfor amaçlı olabildikleri gibi bazı uygulamalar da ise frigorifik amaçlı kullanılabilmektedirler. Frigorifik araçlar soğuk zincir uygulamalarında ihtiyaç duyulan ve önceden soğutulan ürünlerin istenilen sıcaklıkta taşınmasını sağlayan sistemlerdir. Bu sistemler de tasarımları gereği başlı başına bir sektör oldukları ve çok fazla bilgi birikimi barındırdıkları için bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

3.6. Kondansörler

Kondansörler klima sisteminin ısı atan elemanları oldukları için her zaman bulundukları çevreden daha yüksek sıcaklığa sahip olmaları gerekir. Taşıt klimalarının atmosfer şartlarına açık olmaları ev tipi klimalara göre daha yüksek sıcaklıkta çalışmalarını gerektirir ki bu da daha yüksek basınç altında çalışmaları anlamına gelir. Bazı konvansiyonel taşıt klimalarının kondansör çıkışında sıvı deposu

yekpare olarak üretilmiştir. Klima çevrimi anlatılırken bu kısımdan kurutucu olarak bahsedilse de için de slikajel olmayan bir cihazın kurutma yapamayacağını da bilmek gerekir. Dolayısıyla bu tür ek cihazlar filtre ve sıvı deposu görevi görürler. Filtre ve sıvı depoları müstakil olarak da tedarik edilebilirler.

3.7. Soğutucu akışkanlar

R134a gazı uzun bir süredir taşıt klimalarının soğutucu akışkan ihtiyacına cevap vermektedir. Günümüzde kullanımı devam eden bu gaz yerini çevreci kaygılardan dolayı R1234yf gazına bırakmaya başlamıştır. R134a gazı molekül yapısında klor atomu olmadığı için ozon tabakasına zararı olmayan bir gazdır fakat küresel ısınma üzerindeki etkisi devam etmektedir. Ayrıca R134a gazının doğada bozulma süreside az değildir. Bu sebeplerden dolayı Avrupa normları gereği bir otomobilin yeni nesil ünvanı taşıması için R1234yf gazını kullanma mecburiyeti getirilmiştir. Bu kural elektrikli araçlar içinde geçerlidir. Dolayısıyla günümüz şartlarında bir taşıt klimasının gaz seçimi elektrikli ya da konvansiyonel olmasına bağlı olmasa da bu noktada bağlayıcı başka kriterler olmaktadır. R134a gazının küresel ısınma potansiyeli 1300 olmasına karşı R1234yf gazı için bu değer 1'den küçüktür (Pektezel, 2023). Uzun bir süredir R12'nin yerini alan R134a gazı yerini R1234yf gazına bırakmaya başlamıştır.

3.8. Taşıyıcı borular

Konvansiyonel taşıt klimalarında soğutucu akışkanın sistem elemanlarının arasında dolaşımını sağlayan borular alüminyumdan yapılırlar. Fakat elektrikli araçlarda artık alüminyumdan ziyade kauçuk hortumların kullanılmasına başlanmıştır. Kauçuk hortumların tasarım ve üretim kriterlerinin de zaman içinde geliştiği bilinmektedir. Günümüzde aynı sistem içinde alüminyum boru ve kauçuk hortumların tercih edildiği taşıt klimaları görülmektedir.

3.9. Isı pompaları

Elektrikli taşıtlarda atık ısı bulunmaz. Taşıt kabininin daha az enerjiyle ısıtılması ihtiyacı ısı pompalarını ön plana çıkarmaktadır. Günümüzde bu konuda akademik çalışmalar devam etmekle birlikte ticari olarak da uygulanmaya başlanmıştır. Elektrikli araç klima sistemlerinin görev açısından batarya soğutma işini de üstlenmeleri bu sistemleri konvansiyonel taşıt klima sistemlerinden daha karmaşık hale getirdiğine daha önce değinilmişti. Bir de bu sistemlerin ısı pompası olarak çalışması bahsedilen bu karmaşıklığı daha da artırmıştır. Daha önceki bölümde dört yollu vananın ısı pompasındaki önemine değinilmişti. Bir taşıt klimasının kabin soğutması, kabin ısıtması, batarya ve motor soğutma görevlerini birlikte yapacak şekilde tasarlanması soğutucunun akışkan yönünün sistem içinde kontrolünü sağlayan dört yollu vanayı da çok özel bir hale getirmiştir. Bu çalışma da elektrikli taşıt klimaları ile konvansiyonel taşıt klimalarının ana hatlarıyla karşılaştırılması yapıldığı için daha fazla ayrıntıya girilmeyecektir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada konvansiyonel bir otomobil klima sistemiyle elektrikli bir otomobil klimasının donanımsal kaynaklı farklılıkları araştırılmıştır. Sonuç olarak her iki sistemin farklıklarını ortaya koyan aşağıdaki maddeler tespit edilmiştir.

- Konvansiyonel bir taşıt kliması sadece kabin içini soğutur. Fakat elektrikli bir taşıt klimasının kabin içini ve taşıt bataryasını soğutma görevi vardır.
- Konvansiyonel taşıt klimalarında pistonlu, manyetik kavramalı ve değişken debili kompresörler tercih edilirken elektrikli taşıt klimalarında scroll tip ve devir kontrollü kompresörler tercih edilmektedir.
- Elektrikli taşıt klima sistemlerinde bulunan evaporatörler ısıtma ihtiyacını karşılamak için PTC'ler ile takviye edilirler.
- Taşıt klima sistemleri için bir kısılma vanası tasarımı olmakla birlikte bazı ticari tip araçlarda TGV kullanıldığı görülmektedir.
- Sıvı depoları bazı kondansörlere bitişik olarak üretilebildiği gibi müstakil olarak da temin edilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranlarda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynakça

Behcet R., Yakın A. Benzinli bir motorda kullanılan alkol katkılı yakıtların motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisi. Journal of the Institute of Science and Technology 2021; 11(4): 3024-3034.

Dahlan AA., Zulkifli AH., Nasution H., Aziz AA., Perang MRM., Jamil HM., Zulkifli AA. Efficient and 'Green' vehicle air conditioning system using electric compressor. Energy Procedia 2014; 61: 270–273.

Di Grezia G. Modelling of a BEV thermal management system and development of its control strategy in GT-SUITE. Diss. Politecnico di Torino; 2022.

Göltz S., Sawodny O. Design and comparison of model-based controllers for an automotive air conditioning system in an electric vehicle. Control Engineering Practice 2023; 130: 105376.

He L., Li P., Zhang Y., Jing H., Gu Z. Intelligent control of electric vehicle air conditioning system based on deep reinforcement learning. Applied Thermal Engineering. 2024; 245: 122817.

Huang Y., Xiuchun W., Jiahao J. Research on the electric vehicle heat pump air conditioning system based on R290 refrigerant. Energy Reports 2022; 8: 447-455.

Ikhtiar U., Hairuddin A., Asarry A., Rezali K., Ali HM., Jalal RI. Experimental assessment of lamella heat exchanger as cold intake air system for spark ignition engine by utilizing vehicle air

conditioning system. International Communications in Heat and Mass Transfer 2023; 148: 106989.

Işılak C. Elektrikli araçların konvansiyonel araçlara göre gövde, şasi ve iç trim açısından tasarım farklılıkları. Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Tasarım Dergisi 2020; 1: 46-58.

Khayyam H., Abawajy J., Jazar R. Intelligent energy management control of vehicle air conditioning system coupled with engine. Applied Thermal Engineering 2012; 48: 211-224.

Khayyam H., Kouzani A., Hu EJ., Nahavandi S. Coordinated energy management of vehicle air conditioning system. Applied Thermal Engineering. 2011; 31(5): 750-764.

Kim JY., Kim J., Jeong H., Kim GT., Park JJ., Kim T. Enhancement of electric vehicle air-conditioning system with dual condensers. Applied Thermal Engineering 2024; 236: 121459.

Ko G., Raza W., Park YC. Capacity control of a vehicle air-conditioning system using pulse width modulated duty cycle compressor. Case Studies in Thermal Engineering 2021; 26: 100986.

Ko J., Jeong JH. Status and challenges of vapor compression air conditioning and heat pump systems for electric vehicles. Applied Energy 2024; 375: 124095.

Lee S., Hong JK., Lee D., Kang B., Kim MS. Two-phase stack cooling system coupled with air conditioning system in fuel cell electric vehicles. Applied Energy 2024; 372: 123811.

Lee T., Shin K., Kim J., Jung D., Kim J. Design optimization of external variable displacement compressor with R1234yf for vehicle air conditioning system. Applied Thermal Engineering 2021; 198: 117493.

Lei S., Guo B., Zhao Z. Exergy analysis of heat pump air conditioning systems for pure electric vehicle use with low-GWP refrigerants. International Journal of Refrigeration 2023; 156: 266-277.

Li N., Zhang L., Liu X., Wang Y., Chen Y. New control methodology of electric vehicles energy consumption optimization based on air conditioning thermal comfort. Applied Thermal Engineering. 2024; 241:122375.

Oh MS., Lee SW., Kim JH., Choi B. Thermal comfort and energy saving in a vehicle compartment using a localized air-conditioning system. Applied Energy 2014; 133:14-21.

Leyan P., Cichong L., Ziqi Z., Tianying W., Junye S., Jiagping C. Energy-saving effect of utilizing recirculated air in electric vehicle air conditioning system. International Journal of Refrigeration 2019; 102: 122-129.

Pektezel O. R1234yf ve R134A soğutucu gazlarının performanslarının çeşitli işletme koşullarında deneysel olarak karşılaştırılması. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi 2023; 12(3): 10-21.

Valıyev E., Uçar V. Elektrikli otobüsler için hvac hava kanalları tasarımı ve cfd yöntemi ile akış analizi. MAS Journal of Applied Sciences 2021; 6(2): 422-432.

Yakubu AU., Xiong S., Jiang Q., Zhao J., Wu Z., Wang H., Ye X., Wangsen H. Fuzzy-based thermal management control analysis of vehicle air conditioning system. International Journal of Hydrogen Energy 2024; 77: 834-843.

Yalçın E., Kavaklı A. Absorbsiyonlu soğutma sistemleri ile egzoz gazı atık ısısından faydalanarakotobüs kliması sistemleri için kaynatıcı tasarımı. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2010; 12(1): 136-152.

Yenigün M., Zafer U. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma sistemlerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi. Mühendis ve Makina 2018; 59(692): 35-47.

Yu X., Jiang R., Lu G., Liu H., Tong Y., Qian G., Huang R., Li Z. A novel energy-economic-environmental evaluation model for heat pump air conditioners integrated with waste heat recovery in electric vehicles. Case Studies in Thermal Engineering 2023; 41: 102605.

Zhang Q., Tu R., Yang X. Performance analyses of a novel free-cooling assisted air conditioning system applied to electrical vehicles. Applied Thermal Engineering 2024; 238: 122003.

Zhang Z., Wang J., Feng X., Chang L., Chen Y., Wang X. The solutions to electric vehicle air conditioning systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018; 91: 443–463.

Zhang Z., Liu C., Chen X., Zhang C., Chen J. Annual energy consumption of electric vehicle air conditioning in China. Applied Thermal Engineering 2017; 125: 567-574.

Zhou G., Li H., Liu E., Li B., Yan Y., Chen T., Chen X. Experimental study on combined defrosting performance of heat pump air conditioning system for pure electric vehicle in low temperature. Applied Thermal Engineering 2017; 116: 677-684.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2291-2310, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2291-2310, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Ağırlıklı Çoğunluk Oylaması Kullanarak MNIST/Fashion MNIST Veri Setinde Topluluk Öğrenmesi Yaklaşımı

Buğra HATİPOĞLU[1*], Hüseyin AYDİLEK[2], Mustafa Yasin ERTEN[3], Fikret YALÇINKAYA[4], Murat LÜY[5]

[1,2,3,4,5]Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale

[1]https://orcid.org/0000-0003-2813-5612
[2]https://orcid.org/0000-0003-3051-4259
[3]https://orcid.org/0000-0002-5140-1213
[4]https://orcid.org/0000-0002-2174-918X
[5]https://orcid.org/ 0000-0002-2378-0009
*Sorumlu yazar: bugrahatipoglu@kku.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 08.02.2025
Kabul tarihi:22.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Topluluk öğrenmesi
Ağırlıklı çoğunluk oylaması
Makine öğrenmesi
Derin öğrenme

ÖZ

Derin öğrenme ve makine öğrenmesinde bazen modeli ne kadar karmaşık hale getirsek de istediğimiz sonuçları elde edemeyebiliriz. Hatta fazla karmaşık bir model genelleme yeteneğini kaybedebilir ve aşırı öğrenme sorunuyla karşı karşıya kalabilir. Topluluk öğrenmesi yaklaşımları birden fazla modelin beraber çalışmasını gerektirdiği için modellerin genelleme yeteneğini artırır ve aşırı öğrenme sorununu önler. Bu çalışmada, ağırlıklı çoğunluk oylaması yöntemini kullanarak çeşitli derin öğrenme modelleri (ResNet, Inception, Vgg16) ve makine öğrenmesi algoritmalarının (kNN, Random Forest, SVM) bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir topluluk öğrenmesi modeli sunulmaktadır. Her bir modelin ağırlığı, eğitim seti üzerindeki performansına göre otomatik olarak ayarlanmaktadır. Bu yaklaşımın, modellerin güçlü yönlerini birleştirerek genel tahmin performansını artırdığı ve aşırı öğrenmeye karşı dirençli bir yapı sağladığı gözlemlenmiştir. Sunulan topluluk öğrenmesi modeli, MNIST el yazısı rakam tanıma veri seti üzerinde yapılan deneylerle değerlendirilmiş ve bireysel çalışan modellere kıyasla önemli ölçüde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çalıştığımız veri setinde 28x28 boyutlarında 70000 adet rakam görüntüsü bulunmaktadır. Gerçekleştirdiğimiz eğitim ve sınıflandırma işlemleri sonucunda, modellerin bireysel performanslarına göre daha başarılı sonuçlar elde ederek, test doğruluğu %98,37 seviyesine kadar yükselmiştir.

Ensemble Learning Approach on MNIST/Fashion MNIST Dataset Using Weighted Majority Voting

Research Article

Article History:
Received: 08.02.2025
Accepted: 22.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Ensemble learning
Weighted majority voting
Machine learning
Deep learning

ABSTRACT

In deep learning and machine learning, sometimes no matter how complex we make the model, it may fail to achieve the desired results. In fact, an overly complex model can lose its generalization ability and face the problem of overfitting. Ensemble learning approaches, which require the collaboration of multiple models, enhance the generalization capability of the models and prevent overfitting. This study presents an ensemble model created by combining various deep learning models (ResNet, Inception, VGG16) and machine learning algorithms (kNN, Random Forest, SVM) using the weighted majority voting method. The weight of each model is automatically adjusted based on its performance on the training set. This approach has been observed to enhance the overall prediction performance by leveraging the strengths of the models while providing a structure resistant to overfitting. The presented ensemble model was

evaluated using experiments on the MNIST handwritten digit dataset and achieved significantly better results compared to the individual models operating alone. In our dataset, which contains 70,000 digit images of 28x28 dimensions, the classification operations have improved the accuracy to as high as 98.37%, surpassing the performance of individual models.

To Cite: Hatipoğlu B., Aydilek H., Erten MY., Yalçınkaya F., Lüy M. Ensemble Learning Approach on MNIST/Fashion MNIST Dataset Using Weighted Majority Voting. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2291-2310.

1. Introduction

In recent years, the demand for precise image analysis has grown significantly, driven by applications ranging from document digitization to automated recognition systems. Handwritten text, characterized by its variability and inherent complexity, poses a significant challenge for accurate recognition compared to digitally generated text. Advances in artificial intelligence, particularly in deep learning and machine learning, have enabled the development of robust models capable of addressing these challenges with high accuracy. However, individual models often suffer from limitations such as overfitting and high variance, which impair their ability to generalize effectively across diverse datasets. To mitigate these issues, ensemble learning techniques, which integrate predictions from multiple algorithms, have emerged as a powerful strategy, consistently outperforming standalone models in terms of robustness and accuracy.

A cornerstone in handwritten text recognition research is the MNIST dataset, comprising 28x28 grayscale images of handwritten digits from 0 to 9. Despite its simplicity, MNIST remains a critical benchmark for evaluating classification algorithms due to its accessibility and wide applicability. Extensive studies leveraging this dataset have explored a spectrum of methodologies, from traditional machine learning to advanced neural architectures, underscoring its enduring relevance in the field.

In reviewing the literature, studies employing machine learning and deep learning approaches on the MNIST and MNIST Fashion datasets were first examined. Guo et al., (2020) utilized a combination of CNN, kNN, Random Forest, Naive Bayes, and XGBoost methods for classification, and the results indicated that combined models outperformed their individual performances. Xiao et al., (2017) applied traditional machine learning algorithms for MNIST classification, achieving the highest accuracy of 97% with the Random Forest method. For MNIST-Fashion classification, the highest accuracy achieved was 88% using the GradientBoostingClassifier method. Wang et al., (2021) compared CNN models with traditional machine learning methods, including support vector machines, by altering the pixel dimensions of images in the MNIST dataset, achieving a 95% accuracy with CNN at 256x256 pixel dimensions. Cayir et al., (2018) developed models combining gradient boosting machine, random forest, and kNN methods with CNN for MNIST-Fashion classification, reaching 90.84% accuracy when CNN and Random Forest were used together.

After examining studies involving ML and DL with MNIST and MNIST Fashion datasets, ensemble models developed within this study were also reviewed. Dogan and Birant, (2019) investigated the effects of weighted majority voting on classification performance across 28 different datasets, finding

that individual machine learning algorithms underperformed compared to the weighted majority voting method. Moreover, they achieved better results compared to traditional majority voting methods. Shehab and Kahraman, (2020) conducted classification studies on facial and object recognition datasets using various Extreme Learning Machine (ELM) algorithms, demonstrating that combining these algorithms with the weighted majority voting method resulted in higher accuracy, thereby proving the method's success. Wardoyo et al., (2020) utilized different algorithms and models such as Random Forest, XGBoost, Bagging, and Gradient Boosting Machine, highlighting the success of the weighted majority voting method in their classification studies on frequently used datasets. Zhang et al., (2024) performed classification on the MNIST dataset using fundamental network architectures such as FNN, CNN, DenseNet, and ResNet, and compared the performance of these individual models with that of an ensemble model. According to their findings, the ensemble models achieved performance that was either comparable to or superior to that of the individual models. Moreover, the ensemble models demonstrated greater stability and improved robustness. The study also highlighted that combining different base network architectures within an ensemble can lead to enhanced overall performance. In their study, Vasheghani and Sharifi (Vasheghani and Sharifi, 2025) applied the Dynamic Ensemble Learning (DEL) method for the classification of the Fashion-MNIST dataset. Performance thresholds were calculated based on the classification success of individual models, including Random Forest, SVM, CapsNet, RNN, and CNN. Models with performance exceeding the threshold were included in a majority voting scheme to form the final prediction. The proposed DEL framework achieved superior results compared to individual classifiers, demonstrating its effectiveness in enhancing classification accuracy. Thamaraiselvan et al., (2024) conducted a classification study on the Extended MNIST dataset using a range of deep learning architectures, including Histogram of Oriented Gradients (HOG), VGG, MobileNet, Inception, EfficientNet, and ResNet. The results demonstrated that the strengths of these architectures vary, with certain classifiers outperforming others in specific evaluation metrics. Moreover, a majority voting strategy was employed to enable collective decision-making among the models. Although this ensemble approach exhibited slightly lower performance than some individual models, it was identified as a promising direction for future research.

In this study, classification was performed on the MNIST handwritten digit recognition dataset. To test the model's success on different datasets, classification was also performed on the Fashion-MNIST dataset. To enhance classification efficiency, deep learning and machine learning methods were used together. The goal was to elevate the model's generalization capability by combining traditional machine learning algorithms with complex deep learning models. The ensemble model developed includes deep learning models such as ResNet, Inception, and VGG16, alongside traditional machine learning algorithms like kNN, Random Forest, and SVM. The proposed ensemble model incorporates a weighted majority voting method. In this approach, individual models that perform better have a greater influence on the final decision compared to less successful models. Thus, the ensemble combines the strengths of individual models while minimizing their weaknesses, thereby improving overall model performance.

Moreover, the fact that models with different architectures approach the same problem from various perspectives enables more effective learning of different features in the data. This diversity helps balance out the individual errors made by models when combined. As a result, the ensemble can make highly accurate decisions while reducing the risk of overfitting and improving generalizability. This method is particularly beneficial for complex and noisy datasets, offering more stable and reliable outcomes. To demonstrate that the developed ensemble architecture does not only perform well on the MNIST dataset, the same method was also applied to the Fashion-MNIST dataset. Compared to MNIST, Fashion-MNIST is more complex and resembles real-world images more closely, making it a suitable alternative for testing the model's generalizability. Similarly, in this dataset, the ensemble structure—formed by combining individual models-showed higher accuracy and a more balanced performance than models used individually. These results indicate that the proposed approach is effective across different types of datasets and can be successfully applied to a broader range of problems rather than being limited to a specific task. The main contribution is presented as follows:

- In this study, a weighted majority voting approach was applied to the widely used MNIST and Fashion-MNIST datasets, and successful results were achieved by combining machine learning and deep learning approaches.
- The developed ensemble model enhanced the generalization capability of deep learning models.

2. Material and Methods

2.1. Dataset

In our study, the MNIST dataset has been utilized. The MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology) dataset is a widely used collection in the field of machine learning, containing a large compilation of handwritten digits ranging from 0 to 9. This dataset consists of grayscale images with a resolution of 28x28 pixels, with each image representing a single handwritten digit. The dataset is divided into two parts: a training set and a test set. The training set comprises 60,000 examples used to train algorithms, while the test set contains 10,000 examples used to evaluate the model's performance. The MNIST-Fashion dataset, on the other hand, includes images of t-shirts, trousers, pullovers, dresses, coats, sandals, shirts, sneakers, bags, and ankle boots. It consists of a total of 70,000 images, with 60,000 images in the training set and 10,000 images in the test set. These images are also in grayscale format and have a resolution of 28x28 pixels.

2.2. Deep Learning Models

2.2.1. InceptionV3

The Inception model is considered a significant innovation in the fields of deep learning and image recognition. Developed by Google, this model aims to learn features more efficiently and effectively by using filters of various sizes within different layers. At the core of the Inception model lies the ability to detect features of an image at multiple scales simultaneously. This capability allows the model to

recognize both large objects and small details at the same time (Szegedy et al., 2016). The architecture of the InceptionV3 model is illustrated in Figure 1.

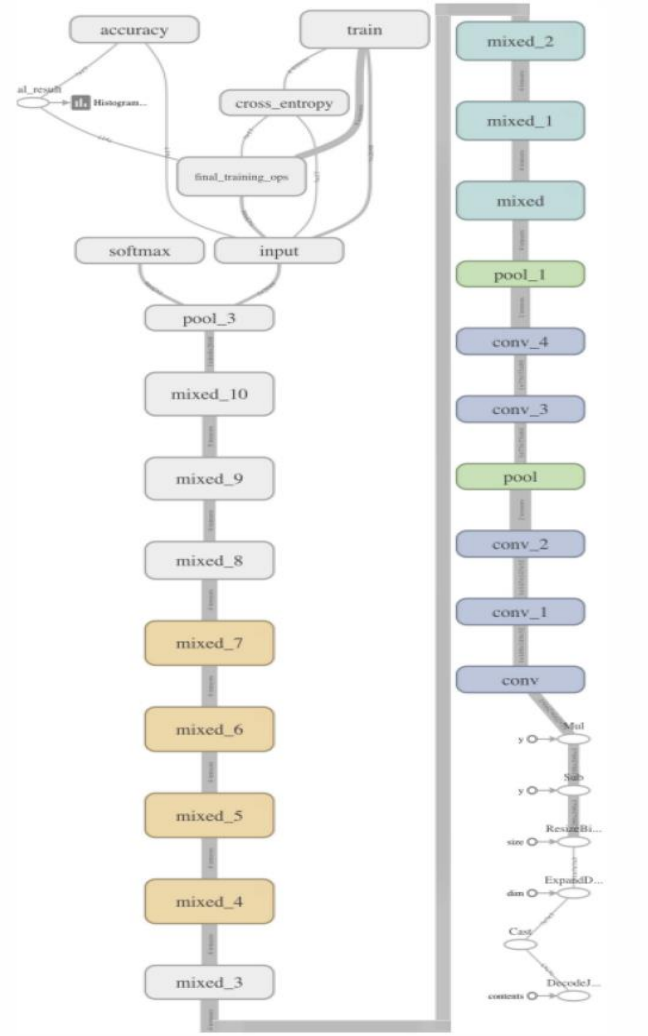


Figure 1. InceptionV3 architecture (Xia et al., 2017)

2.2.2. ResNet50

ResNet, or "Residual Network," is regarded as a significant advancement in the field of deep learning. Developed by Microsoft Research, ResNet was designed to overcome the challenges associated with training very deep neural networks. Notably, it addresses the "vanishing gradient" problem that arises as networks become deeper. This model achieved first place in the 2015 ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) (He et al., 2016). The architecture of the ResNet50 model is depicted in Figure 2.

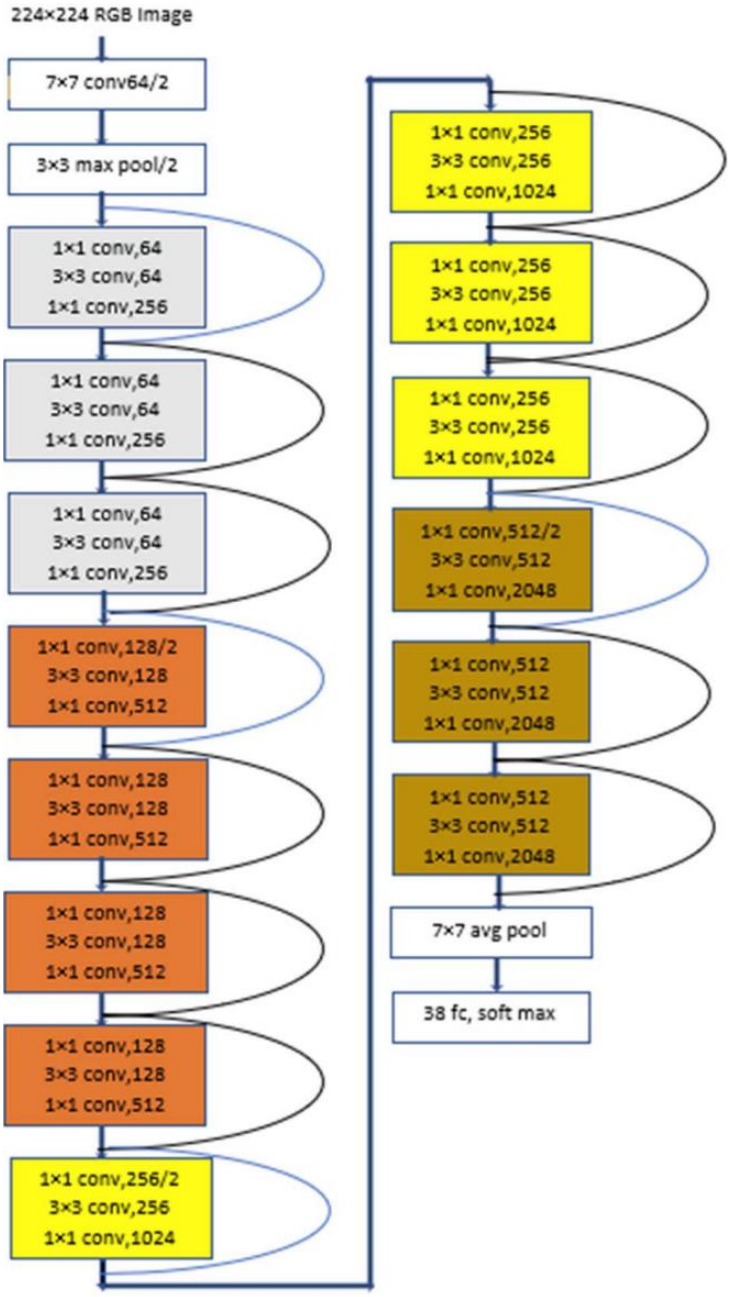


Figure 2. ResNet50 Architecture (Mukti and Biswas, 2019)

2.2.3. VGG16

VGG16 is a widely used deep learning model in the field of image recognition and processing. Developed by the Visual Geometry Group (VGG) at the University of Oxford, this model achieved second place in the 2014 ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC). It consists of 13 convolutional layers, 3 fully connected layers, and 5 max pooling layers. (Simonyan and Zisserman, 2014) The architecture of the VGG16 model is illustrated in Figure 3.



Figure 3. VGG16 Architecture (Wang et al., 2020)

2.3. Machine Learning Models

2.3.1. K-Nearest Neighbors

The k-Nearest Neighbors (kNN) algorithm is a supervised machine learning algorithm that can be used for both classification and regression problems. Due to its simplicity, understandability, and effectiveness, it is one of the most widely used machine learning algorithms. The core concept of the algorithm is based on classifying a data point according to the k nearest neighboring data points (Peterson, 2009). An example of a kNN classifier is illustrated in Figure 4.

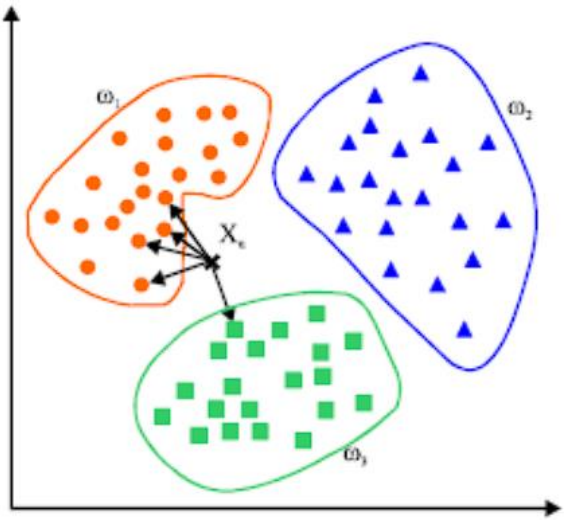


Figure 4. KNN Classifier (Fan et al., 2019)

2.3.2. Random Forest

Random Forest is a supervised learning algorithm that can be used for both classification and regression problems. It is based on decision trees and makes predictions by constructing a 'forest' of multiple decision trees. This method operates by combining the predictions of a large number of decision trees, each of which is weakly correlated with the others (Breiman, 2001). When implementing the Random Forest algorithm, parameters such as the number of trees, the depth of the trees, and the minimum number of samples required at a leaf node significantly influence the model's performance.

2.3.3. Support Vector Machine (SVM)

SVM operate on the principle of finding the optimal hyperplane that separates examples in the dataset. It uses a hyperplane (or several hyperplanes) to distinguish between examples of different classes. The primary objective is to find a hyperplane that maximizes the margin between the examples of different classes. These closest examples are called support vectors, and the position of the hyperplane is determined by these support vectors (Hearst, 1998). An example of an SVM classifier is illustrated in Figure 5.

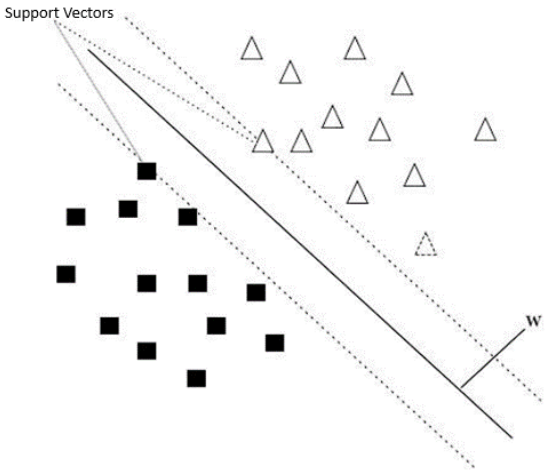


Figure 5. Support Vectors (Kaynar et al., 2018)

2.4. Ensemble Learning

Each algorithm or model has its own weaknesses. Ensemble learning allows us to mitigate these weaknesses by combining multiple models and algorithms (Zhou, 2012). This method aggregates models, enabling us to achieve better results than with individual model performances. Ensemble learning not only allows the integration of models with different architectures but also facilitates the combination of different versions of the same model trained with varying parameters. Consequently, the generalization ability improves as the models, having undergone different training processes, make collective decisions, helping to avoid overfitting. Additionally, the performance of multiple models is generally higher compared to individual models.

2.4.1. Majority Voting

Majority voting is a decision mechanism used in ensemble learning, typically applied to classification problems. In this method, each of the models used makes a prediction about which class a data point belongs to. The goal of majority voting is to aggregate all the models' predictions and select the class that receives the most votes as the predicted class. This method can enhance the overall prediction performance by leveraging the strengths of individual models. The schema of the majority voting method is illustrated in Figure 6.

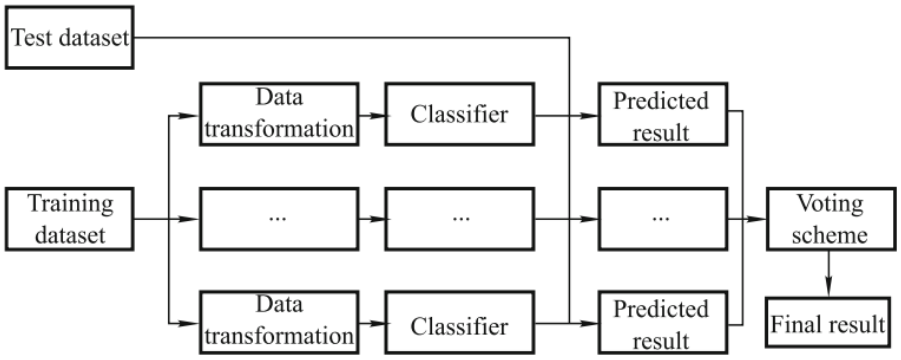


Figure 6. Majority voting scheme (Dong et al., 2020)

2.4.2. Weighted Majority Voting

The weighted majority voting method differs fundamentally from the majority voting method. In this approach, each model's vote is multiplied by a weight determined by the model's accuracy or another performance metric. During the voting process, these weighted votes are summed, and the prediction is made based on the highest total. Since the influence of each model on the outcome is proportional to its performance, this method enhances the efficiency of the ensemble model. The schema of the weighted majority voting method is illustrated in Figure 7.

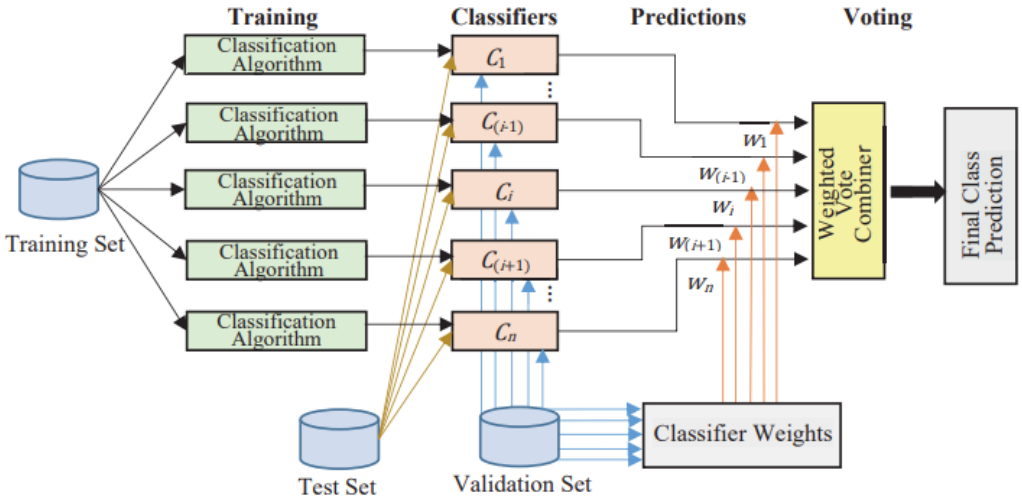


Figure 7. Weighted Majority Voting Scheme (Dogan and Birant, 2019)

In this study, an ensemble decision mechanism was implemented to combine the outputs of different deep learning and traditional machine learning models. During the decision fusion phase, instead of assigning equal weights to each model's class predictions, different weights were assigned based on their performance.

The accuracy of each model on the test data was calculated as Acc_i . These accuracy values were then normalized by dividing each model's accuracy by the total sum of all model accuracies, yielding a model-specific weight coefficient w_i, as defined in Equation (1):

$$w_i = \frac{Acc_i}{\sum_{J=1}^{n} Acc_J} \tag{1}$$

In this equation w_i represents the weight of model i, Acc_i is the accuracy of model i, Acc_J denotes the accuracy of other models, and n is the total number of models. These computed weights ensure that each model's influence in the voting process is proportional to its accuracy. For example, a model with higher accuracy will have a stronger impact on the final ensemble decision. This approach helps to overcome the limitations of traditional majority voting and reduces the effect of potential misclassifications by weaker models.

The weighted voting process is performed individually for each test sample. Each model's predicted class for a given sample is collected, and the corresponding model's weight is added to that class's score. After computing the total score for all classes, the class with the highest total score is assigned as the final prediction of the ensemble model. This process is mathematically expressed in Equation (2):

$$S_c = \sum_{i=0}^{n} w_i \cdot d_{ic} \tag{2}$$

In Equation (2), S_c is the total score of class c, representing the weighted sum of votes from all models for class c. The indicator function d_{ic} equals 1 if model i predicted class c, and 0 otherwise. If a model predicts class c, it contributes to the total score by its weight; if not, it contributes nothing. The final class prediction is determined as shown in Equation (3):

$$\hat{y} = arg\,max\, S_c \tag{3}$$

The final decision is made by selecting the class with the highest S_c score. Through this approach, a more robust and accurate ensemble decision mechanism is achieved by leveraging the strengths of different classification models.

3. Experimental Study

In this study, the training and classification processes were conducted using the MNIST dataset, which contains a large collection of handwritten digits ranging from 0 to 9, represented as 28x28 images. For these processes, "state of the art" deep learning models were utilized. The models used are Inception-v3, ResNet, and VGG16. The results obtained from these models were evaluated based on confusion matrix parameters. The results are presented in Table 1.

Table 1. Classification results of deep learning models

Models	Accuracy	Precision	Recall	F-1 Score
Inception	0.9223	0.9217	0.9219	0.9211
ResNet	0.8805	0.8865	0.8764	0.8766
VGG16	0.9437	0.9430	0.9426	0.9427

When the models were trained individually, the VGG16 model achieved the highest accuracy with 94.37%. Subsequently, using a majority voting decision mechanism, an ensemble learning approach, the labeling was performed based on the classification results of the three models. According to this method, even if all models did not label the same class, the labeling was done according to the majority. The results obtained from these processes are presented in Table 2.

Table 2. Classification results of deep learning models using majority voting

DL Models	Accuracy	Precision	Recall	F-1 Score
Inception	0.9223	0.9217	0.9219	0.9211
ResNet	0.8805	0.8865	0.8764	0.8766
VGG16	0.9437	0.9430	0.9426	0.9427
Ensemble	0.9474	0.9478	0.9462	0.9464

As seen in Table 2, the majority voting approach yielded higher parameter values compared to the individual models. However, this study involved multi-class classification. Due to the nature of multi-class classification, it is likely that the three models might label different classes. In such cases, the multi-class classification method reflects the decision of a random model. The weighted majority voting method can address this issue. In this method, the value of the models' classification results in the decision-making process is proportional to their training accuracy. For instance, in our study, the VGG16 model provided more accurate results compared to the other models. Therefore, if a consensus is not reached during the voting process, the label provided by the VGG16 model will be considered the final label. Using this method, the classification results are as shown in Table 3.

Table 3. Classification results of deep learning models using weighted majority voting

DL Models	Accuracy	Precision	Recall	F-1 Score
Inception	0.9119	0.9137	0.9219	0.9112
ResNet	0.8889	0.8895	0.8871	0.8876
VGG16	0.9426	0.9428	0.9422	0.9415
Ensemble	0.9531	0.9521	0.9526	0.9523

Table 3 demonstrates that the weighted majority voting method increased the test accuracy to 95.31%. In the next phase of the study, to further enhance the generalization capability of our ensemble learning model, machine learning algorithms and deep learning models were combined. This approach allows us to train our model from different perspectives and achieve more accurate results with the weighted

majority voting method. Various machine learning algorithms were tested, and the kNN, Random Forest, and SVM algorithms, which yielded successful results, were included in our ensemble model. Figure 8 presents the hybrid model developed by integrating the deep learning and machine learning algorithms utilized in this study.

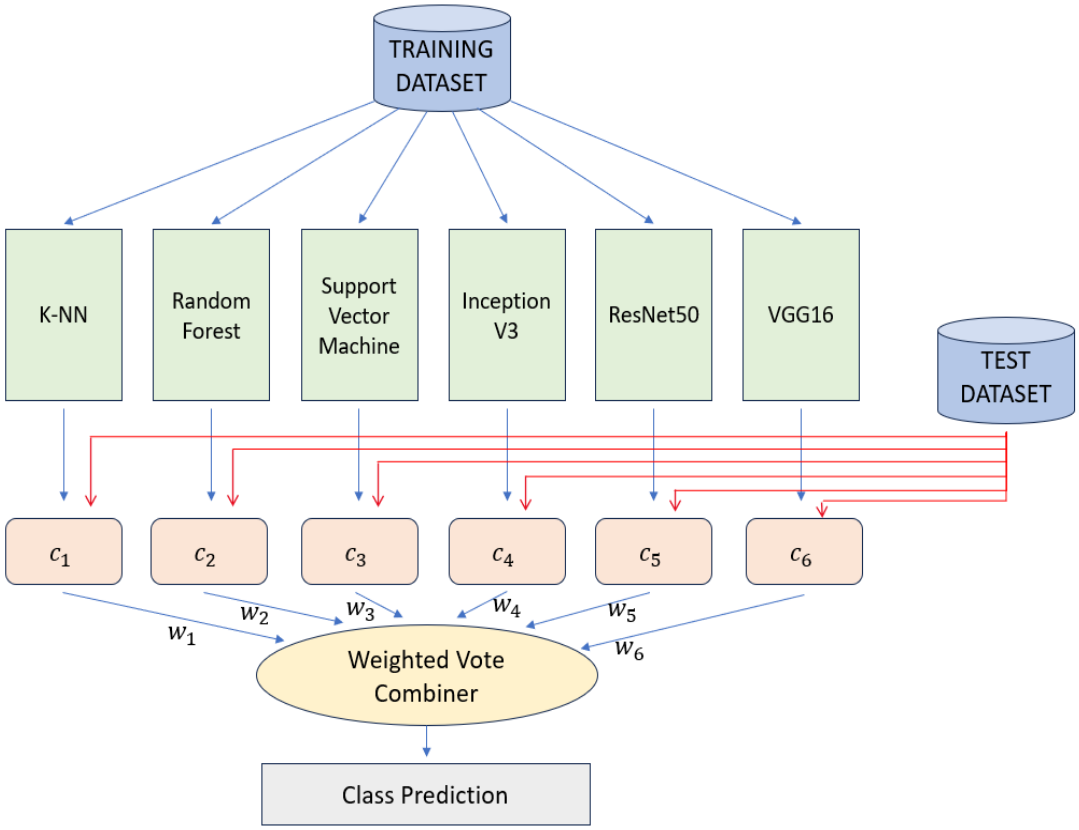


Figure 8. Weighted voting-based hybrid ensemble classification model

When examining our ensemble model, it is observed that six different classification algorithms are initially trained using the same training dataset. These models include traditional machine learning algorithms such as K-Nearest Neighbors (K-NN), Random Forest, and Support Vector Machine (SVM), alongside deep learning-based architectures including Inception V3, ResNet50, and VGG16. Each model optimizes its parameters according to its own structure during the training phase and enhances its classification capability accordingly.

Following the training phase, the test dataset is independently provided to each model to obtain predictions for the test instances. Each model generates its own prediction, denoted as $(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6)$. These individual predictions are subsequently aggregated using a weighted voting mechanism.

In the weighted voting process, each model's output is assigned a predefined weight $(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)$, which is typically determined based on the model's performance on a validation dataset. The Weighted Vote Combiner integrates these predictions along with their respective weights to determine the most probable class label. This approach enables the system to produce more

robust and reliable classification results by leveraging the collective strengths of all models, rather than relying solely on the performance of a single classifier.

In conclusion, this architecture represents an ensemble learning strategy that combines the advantages of both classical machine learning and deep learning methods. Such a hybrid system is particularly effective in complex classification problems involving heterogeneous data, often outperforming individual models in terms of both accuracy and generalization capability.

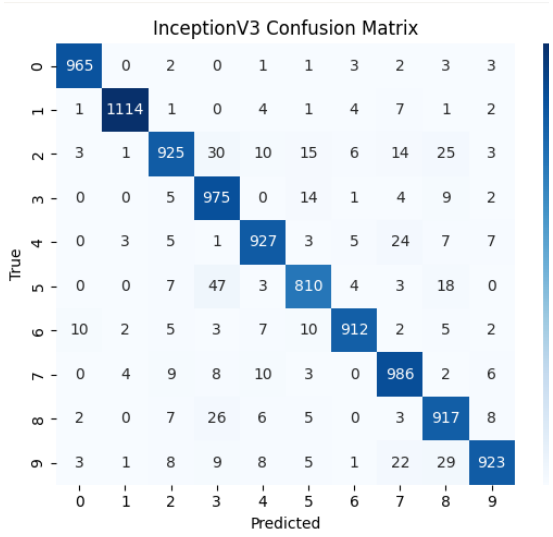
Table 4. Classification Results of MNIST dataset using deep learning models and machine learning algorithms with weighted majority voting

Models	Accuracy	Precision	Recall	F-1 Score
kNN	0.9688	0.9693	0.9685	0.9687
Random Forest	0.9700	0.9698	0.9698	0.9698
SVM	0.9661	0.9662	0.9657	0.9659
InceptionV3	0.9454	0.9458	0.9447	0.9449
ResNet50	0.9372	0.9384	0.9362	0.9366
VGG16	0.9667	0.9665	0.9661	0.9662
Ensemble	0.9837	0.9837	0.9836	0.9836

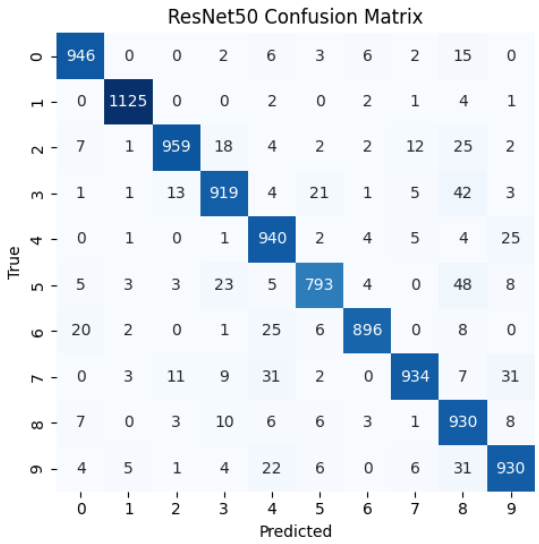
As seen in Table 4, incorporating machine learning algorithms into the ensemble model positively affected all parameters. When machine learning algorithms and deep learning models were used together, a test accuracy of 98.37% was achieved. Traditional methods can perform very well on datasets with well-structured and clearly separable classes. The distinct inter-class differences in MNIST enhance the success of these models. Since MNIST contains low-resolution and structurally simple images, it can be classified effectively without the need for highly parametric deep networks. Machine learning algorithms can form highly effective decision boundaries in such datasets. Deep learning models (InceptionV3, ResNet50, VGG16) extract complex, high-level features from images. Thanks to their multi-layered architecture, they perform particularly well on visual data. These different architectures interpret the data in diverse ways. Examples that one model might miss can be captured by another.

In this study, the performance of a custom deep learning model developed on the MNIST dataset was analyzed and the results were evaluated. However, in order to demonstrate that the model is not limited to the MNIST dataset and can also perform effectively on more complex datasets, the same architecture was tested on the Fashion-MNIST dataset.

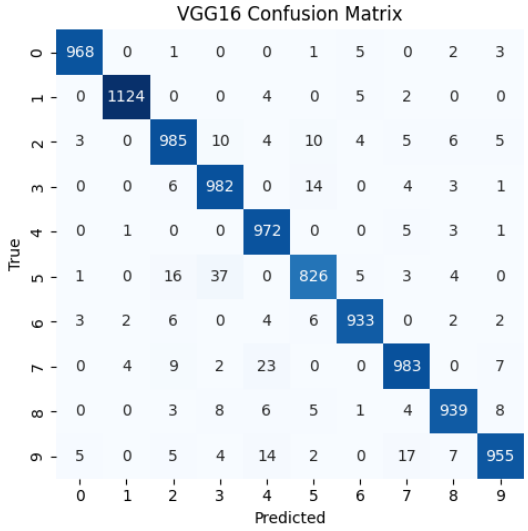
a


InceptionV3 Confusion Matrix
True
Predicted
0 965 0 2 0 1 1 3 2 3 3
1 1 1114 1 0 4 1 4 7 1 2
2 3 1 925 30 10 15 6 14 25 3
3 0 0 5 975 0 14 1 4 9 2
4 0 3 5 1 927 3 5 24 7 7
5 0 0 7 47 3 810 4 3 18 0
6 10 2 5 3 7 10 912 2 5 2
7 0 4 9 8 10 3 0 986 2 6
8 2 0 7 26 6 5 0 3 917 8
9 3 1 8 9 8 5 1 22 29 923
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

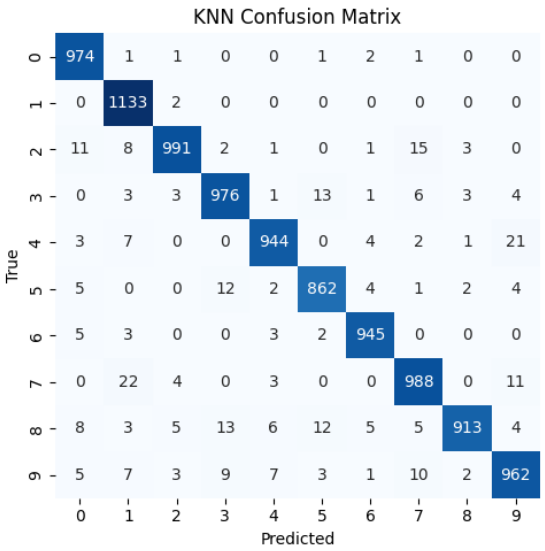
b


ResNet50 Confusion Matrix
True
Predicted
0 946 0 0 2 6 3 6 2 15 0
1 0 1125 0 0 2 0 2 1 4 1
2 7 1 959 18 4 2 2 12 25 2
3 1 1 13 919 4 21 1 5 42 3
4 0 1 0 1 940 2 4 5 4 25
5 5 3 3 23 5 793 4 0 48 8
6 20 2 0 1 25 6 896 0 8 0
7 0 3 11 9 31 2 0 934 7 31
8 7 0 3 10 6 6 3 1 930 8
9 4 5 1 4 22 6 0 6 31 930
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

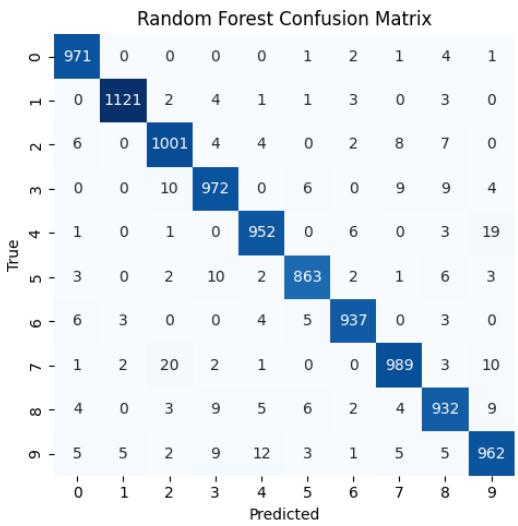
c


VGG16 Confusion Matrix
True
Predicted
0 968 0 1 0 0 1 5 0 2 3
1 0 1124 0 0 4 0 5 2 0 0
2 3 0 985 10 4 10 4 5 6 5
3 0 0 6 982 0 14 0 4 3 1
4 0 1 0 0 972 0 0 5 3 1
5 1 0 16 37 0 826 5 3 4 0
6 3 2 6 0 4 6 933 0 2 2
7 0 4 9 2 23 0 0 983 0 7
8 0 0 3 8 6 5 1 4 939 8
9 5 0 5 4 14 2 0 17 7 955
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

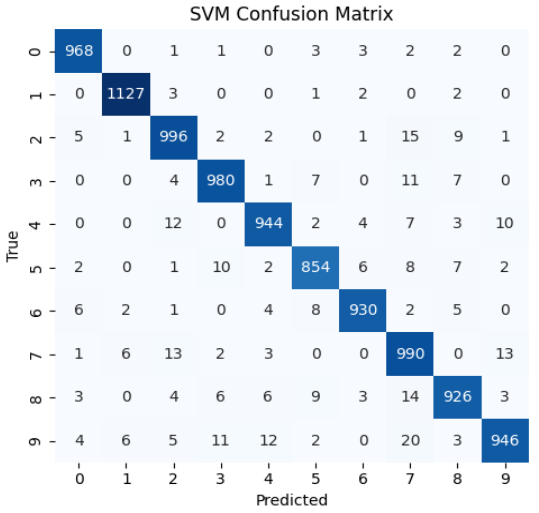
d


KNN Confusion Matrix
True
Predicted
0 974 1 1 0 0 1 2 1 0 0
1 0 1133 2 0 0 0 0 0 0 0
2 11 8 991 2 1 0 1 15 3 0
3 0 3 3 976 1 13 1 6 3 4
4 3 7 0 0 944 0 4 2 1 21
5 5 0 0 12 2 862 4 1 2 4
6 5 3 0 0 3 2 945 0 0 0
7 0 22 4 0 3 0 0 988 0 11
8 8 3 5 13 6 12 5 5 913 4
9 5 7 3 9 7 3 1 10 2 962
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

e


Random Forest Confusion Matrix
True
Predicted
0 971 0 0 0 0 1 2 1 4 1
1 0 1121 2 4 1 1 3 0 3 0
2 6 0 1001 4 4 0 2 8 7 0
3 0 0 10 972 0 6 0 9 9 4
4 1 0 1 0 952 0 6 0 3 19
5 3 0 2 10 2 863 2 1 6 3
6 6 3 0 0 4 5 937 0 3 0
7 1 2 20 2 1 0 0 989 3 10
8 4 0 3 9 5 6 2 4 932 9
9 5 5 2 9 12 3 1 5 5 962
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

f


SVM Confusion Matrix
True
Predicted
0 968 0 1 1 0 3 3 2 2 0
1 0 1127 3 0 0 1 2 0 2 0
2 5 1 996 2 2 0 1 15 9 1
3 0 0 4 980 1 7 0 11 7 0
4 0 0 12 0 944 2 4 7 3 10
5 2 0 1 10 2 854 6 8 7 2
6 6 2 1 0 4 8 930 2 5 0
7 1 6 13 2 3 0 0 990 0 13
8 3 0 4 6 6 9 3 14 926 3
9 4 6 5 11 12 2 0 20 3 946
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

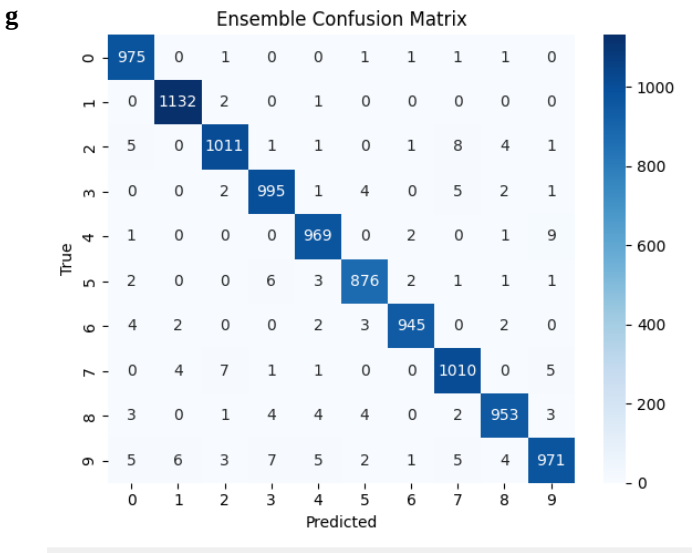


Figure 9. Confusion matrix-based comparison of classification model performances on the mnist dataset

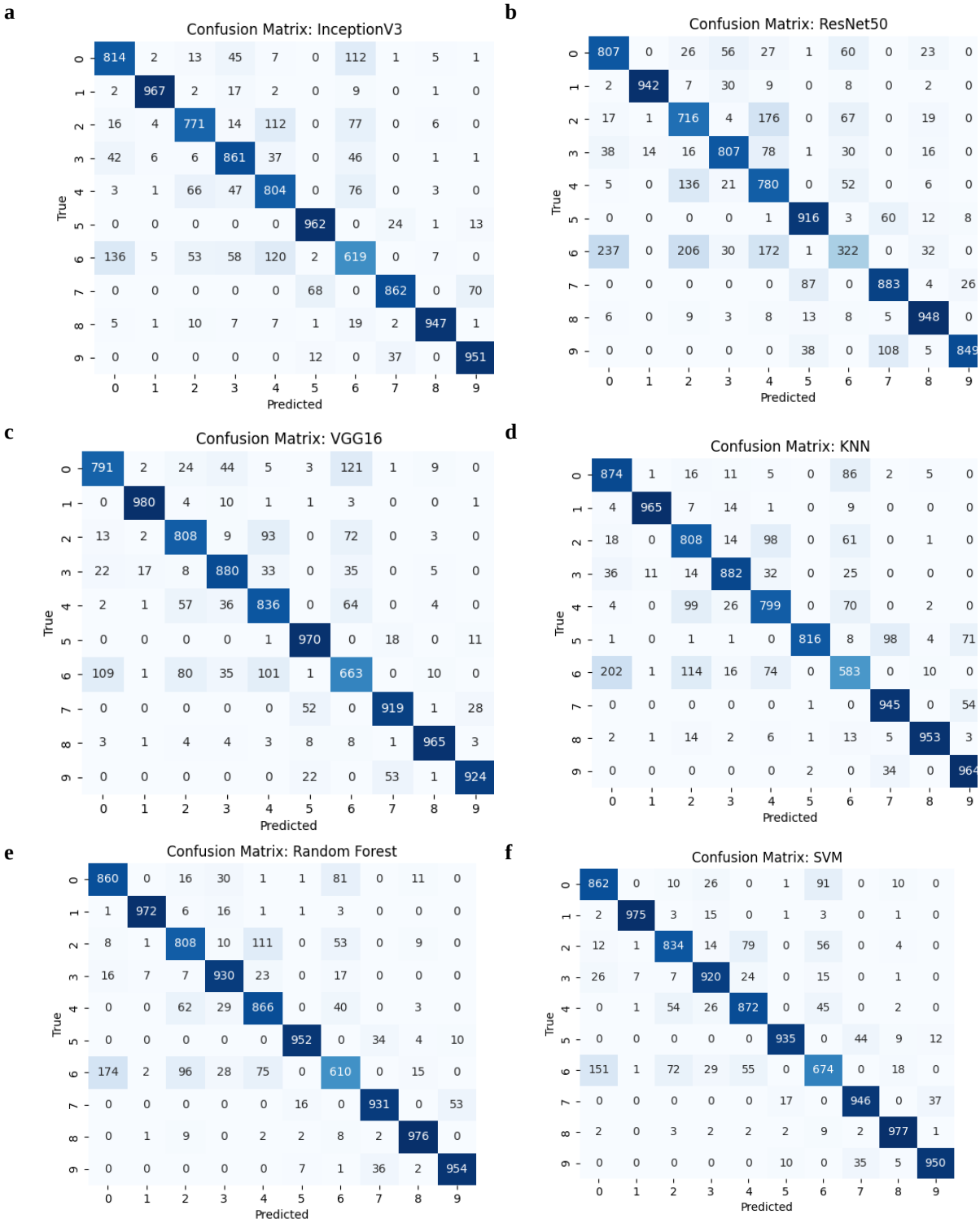
Figure 9 compares the performance of various classification models (InceptionV3, ResNet50, VGG16, KNN, Random Forest, SVM) and an ensemble model on the MNIST dataset through confusion matrices. Each matrix illustrates the models' accuracy in predicting digit classes from 0 to 9 (diagonal values) and the classes where misclassifications occur (off-diagonal values). The ensemble model demonstrates superior performance in most class predictions compared to individual models. Although some models outperform the ensemble in specific classes, the ensemble model exhibits a more balanced and robust classification performance overall.

The weights assigned to the ensemble model during the decision-making process are determined as follows: 0.1643 (16.43%) for InceptionV3, 0.1629 (16.29%) for ResNet50, 0.1680 (16.80%) for VGG16, 0.1684 (16.84%) for KNN, 0.1686 (16.86%) for Random Forest, and 0.1679 (16.79%) for SVM. These weights proportionally reflect each model's contribution to the ensemble prediction based on its accuracy performance; for instance, Random Forest holds the highest weight (16.86%), while ResNet50 contributes the least (16.29%). This distribution enables the ensemble model to achieve a more balanced predictive capability, compensating for the weaknesses of individual models and facilitating higher overall accuracy on the MNIST dataset.

Table 5. Classification results of fashion-mnıst dataset using weighted majority voting

Models	Accuracy	Precision	Recall	F-1 Score
kNN	0.8589	0.8614	0.8589	0.8580
Random Forest	0.8859	0.8845	0.8859	0.8842
SVM	0.8945	0.8937	0.8945	0.8937
Inception	0.8558	0.8566	0.8558	0.8556
ResNet	0.7970	0.7962	0.7970	0.7908
VGG16	0.8736	0.8734	0.8736	0.8732
Ensemble	0.9022	0.9015	0.9022	0.9013

The classification results of our model on the Fashion-MNIST dataset are presented in Table 5. The obtained data indicate that our ensemble model achieved better results than the individual models, reaching an accuracy of 90.22%.



g

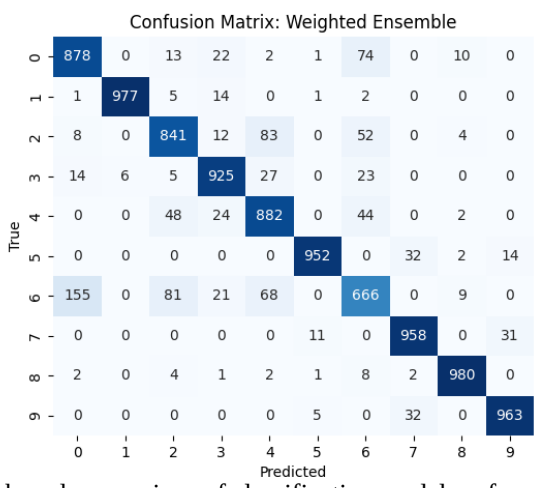


Figure 10. Confusion matrix-based comparison of classification model performances on the fashion-mnist dataset

In Figure 10, the confusion matrix performances of various classification models and the ensemble model on the Fashion-MNIST dataset are compared. Similar to the MNIST dataset, the ensemble model yields more balanced and robust results on the Fashion-MNIST dataset. The weights assigned to the ensemble model during the decision-making process are determined as follows: 0.1657 for InceptionV3, 0.1543 for ResNet50, 0.1691 for VGG16, 0.1663 for KNN, 0.1715 for Random Forest, and 0.1732 for SVM. These weights proportionally reflect each model's contribution to the ensemble prediction based on its accuracy performance; for instance, SVM holds the highest weight (0.1732), while ResNet50 contributes the least (0.1543).

4. Conclusion and Discussion

The aim of this study was to demonstrate that ensemble learning approaches yield more successful results compared to the performance of individually working models and algorithms. Therefore, the MNIST dataset, which is frequently used in classification studies, was employed. Each model or algorithm has its own unique architecture and features derived during the training process. Consequently, the generalization ability of the architecture created with ensemble learning approaches has improved, and the model performance has surpassed that of individually working models. As seen in Table 2, the individual performances of the models are lower compared to the majority voting. However, even though model accuracy has increased, the classification performance of each model is not at the same level. Therefore, a weighting method was devised to determine the influence of each model on the final decision based on their performance. As shown in Table 3, the classification results using this method indicate that the accuracy of the weighted majority voting increased to 95.31%. Subsequently, machine learning algorithms were added to the created architecture. Due to their inherent differences, deep learning models and machine learning algorithms operate in distinct manners. The goal was to cover the weaknesses of the model and enhance its generalization ability. The weighted

majority voting method was used once again. As seen in Table 4, the addition of machine learning algorithms increased the model's diversity and generalization ability, raising the accuracy to 98.37%. To measure the success of the ensemble model, classification tasks were also performed on the Fashion-MNIST dataset. Upon examining the data in Table 5, it is evident that the individual performance of deep learning models and machine learning algorithms lagged behind that of the ensemble model. When the weighted majority voting method was applied, the accuracy increased to 90.22%. This demonstrates that the success of the ensemble model is not confined to a single dataset and that its generalization ability has improved. In future studies, instead of solely considering the accuracy parameter when determining weights in the weighted majority voting method, more complex weight calculation methods could be used, or weight calculations could be tailored to the specific dataset. Although this process may increase computational costs, it can optimize the influence of models on decisions and enhance classification success. Since the model we developed has a high generalization capacity, it is likely to achieve similarly high accuracy across various datasets. In related studies, instead of relying solely on accuracy for determining weights in the weighted majority voting method, more complex weighting schemes can be employed, or the weighting process can be customized for specific datasets. Although this increases computational cost, it can enhance classification performance by optimizing the contribution of each model to the final decision. The main disadvantage of this method is the computational burden, as ensemble approaches require training multiple models, leading to increased resource consumption.

Conflict of Interest Statement

There is no financial conflict of interest with any institution, organization, or individual regarding our manuscript titled "Ensemble Learning Approach on MNIST/Fashion MNIST Dataset Using Weighted Majority Voting". Additionally, there is no conflict of interest among the authors.

Author Contributions Statement Summary

All authors contributed equally to the manuscript.

References

Breiman L. Random forests. Machine Learning 2001; 45: 5-32.

Cayir A., Yenidogan I., Dag H. Feature extraction based on deep learning for some traditional machine learning methods. 2018 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), IEEE 2018; 494–497.

Dogan A., Birant DA. Weighted majority voting ensemble approach for classification. 4th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), IEEE 2019; 366–371. IEEE.

Dong X., Yu Z., Cao W., Shi Y., Ma Q. A survey on ensemble learning. Frontiers of Computer Science 2020; 14(2): 241–258.

Fan GF., Guo YH., Zheng JM., Hong WC. Application of the weighted k-nearest neighbor algorithm for short-term load forecasting. Energies 2019; 12(5): 916.

Guo Y., Wang X., Xiao P., Xu X. An ensemble learning framework for convolutional neural network based on multiple classifiers. Soft Computing 2020; 24(5): 3727–3735.

He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE 2016; 770-778.

Hearst MA., Dumais ST., Osuna E., Platt, J., Scholkopf B. Support vector machines. IEEE Intelligent Systems and Their Applications 1998; 13(4): 18-28.

Kaynar O., Arslan H., Görmez Y., Işık YE. Makine öğrenmesi ve öznitelik seçim yöntemleriyle saldırı tespiti. Bilişim Teknolojileri Dergisi 2018; 11(2): 175-185.

Mukti IZ., Biswas D. Transfer learning based plant diseases detection using ResNet50. 4th International Conference on Electrical İnformation and Communication Technology (EICT) 2019; 1-6.

Peterson LE. K-nearest neighbor. Scholarpedia 2009; 4(2): 1883.

Shehab M., Kahraman N. A weighted voting ensemble of efficient regularized extreme learning machine. Computers & Electrical Engineering 2020; 85: 106639.

Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:1409.1556 2014; 1409.

Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna, Z. Rethinking the inception architecture for computer vision. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2016; 2818-2826.

Thamaraiselvan S., Venugopal V., Vekkot S. Interpretable handwritten digit classification: analyzing feature extraction and explainable AI on the extended MNIST Dataset. 13th International Conference on System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART) 2024; 591-597.

Vasheghani S., Sharifi S. Dynamic ensemble learning for robust ımage classification: A model-specific selection strategy. Available at SSRN 5215134.

Wang P., Fan E., Wang P. Comparative analysis of image classification algorithms based on traditional machine learning and deep learning. Pattern Recognition Letters 2021; 141: 61-67.

Wang W., Tian J., Zhang C., Luo Y., Wang X., Li J. An improved deep learning approach and its applications on colonic polyp images detection. BMC Medical Imaging 2020; 20: 1-14.

Wardoyo R., Musdholifah A., Pradipta GA., Sanjaya INH. Weighted majority voting by statistical performance analysis on ensemble multiclassifier. Fifth International Conference on Informatics and Computing (ICIC), IEEE 2020; 1-8.

Xia X., Xu C., Nan B. Inception-v3 for flower classification. In 2017 2nd international conference on image, vision and computing (ICIVC), IEEE 2017; 783-787.

Xiao H., Rasul K., Vollgraf R. Fashion-mnist: a novel image dataset for benchmarking machine learning algorithms. arXiv preprint arXiv:1708.07747 2017.

Zhang X., Liu S., Wang X., Li Y. A fragmented neural network ensemble method and its application to image classification. Scientific Reports 2024; 14(1): 1–16.

Zhou ZH. Ensemble methods: foundations and algorithms. CRC Press 2012.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2311-2326, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2311-2326, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Maden Endüstrisinde L Tipi Matris ve SWARA Yöntemlerine Dayalı Riskleri Değerlendirme ve Önceliklendirme Modeli: Örnek Bir Uygulama

Onur DOĞAN[1]*

[1]Gümüşhane Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, Gümüşhane

[1]https://orcid.org/0000-0001-8231-9872[1]
*Sorumlu yazar: onurdogan@gumushane.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 22.02.2025
Kabul tarihi:22.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
L tipi matris
SWARA
Risk önceliklendirme
İş sağlığı ve güvenliği
Çok kriterli karar verme
Madencilik sektörü

ÖZ

Maden zenginleştirme tesisleri, içerdiği yüksek riskli süreçler (gürültü, titreşim, toz, kimyasallar vb.) nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından kapsamlı şekilde ele alınması gereken bir alandır. Bu çalışmada ise, L tipi matris yöntemiyle riskler tespit edilmiş, SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemi ile de ağırlıklandırılmıştır. İlk aşamada, L tipi matris kullanılarak madencilik üretim süreçlerinden kaynaklanan riskler sistematik olarak belirlenmiş ve skorlanmıştır. Yapılan çalışma pilot bir çalışma olduğundan 135 riskten yalnızca 12 risk analize dahil edilmiştir. Daha sonra bu riskler, uzman görüşüne dayalı olarak SWARA yöntemi ile göreceli önemi hesaplanarak ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirilmiştir**.** Çalışma**,** madencilik sektöründe iş güvenliği yönetimini daha sistematik hale getirmek ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin nasıl daha fazla etkin kullanılabileceğini ortaya koymayı hedeflemektedir. Ayrıca bu çalışma ile iş güvenliği uzmanlarının kritik durumlarda karar verme süreçlerini olumlu ve minimum düzeye indirmesi birincil önceliktir. Yapılan analiz sonucunda, R.2 kriteri**,** 0,19 W_J ağırlık değeri ile en yüksek önem düzeyine sahip kabul edilemez risk olarak belirlenmiştir. Çok tehlikeli riskler kategorisinde K.1 kriteri**,** 0,27 W_J önem ağırlığı ile en kritik risk olarak tespit edilmiştir. Bu verilere dayanarak çalışma sonucunda, madencilik sektöründe proaktif bir risk yönetimi yaklaşımının benimsenmesi gerektiği vurgulanmış ve potansiyel riskler karşısında koruyucu ve önleyici tedbirlere değinilmiştir.

A Risk Assessment and Prioritization Model Based on L-Type Matrix and SWARA Methods in the Mining Industry: A Case Study

Research Article

Article History:
Received: 22.02.2025
Accepted: 22.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
L-type matrix
SWARA
Risk prioritization
Occupational health and safety,
Multi-criteria decision-making,
Mining industry.

ABSTRACT

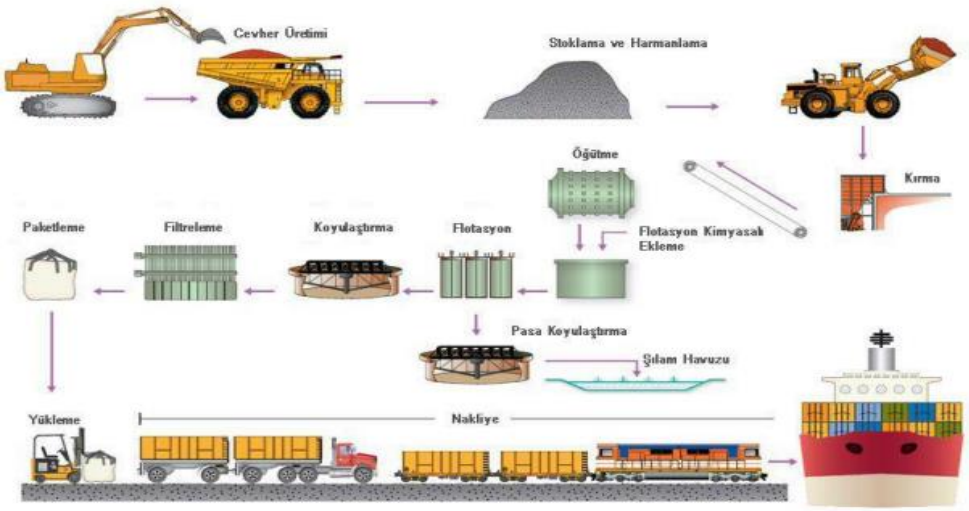
Mineral processing plants are facilities that require comprehensive evaluation in terms of occupational health and safety (OHS) due to the high-risk processes they involve (such noise, vibration, dust, chemicals, etc.). In this study, risks were identified using the L-type matrix method and weighted using the SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) method. In the first stage, risks arising from mining production processes were systematically identified and scored using the L-type matrix. Since this is a pilot study, only 12 out of 135 identified risks were included in the analysis. These risks were then weighted by calculating their relative importance based on expert opinions using the SWARA method. The study aims to make occupational safety management in the mining sector more systematic and to

demonstrate how Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods can be used more effectively. Additionally, this study primarily aims to support occupational safety experts in making quicker and more effective decisions during critical situations. As a result of the analysis, the R.2 criterion was identified as an unacceptable risk with the highest level of importance, with a weight value of 0.19 (WJ). Within the category of very high-risk factors, the K.1 criterion was determined as the most critical risk with a weight of 0.27 (WJ). Based on these findings, the study emphasizes the necessity of adopting a proactive risk management approach in the mining sector and highlights the importance of implementing preventive and protective measures against potential hazards.

To Cite: Doğan O. Maden Endüstrisinde L Tipi Matris ve SWARA Yöntemlerine Dayalı Riskleri Değerlendirme ve Önceliklendirme Modeli: Örnek Bir Uygulama. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2311-2326.

1. Giriş

Maden ocaklarından çıkarılan cevherler, doğrudan ticari kullanıma sunulamaz işlenmeleri gerekmektedir. Bu süreç, cevherin kırma, öğütme ve sınıflandırma gibi aşamalardan geçtiği ve fiziksel ya da kimyasal yöntemlerle zenginleştirildiği "cevher hazırlama" işlemlerini kapsamaktadır (Dold, 2008). Cevher hazırlama tesisleri, karmaşık yapıya sahip olup, süreçler sonucunda katı, sıvı ve gaz formunda çeşitli atıklar ortaya çıkmaktadır. Özellikle sulu işlemlerden geçen atıklar, kullanılan kimyasallara bağlı olarak farklı bileşenler içerebilmektedir. Zenginleştirme yöntemine göre atıkların içeriği değişiklik göstermekte; bazıları yalnızca doğal minerallerden oluşurken, bazıları siyanür, sülfür, yağ asitleri, alkol ve kostik gibi tehlikeli maddeler barındırabilmektedir (Hacıfazlıoğlu ve Şahin, 2023). Atık miktarı ve tehlikesi, işlenen cevherin türüne göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin, altın ve gümüş tesislerinde atıklar büyük oranda siyanür içerirken, demir ve mangan gibi cevherlerde atık oranı daha düşüktür. En tehlikeli atıklar ise radyoaktif mineraller içeren tesislerde meydana gelmektedir (Dold, 2008; Aston ve ark., 2003). Türkiye'de 1000 civarında cevher hazırlama tesisi bulunmaktadır. Bu tesisler, endüstriyel hammaddeler (kalsit, barit, kuvars, bor, feldispat, olivin, kaolen, bentonit, perlit gibi), metalik madenler (altın, bakır, gümüş, çinko, krom, manganez, demir gibi) ve enerji hammaddeleri (kömür, linyit gibi) gibi çeşitli hammadde türlerini işleyerek üretim yapmaktadır. Ayrıca, çimento, cam ve seramik sektörlerine entegre tesislerde de cevher hazırlama süreçlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Hacıfazlıoğlu ve Şahin, 2023). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan 2022 yılı verilerine göre, maden işletmelerinden kaynaklanan toplam tehlikeli atık miktarı 26 milyon 309 bin 170 ton olarak belirlenmiştir (TÜİK, 2022). Şekil 1'de örnek bir metal cevher zenginleştirme tesis akış şemasına yer verilmiştir.



Şekil 1. Bir metal madeninin zenginleştirme tesis akış şeması (Helvacıoğlu, 2016)

Bu çalışmada, bir maden cevher zenginleştirme tesisinde risk değerlendirme sürecini daha kapsamlı ve sistematik hale getirmek amacıyla L tipi matris yöntemi ile SWARA analiz yöntemi bir arada kullanılmıştır. L tipi matris yöntemi**,** iş kazaları ve mesleki risklerin analizinde şiddet ve olasılık faktörlerine dayalı olarak risk seviyelerini belirlemeye odaklanırken**,** SWARA yöntemi ise uzman görüşlerini kullanarak kriter ağırlıklarını belirlemekte ve karar sürecine daha analitik bir yaklaşım kazandırmaktadır. Bu iki yöntemin birleşik kullanımı, karar vericilere sadece daha net ve doğru bir analiz sağlamakla kalmaz, aynı zamanda risk yönetimi, kaynak tahsisi ve stratejik planlamalar konusunda çok daha güvenilir bir temel oluşturmaktadır. Her iki yöntemin birlikte kullanılması, risk faktörlerinin sadece geleneksel yöntemlerle değerlendirilmesi yerine önceliklendirilmesini, ağırlıklandırılmasını ve daha stratejik önlemler alınmasını da sağlamaktadır. L tipi matris yöntemi ile risklerin seviyeleri belirlenmektedir. SWARA yöntemi ise, uzman görüşlerine dayalı bir yöntem olduğundan subjektif ağırlıklandırma yaklaşımı benimsemektedir. Bu yöntem, ekip içindeki uzmanlardan veri toplanması ve analiz edilmesi sürecinde önemli bir rol oynayarak karar verme sürecine doğrudan katkı sağlamaktadır **(**Ekin ve Cesur, 2023). Böylece, yalnızca mevcut risklerin belirlenmesi değil, aynı zamanda bu riskler arasında en kritik olanlarının öne çıkarılması ve kaynakların en etkili şekilde yönetilmesi amaçlanmaktadır. Bu entegre yaklaşım, maden cevher zenginleştirme tesislerinde daha verimli, güvenli ve sürdürülebilir çalışma ortamları oluşturulması için yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Özellikle madencilik gibi dinamik ve risk seviyesi yüksek sektörlerde, çok kriterli karar verme yöntemlerinin geleneksel risk analiz yöntemleriyle entegre edilmesi, **iş** sağlığı ve güvenliği uygulamalarında daha doğru **ve** etkili kararlar alınmasına olanak tanımaktadır**.** Literatürde L Tipi Matris ve SWARA yöntemlerinin kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Şahin ve Eker (2024) bir mermer ocağında tehlike ve risklerin değerlendirilmesini L Tipi Matris yöntemi kullanarak tespit etmişlerdir. Doğan ve Keskin (2023) risklerin önceliklendirilmesini L Tipi Matris yöntemi ve AHP yöntemi kullanarak riskleri

önceliklendirmişlerdir. Maiti (2013), yeraltı maden işçilerini, uzmanlıkları ve görev yaptıkları bölgelere özgü özelliklere dayanarak farklı gruplara ayırmış ve bu grupların risk düzeylerini değerlendirmek için lojistik regresyon modelini kullanmıştır. Çağlar ve Demirbilek (2022) Elazığ Guleman bölgesindeki krom ocaklarında L tipi 5×5 Matris yöntemi kullanılarak yapılan risk değerlendirmesi ile tehlikeler ve riskler belirlenmiş, risklerin azaltılması için önleyici faaliyetlere yönelik çeşitli tavsiyelerde bulunmuşlardır. Özbek ve Erol (2018) AHS ve SWARA yöntemlerini kullanarak yem sektöründe iş sağlığı ve güvenliği kriterlerini ağırlıklandırmışlardır. Türkmen ve Yalçın (2022) imalat sektöründe sürdürülebilir tedarikçi seçimi için SWARA ve WASPAS yöntemlerini kullanmışlardır. Ekin ve Cesur (2023), bir danışmanlık firmasındaki riskler belirlenerek SWARA yöntemi ile önceliklendirilmiş ve en kritik riskler için stratejik önlemler geliştirmişlerdir. Akkoyun ve Ekinci (2021), yapmış oldukları çalışmada, bir yeraltı maden işletmesinde 5x5 L matris, Fine-Kinney ve HRNS yöntemleri karşılaştırmışlardır. HRNS'nin yüksek tehlike seviyesindeki riskleri belirlemede daha etkili olduğu tespit edilerek, riskli işyerleri için önermişlerdir. Doğan ve ark. (2023) bir cevher zenginleştirme tesisinde L Tipi Matris yöntemini kullanarak riskleri değerlendirmişlerdir.

Yapılan çalışma işyerlerinde çalışan, işletme ve çevre güvenliğinin sağlanması açısından literatürde tespit edilen eksikliği gidermek amacıyla yapılmış bir hibrit çalışmadır. Entegre yöntemlerin birlikte ele alınmasıyla iş yerlerinde çalışan güvenliği ile ilgili görevlendirilen iş güvenliği uzmanlarının doğru, pratik ve hızlı şekilde karar vermelerine katkı sağlamak çalışmanın en önemli unsurunu oluşturmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma, özel bir maden işletmesinin metal zenginleştirme tesisinde yapılmış bir çalışmadır. Tesiste toplam 113 çalışan bulunmakta olup üretim sürecine başlanıldığı tarihten günümüze ölümlü herhangi bir iş kazası yaşanmamıştır. Çalışmanın yapıldığı işletmenin hem İç Anadolu hem de Akdeniz bölgesinde faaliyet gösteren zenginleştirme tesisleri bulunmaktadır.

2.1. L Tipi Matris Yöntemi

Risk değerlendirme yöntemleri, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanı henüz gelişmeden önce de çeşitli sektörlerde kullanılmıştır. Özellikle yatırım kararları, askeri operasyonlar ve uzay araştırmaları gibi yüksek risk taşıyan faaliyetlerde, potansiyel tehlikelerin analiz edilmesi ve yönetilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmıştır. Bu alanlarda risklerin belirlenmesi, stratejik planlamaların ve güvenlik önlemlerinin oluşturulmasında kritik bir rol oynamıştır (Dündar, 2016). Ülkemizde, 6331 sayılı İSG Kanunu öncesinde madencilik sektöründe, iş güvenliği denetimleri fenni ve teknik nezaretçiler tarafından yürütülmekteydi. Kanunun yürürlüğe girmesiyle maden işletmeleri çok tehlikeli sınıfa alınmış ve daha sistemli risk yönetim gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu süreçte, kullanım kolaylığı ve yaygın erişilebilirliği nedeniyle 5x5 L matris yöntemi madencilikte en çok tercih edilen risk değerlendirme araçlarından biri haline gelmiştir (Okur, 2020). L tipi matris, adı üzerinde, matrisin iki

boyutlu yapısını kullanarak tehlikeleri belirli kategorilerde sıralamak ve her birinin önem derecesine göre ağırlıklandırılmasını sağlamaktadır (Özkılıç, 2005). Bu yöntemin özgünlüğü**,** her tehlikenin hem olasılık hem de ciddiyet yönünden değerlendirilmesine dayanmaktadır. Genellikle, bu iki parametre, matrisin yatay ve dikey eksenlerine yerleştirilir. Tehlikelerin sıralanmasında, risklerin tanımlanması ve değerlendirilmesi doğru önlemlerin alınabilmesi için kritik öneme sahiptir. Her bir riskin ortalama ciddiyet derecesi ve gerçekleşme olasılığı belirlenerek bir puanlama yapılmaktadır. Yapılan puanlama sayesinde, hangi risklerin öncelikli olarak ele alınması gerektiği net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemin avantajı, uzman görüşlerine dayalı olması ve tecrübelerle şekillendirilen bir analiz sunmasıdır. Tablo 2.1'de şiddet derecelendirme skalası görülmektedir.

Tablo 2.1. Şiddet Derecelendirme Skalası (Özkılıç, 2005)

Şiddet Derecelendirme	
Tanım	**Düzey Ölçeği**
İş saati kaybı yok, ilk yardım gerektiren	1 (Çok hafif)
İş günü kaybı yok, kalıcı etkisi olmayan ayakta tedavi, ilk yardım gerektiren	2 (Hafif)
Hafif yaralanma, yatarak tedavi gerektiren	3 (Orta)
Ciddi yaralanma, uzun süreli tedavi, meslek hastalığı	4 (Ciddi)
Ölüm, sürekli iş göremezlik	5 (Çok Ciddi)

Tablo 2.2'de katılımcıların dikkate almaları gereken olasılık skalası (düzey ölçeği ve sayısal ifadelerin karşılıkları) yer almaktadır.

Tablo 2.2. Olasılık Skalası (Özkılıç, 2005)

Olasılık (İhtimal)	
Tanım	**Düzey Ölçeği**
Hemen hemen hiç	1 (Çok düşük)
Çok az (yılda bir kez)	2 (Düşük)
Az (yılda bir kez)	3 (Orta)
Sıklıkla (ayda bir)	4 (Yüksek)
Çok sıklıkla (haftada bir, her gün)	5 (Çok Yüksek)

L tipi matris yöntemi, risk değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılan ve "Risk = Şiddet x Olasılık" formülüyle hesaplanan bir yaklaşımdır. Bu yöntemle, her bir risk faktörü için şiddet ve olasılık oranları çarpılarak risk skoru elde edilir. Risklerin kabul edilebilirliğini belirlemek için, hesaplanan skorlara dayanarak bir renk kodlaması uygulanır. Bu skorlama; düşük riskler için yeşil, orta düzey riskler için sarı, yüksek riskler için kırmızı ve kabul edilemeyen riskler için en yüksek kırmızı değeriyle gösterilir. Tabloya göre, risk skoru 1, yeşil renkle "önemsiz", 2 ile 6 arasında yeşil "kabul edilebilir düzey", 8 ile 12 arasında sarı "orta düzey", 15 ile 20 arasında kırmızı "yüksek düzey", ve 25 gibi bir skor ise kırmızı "kabul edilemez düzey" olarak sınıflandırılır (Özkılıç, 2005; Keskin ve ark., 2020). Bu sistem, risklerin daha hızlı ve anlaşılır bir şekilde sınıflandırılmasına olanak tanır, böylece yönetim ve müdahale stratejileri daha etkili bir biçimde oluşturulabilir. Ayrıca, bu yöntem sadece olasılık ve şiddet faktörlerini değil, riskin potansiyel etkilerinin çalışan sağlığına, ekipman güvenliğine

ve çevresel faktörlere olan etkilerini de dikkate alarak risk yönetiminde daha bütünsel bir yaklaşım sunabilmektedir.

Tablo 2.3. L Tipi Matris (Özkılıç, 2005)

Risk: Olasılık x Şiddet			**Şiddet**				
			Çok ciddi	Ciddi	Orta	Hafif	Çok hafif
			5	4	3	2	1
Olasılık	Çok yüksek	5	25	20	15	10	5
	Yüksek	4	20	16	12	8	4
	Orta	3	15	12	9	6	3
	Küçük	2	10	8	6	4	2
	Çok Küçük	1	5	4	3	2	1

2.2. SWARA Yöntemi

SWARA yöntemi, kriter ağırlıklarını belirlemede etkili bir çok kriterli karar verme yöntemidir ve tek karar vericiyle uygulanması daha kolaydır. Ancak, birden fazla karar verici olduğunda sıralama farklılıkları ağırlıklandırmada tutarsızlıklara yol açabilmektedir (Çakır, 2017). SWARA, son yıllarda kriter ağırlıklandırmada yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Keršuliene ve ark. (2010) tarafından geliştirilen bu yöntem, karar vericilerin kriterleri önem sırasına göre değerlendirmesine dayanmaktadır. SWARA yöntemi, belirlenen kriterlerin sıralanması ve karşılaştırmalı önem düzeylerinin analiz edilerek ağırlıkların hesaplanmasını içeren adımlardan oluşmaktadır (Keršuliene ve ark., 2010). SWARA yöntemi, literatürde uzman odaklı bir yaklaşım olarak bilinir ve kriter ağırlıklarını belirlerken uzman görüşlerine dayanma yeteneğiyle öne çıkarmaktadır. Uzmanlardan bilgi toplama ve bunları bütünleştirme sürecinde etkili olan yöntem, kriterlerin doğrudan önceliklendirilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, kriter ağırlıklarının önceden bilindiği durumlar için de uygundur (Aghdaie ve ark., 2013; Zolfani ve ark., 2015; Tuş Işık ve Aytaç Adalı, 2017).

Uzman görüşleri doğrultusunda, belirlenen kriterlerin problem çözüm sürecindeki önem dereceleri analiz edilerek sıralandırılır. Bu sıralama, en yüksek öneme sahip kriterden en düşük öneme sahip olana doğru, azalan bir düzen içerisinde yapılır. Böylece, karar verme sürecinde en etkili faktörler öncelikli olarak ele alınarak, çözüm önerilerinin daha verimli ve sistematik bir şekilde geliştirilmesi sağlanır. Kriterlerin birbirine göre önem düzeyleri belirlenerek sıralama yapılır. En üst sırada yer alan kriter "j. kriter" olarak adlandırıldığında, bir sonraki kriter yani "(j+1) kriter" ile arasındaki fark analiz edilir. Bu fark, ilgili kriterlerin göreceli önemini ortaya koyan bir ölçüt olup, "s_j" olarak ifade edilen ortalama değerin karşılaştırmalı önemi şeklinde tanımlanır. Bu süreç, kriterlerin etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirerek karar verme sürecinde daha bilinçli seçimler yapılmasına olanak tanır.

Kriterler için k_j Eşitlik (1)'de belirtilen formül kullanılarak hesaplanır (Keršuliene ve ark., 2010; Doğan, 2020).

$$kj = \begin{cases} 1, eğer\ j = 1 \\ sj + 1, eğer\ j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

q_j değerinin hesaplanmasında Eşitlik (2) kullanır.

$$qj = \begin{cases} 1, & eğer \ \ j = 1 \\ \frac{qj-1}{kj}, & eğer \ \ j > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Kriterlere ait ağırlıklandırmaların hesaplanmasında ise Eşitlik (3) uygulanır.

$$wj = \frac{qj}{\sum_{k=1}^{n} qk} \quad (3)$$

3. Bulgular

L tipi matris yöntemi, çeşitli yüksek risk içeren sektörlerde yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir. Bu çalışma kapsamında ise, bir cevher zenginleştirme tesisinde karşılaşılabilecek potansiyel riskleri belirlemek ve analiz etmek amacıyla kullanılmıştır (Şahin ve Eker, 2024).

Cevher zenginleştirme tesisi, madenden çıkarılan cevherin işlenerek içindeki değerli minerallerin ayrıştırıldığı ve daha saf hale getirildiği endüstriyel tesislerdir. Bu tesislerde, fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılarak ekonomik olarak değerli bileşenler geri kazanılırken, atık malzemeler ayrıştırılır.

Cevherin doğrudan kullanımını zorlaştıran yabancı maddeler bu süreçte temizlenerek daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Yapılan çalışmada bu hususlar dikkate alınarak L Tipi 5x5 Matris yöntemi ve SWARA yöntemi bütünleşik şekilde ele alınmıştır.

Tablo 3.1'de çalışmanın yapıldığı tesiste 135 risk arasından uzman görüşleri alınarak 12 kriterin yer aldığı risk değerlendirme tablosu yer almaktadır.

Tablo 3.1. Risk değerlendirme tablosu

Sıra No Kod	Tehlike-Risk	Olasılık	Şiddet	Risk Skoru	Önlem
R.1	**Sülfirik Asit** **Tehlike:** Kişisel koruyucu donanımların kullanılmaması **Etkilenen:** Asit alanında çalışanlar **Risk:** Asit tankında çalışan personelin KKD'lerini kullanmamaları sonucu olabilecek kaza.	5	5	**25** **Kabul Edilemez**	Eldiven, gözlük, yüz siperi ve asit geçirmez önlük zorunlu olmalıdır. Sülfürik asit tehlikeleri ve acil durum prosedürleri düzenli olarak anlatılmalıdır. KKD kullanımı sıkı şekilde kontrol edilmeli, ihlallere yaptırım uygulanmalıdır. Nötralizasyon istasyonları ve acil duşlar erişilebilir olmalıdır. Havalandırma sistemleri iyileştirilmeli, güvenli çalışma prosedürleri oluşturulmalıdır.
R.2	**Sülfirik Asit** **Tehlike:** Asit tankına asit doldurulması durumu **Etkilenen:** Asit alanında çalışanlar **Risk:** Asit tankına asitin dolumunun sırasında tankın taşması ile oluşacak kaza	5	5	**25** **Kabul Edilemez**	Dolum sürecinde otomatik seviye kontrol sistemleri kullanılmalıdır. Çalışanlar asit buharlarına ve sıçramalara karşı tam koruyucu ekipman giymelidir. Dolum öncesi ve sırasında seviyeler düzenli olarak takip edilmelidir. Taşma durumunda hızlı müdahale için nötralizasyon malzemeleri hazır bulundurulmalıdır.
R.3	**Sülfirik Asit** **Tehlike:** Asitin tanka aktarılmasından oluşan yoğun duman ve koku **Etkilenen:** Asit alanında çalışanlar **Risk:**Solunması sonucu akciğerlerde sorun oluşması	5	5	**25** **Kabul Edilemez**	Yoğun duman oluşumunu önlemek için güçlü havalandırma sistemleri kullanılmalıdır. Çalışanlar uygun solunum maskesi ve koruyucu gözlük takmalıdır. Havadaki asit buharı seviyesi düzenli olarak ölçülmeli ve limitler aşılmamalıdır. Solunum problemi yaşayan çalışanlar hızla temiz hava ortamına alınmalı ve tıbbi destek sağlanmalıdır.
R.4	**Sülfirik Asit** **Tehlike:** Asitin tırdan tanka aktarılma noktasında önlemler alınmaması **Etkilenen:** Asit alanında çalışanlar **Risk:** Yetersiz önlem alınması sonucu yaralanma	5	5	**25** **Kabul Edilemez**	Aktarılan yapılan alana yetkisiz personel girmemelidir.Bu alanda aktarım yaparken çalışan personeller KKD tam olmalıdır. Aktarım yapılan borunun içindeki kimyasal tamamen alt tanka aktarılmadan ve vanalar kapatılmadan çıkarılmamalıdır. Asit aktarım borusuna yetkisiz kişilerin ulaşmasını engelleyecek şekilde muhafaza yapılmalıdır. Aktarım yapılacak tırın etrafı dubalanmalıdır. Yol güzergahındaki giriş çıkışlar kontrol altına alınmalıdır.
R.5	**Sülfirik Asit** **Tehlike:** Sülfürik asitin tanktan pompayla aktarımında pompanın arızalanması **Etkilenen:** Asit alanında çalışanlar **Risk:** Hattın kaynak yerinden ayrılması sonucu yanık, yaralanma vb.	5	5	**25** **Kabul Edilemez**	Pompa ve hat bağlantıları düzenli olarak kontrol edilmeli, bakım periyotları aksatılmamalıdır. Acil durumlarda devreye girecek yedek pompa ve vana sistemleri hazır bulundurulmalıdır. Çalışanlar kimyasal sıçramalara karşı koruyucu kıyafet, eldiven ve yüz siperi kullanmalıdır. Pompa arızası durumunda otomatik kapanma mekanizmaları devreye girecek şekilde tasarlanmalıdır.
R.6	**Sülfirik Asit** **Tehlike:** Tesis içerisinde olan asit depolama tankının bulunduğu bölgeye giriş kısıtlanmaması **Etkilenen:** Asit alanında çalışanlar	5	5	**25** **Kabul Edilemez**	Asit depolama tankının bulunduğu alan, yalnızca yetkili personelin girişine izin verecek şekilde sınırlandırılmalıdır. Bölgeye uyarı tabelaları ve güvenlik bilgilendirme levhaları yerleştirilmelidir. Çalışanlar, kimyasal riskler ve güvenli çalışma prosedürleri konusunda düzenli

	Risk: Dikkatsizlik sonucu olabilecek iş kazaları				olarak eğitilmelidir. Acil durumlara karşı göz duşları, nötralize edici çözümler ve kaçış yolları hazır bulundurulmalıdır.
	PSI Cihaz Odası				
K.1	**Tehlike:** Etiketleme ve kilitleme prosedürü uygulanmaması **Etkilenen:** İlgili personel **Risk:** Prosedüre uyulmaması sonucu yaralanma	3	5	**15 Yüksek Risk**	Analizör çalışırken aşınan parçaları değiştirilmemelidir. Analizörün hareketli parçaları veya elektrikli parçaları için herhangi bir bakım, temizlik, sorun giderme veya onarım çalışmasına başlamadan önce, kilitleme – etiketleme prosedürünü gerçekleştirilmelidir. Potansiyel olarak tehlikeli bölgelerde personel varken, bakım sırasında makinenin mekanik hareketlerini manuel olarak çalıştırılmamalıdır.
	Kırma Ünitesi				
K.2	**Tehlike:** bakım onarım çalışmalarında panolarda kilitleme- etiketleme yapılmaması **Etkilenen:** Kırıcı ünitesi personeli ve diner kişiler **Risk:** Panoya müdahale sonucu ciddi kazalar meydana gelmesi	3	5	**15 Yüksek Risk**	Bakım ve onarım çalışmalarında kilitleme-etiketleme prosedürü zorunlu hale getirilmelidir. Panolara yetkisiz erişimi önlemek için kilitli güvenlik kapakları ve uyarı levhaları kullanılmalıdır. Bakım öncesi tüm enerji kaynakları kesilmeli ve çalışanlara yetkilendirme eğitimi verilmelidir. Acil durum senaryoları oluşturularak, çalışanlara düzenli tatbikatlar yaptırılmalıdır.
	Öğütme Ünitesi				
K.3	**Tehlike:** Elektrik panoları **Etkilenen**: Öğütme ünitesi personeli **Risk:** Açık iletkenler, elektrik çarpması, panolarda tozlanma sonucu yangın, pano önlerine malzeme konulması sonucu panoya müdahale edilememesi	3	5	**15 Yüksek Risk**	Elektrik panoları düzenli olarak kontrol edilmeli ve açık iletkenler izole edilmelidir. Pano çevresinde belirlenen güvenlik mesafesi korunmalı**,** önüne malzeme konulması engellenmelidir. Toz birikimini önlemek için düzenli temizlik yapılmalı ve pano içi havalandırma sağlanmalıdır. Yetkisiz kişilerin erişimi engellenmeli**,** çalışanlara elektrik güvenliği eğitimi verilmelidir.
	Öğütme Ünitesi				
K.4	**Tehlike:** Yüksekte çalışma **Etkilenen**: Öğütme ünitesi personeli **Risk:** Yüksekte çalışma sırasında düşme sonucu yaralanma	3	5	**15 Yüksek Risk**	Yüksekte çalışacak personel için uygun kişisel koruyucu donanımlar (emniyet kemeri, halat vb.) sağlanmalıdır. Çalışma alanı etrafında güvenlik bariyerleri ve uyarı levhaları yerleştirilmelidir. Yüksekte çalışanlara eğitim verilmeli**,** düşme risklerine karşı farkındalık artırılmalıdır. Çalışma sırasında uygun zemin ve merdivenler kullanılmalı, her türlü dış etken kontrol edilerek güvenlik önlemleri alınmalıdır.
	Yüzdürme Ünitesi				
K.5	**Tehlike:** Kimyasallar **Etkilenen**: Yüzdürme ünitesi personeli ve diğer kişiler **Risk:** Kimyasala temas sonucu cildin tahriş olması, göze sıçraması sonucu gözün tahrişi ve kızarıklıklar oluşması	3	5	**15 Yüksek Risk**	Kimyasal maddelerle temas öncesi ve sonrası uygun kişisel koruyucu ekipmanlar (eldiven, koruyucu gözlük, maskeler) kullanılmalıdır. Kimyasal maddelerin depolanacağı alanlar iyi havalandırılmalı ve etiketlemeler doğru yapılmalıdır. Eğitim programları düzenlenmeli**,** personelin kimyasallarla güvenli çalışma yöntemleri hakkında bilgi sahibi olmaları sağlanmalıdır. Kimyasal maddelerin sıçramasını önlemek için koruyucu bariyerler ve sızdırmaz sistemler kullanılmalıdır.

K.6	**Atık Depolama Alanı** **Tehlike:** Atık barajında sala iniş platformundaki uygunsuzluk durumu **Etkilenen**: Atık barajı çevresindeki kişiler **Risk:** Sala iniş merdivenine geçiş sırasında düşerek yuvarlanma sonucu ciddi yaralanma	3	5	**15** **Yüksek Risk**	Merdivenlerin kaymaz yüzeyle kaplanması sağlanarak, geçiş esnasında kayma riski en aza indirgenmelidir.Aydınlatma sistemi, karanlık alanları ortadan kaldıracakşekilde iyileştirilmelidir, böylece geçiş sırasında görsel engeller minimize edilir. Kişisel koruyucu donanım olarak, personelin merdivene çıkmadan önce düşme öncesi emniyet kemeri veya koruyucu (yaşam hattı, paraşüt tipi emniyet kemeri) ekipman kullanmaları sağlanmalıdır.

Tablo 3.1'de, cevher zenginleştirme tesisinde gerçekleştirilen risk değerlendirme analizinin sonuçları yer almaktadır. Bu çalışmada, iş sağlığı ve güvenliği risklerinin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi amacıyla **L Tipi Matris Yöntemi** kullanılmıştır. Yapılan çalışmada R1 den R6'ya kadar olan riskler kabul edilemez riskler, K1'den K6'ya kadar olan riskler ise çok tehlikeli riskler olarak belirlenmiş ve kodlanmıştır. Bu seçimin temel nedeni, madencilik ve cevher zenginleştirme süreçlerinde iş kazalarına ve meslek hastalıklarına yol açabilecek kritik tehlikelerin öncelikli olarak ele alınmasının gerekliliğidir. Risk değerlendirmesinde **L Tipi Matris Yöntemi** kullanılarak her bir risk faktörüne ilişkin skor değerleri hesaplanmıştır. Yapılan çalışma pilot bir çalışma niteliğinde olması nedeniyle alanında uzman kişilerin görüşlerine başvurularak **12 kritik risk faktörü SWARA yöntemi** ile önceliklendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, madencilik sektöründeki risk yönetimi süreçlerini daha sistematik ve bilimsel bir temele oturtarak, iş kazalarını ve meslek hastalıklarını en aza indirmek için karar alıcılara rehberlik etmektir.

Tablo 3.2. Kriterlerin Önem Düzeylerine Göre Sıralanması

Sıra	Karar Değişkeni	s_j	k_j	q_j	w_j
1	**R.1.**		1	1	0,016902
4	**R.2.**	0,15	1,15	6,666	0,112666
2	**R.3.**	0,1	1,1	11,5	0,194368
3	**R.4.**	0,1	1,1	11	0,185918
6	**R.5.**	0,05	1,05	22	0,371835
5	**R.6.**	0,15	1,15	7	0,118311
			SUM	**59,166**	**1**

Tablo 3.2'te SWARA yöntemi kullanılarak her bir R.1 kriteri analiz edilmiştir. Analizde katılımcılardan kabul edilemez riskler arasında karşılaştırma yapmaları istenmiş ve hesaplama sonucunda s_j değerleri elde edilmiştir. Bu işlem diğer katılımcıların vermiş olduğu cevaplara da uygulanmıştır. Daha sonra Eşitlik 1 kullanılarak her bir R. kriterlerinin k_j değeri, Eşitlik (2) kullanılarak da q_j değerleri elde edilmiştir. Son olarak her bir kriterin q_j değeri hesaplandıktan sonra her bir kriter, toplam değere ayrı ayrı bölünerek kriterlerin w_j değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik (3)). Tablo 3.3'te ise her bir kriterin w_j değerin geometrik ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Tablo 3.3. R. Kriterlerinin Ortalama Ağırlık Hesaplaması

Sıra	1. Katılımcı	2. Katılımcı	3. Katılımcı	4. Katılımcı	5. Katılımcı	Geo.Ort.	Son Ağırlıklandırma
1	0,01	0,31	0,21	0,30	0,35	0,17	**3**
2	0,11	0,22	019	0,25	0,20	0,19	**1**
3	0,19	0,18	0,18	0,18	0,13	0,18	**2**
4	0,18	0,14	0,15	0,12	0,10	0,14	**4**
5	0,37	0,07	0,12	0,07	0,10	0,12	**5**
6	0,11	0,05	0,11	0,06	0,09	0,09	**6**

Tablo 3.4'te SWARA yöntemi kullanılarak her bir K.1 kriterleri analiz edilmiştir. Analizde, katılımcılardan yüksek düzeyde riskler arasında karşılaştırma yapmaları istenmiş ve hesaplama sonucunda s_j değerleri elde edilmiştir. Daha sonra Eşitlik (1) kullanılarak her bir kriterin k_j değeri hesaplanmıştır. Eşitlik (2) kullanılarak ise q_j değeri elde edilmiştir. Son olarak her bir kriterin qj değeri hesaplandıktan sonra her bir kriter toplam değere ayrı ayrı bölünerek kriterlerin $\mathbf{w_j}$ değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik (3)).

Tablo 3.4. K. Kriterlerinin Önem Düzeyine Göre Sıralanması

Sıra	Karar Değişkeni	s_j	k_j	q_j	w_j
1	K.1.		1	1	0,225131
2	K.2.	0,3	1,3	0,76923	0,173178
3	K.3.	0,05	1,05	0,73260	0,164931
4	K.4.	0,05	1,05	0,69771	0,157077
5	K.5.	0,05	1,05	0,66449	0,149598
6	K.6.	0,15	1,15	0,57781	0,130085
			Toplam	4,44185	**1**

Tablo 3.5'te her bir katılımcının vermiş olduğu karşılaştırma sonuçlarının analiz edilmiş hali görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda risklerin önem düzeyleri her bir kriterin w_j ağırlık değerlerinin geometrik ortalaması alınarak nihai son ağırlıklandırmalar hesaplanmıştır.

Tablo 3.5. K. Kriterlerinin Ortalama Ağırlık Hesaplaması

Sıra	1. Katılımcı	2. Katılımcı	3. Katılımcı	4. Katılımcı	5. Katılımcı	Geo.Ort.	Son Ağırlıklandırma
1	0,22	0,31	0,20	0,36	0,30	0,27	1
2	0,17	0,22	0,18	0,25	0,24	0,21	2
3	0,16	0,17	0,16	0,15	0,18	0,16	3
4	0,15	0,14	0,15	0,10	0,12	0,13	4
5	0,14	0,08	0,15	0,06	0,07	0,09	5
6	0,13	0,06	0,13	0,04	0,06	0,07	6

Gerçekleştirilen analizlerin genel değerlendirmesi sonucunda, kabul edilemez riskler arasında yapılan karşılaştırmalar neticesinde **R.2 kriteri, 0,19 $\mathbf{w_j}$** önem ağırlığı ile en yüksek önem düzeyine sahip kabul edilemez risk olarak belirlenmiştir. Analizde, **R.6 kriteri ise 0,09 $\mathbf{w_j}$** değeri ile kabul edilemez riskler arasında önem düzeyi en düşük kriter olup, sıralamada altıncı sırada yer almıştır. Bu bulgular doğrultusunda, kabul edilemez riskler içerisinde en kritik unsur **R.2 kriteri** olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, **K. kriterleri** kapsamında yapılan analizlerde, en yüksek önem düzeyine sahip kriter

K.1 kriteri olup, **0,27 w_j** değeri ile en kritik kriter olarak öne çıkmıştır. Öte yandan, **K.6 kriteri, 0,077 w_j** değerine sahip olup, en düşük önem düzeyine sahip kriter olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, **K.6 kriteri, 0,07 w_j** değeri ile çok tehlikeli riskler arasında altıncı sırada yer alarak en düşük öneme sahip unsur olarak değerlendirilmiştir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Sanayide hızla ilerleyen teknoloji, üretim yöntemlerinin entegrasyonunu kolaylaştırarak birçok avantaj sağlasa da özellikle madencilik sektörü gibi yüksek risk içeren alanlarda yeni güvenlik tehditlerini de beraberinde getirmektedir. Tam otomasyon sistemleri, nesnelerin interneti ve yapay zekâ destekli uygulamalar, iş süreçlerini optimize ederek verimliliği artırsa da bu teknolojilerin yanlış yapılandırılması veya yetersiz bakımı ciddi güvenlik riskleri doğurabilmektedir. Otomasyonun yaygınlaşmasıyla birlikte çalışanların iş güvencesi konusundaki endişeleri artmakta, bu da motivasyon ve dikkat seviyelerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra, madencilik faaliyetlerinde kullanılan kimyasallar ve çevresel faktörler, çalışanların meslek hastalıklarına yakalanma riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Madencilik sektörü, yüksek kaza riski ve toplu yaralanma veya ölümle sonuçlanabilecek olayların yaşanma olasılığı nedeniyle, iş sağlığı ve güvenliği açısından çok yönlü bir yaklaşım gerektirmektedir. Risklerin sadece geleneksel yöntemlerle değerlendirilmesi yeterli olmayıp, yeni nesil analiz teknikleri, yapay zekâ tabanlı risk tahmin sistemleri ve proaktif güvenlik stratejilerinin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, işçi sağlığı, üretim güvenliği ve çevresel sürdürülebilirliği temel alan bütüncül bir iş güvenliği anlayışı benimsenerek, sektördeki risklerin en aza indirilmesi sağlanabilir.

Yapılan bu çalışmada geleneksel risk değerlendirme yöntemlerinden olan L tipi matris yöntemi ile SWARA yöntemi birlikte ele alınmıştır. Gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, kabul edilemez ve çok tehlikeli riskler arasında öncelikli olarak ele alınması gereken unsurlar belirlenmiş ve risklerin kontrol altına alınmasına yönelik çeşitli önlemler önerilmiştir. Buna göre; tanklarda dolum sırasında taşma riskini önlemek amacıyla sensör tabanlı seviye kontrol sistemleri kullanılmalıdır. Bu sistem, belirlenen maksimum seviyeye ulaşıldığında dolum işlemini otomatik olarak durdurarak taşmayı engelleyecektir. Tankların düzenli olarak basınç testi ve sızdırmazlık kontrolleri yapılmalıdır. Asit tanklarının bulunduğu alanlar asit dirençli malzemelerle kaplanmalı ve acil durum tahliye kanalları bulunmalıdır. Çalışanların, asit buharlarına ve sıçramalara karşı dayanıklı kimyasal koruyucu giysi**,** asit geçirmez eldiven**,** tam yüz koruyucu siperlik veya kimyasal koruyucu gözlük ve solunum koruyucu maske kullanmaları sağlanmalıdır. Dolum işlemi, eğitimli ve yetkilendirilmiş personel tarafından yapılmalı ve süreç gözetim altında gerçekleştirilmelidir. Asit transfer hortumları, sızdırmaz bağlantı noktaları ile donatılmalı ve tankların giriş-çıkış valfleri kilitli kontrol mekanizmaları ile korunmalıdır. Asit dökülmesine karşı nötralize edici malzemeler (örneğin kalsiyum hidroksit veya sodyum bikarbonat) hazır bulundurulmalıdır. Çalışma alanında acil göz ve vücut yıkama istasyonları bulunmalı ve çalışanlar asit yanıkları durumunda uygulanacak ilkyardım prosedürleri konusunda

çalışanlara düzenli olarak eğitim verilmelidir. Sülfürik asit buharlarının birikmesini önlemek amacıyla etkin havalandırma sistemleri ve lokal egzoz havalandırma sistemleri kurulmalıdır. Ortamda asit buharı sensörleri bulundurularak havadaki asit konsantrasyonu düzenli olarak takip edilmelidir. Ayrıca, öncelikli müdahale gerektiren risk faktörlerinin sistematik bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Yüksek öncelikli riskler için güvenlik önlemlerinin güçlendirilmesi, sülfürik asit tanklarının dolumu sırasında taşma ve sızıntıları önlemek için sensör tabanlı otomatik seviye kontrol sistemleri devreye alınmalıdır. Asit tanklarının bulunduğu alanlarda asidik ortam koşullarına dayanıklı kaplamalar kullanılmalı ve acil tahliye sistemleri geliştirilmelidir. Kimyasal maddelerle çalışan personel için kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanımı zorunlu hale getirilmeli ve çalışanlar, kimyasal maruziyetin etkileri konusunda periyodik olarak eğitilmelidir. Dolum işlemlerinde yalnızca yetkin ve eğitimli personelin görev alması sağlanmalı**,** süreçler düzenli olarak denetlenmelidir. Asit transferinde kullanılan hortumlar ve bağlantı noktaları yüksek mukavemetli ve sızdırmaz yapıda seçilmeli, giriş-çıkış valfleri kilitli kontrol sistemleri ile korunmalıdır. Ortam havasındaki asit buharı seviyeleri gelişmiş sensör sistemleri ile sürekli olarak izlenmeli ve etkin havalandırma sistemleri kurulmalıdır. Asit dökülmesine karşı nötralize edici malzemeler (örneğin kalsiyum hidroksit veya sodyum bikarbonat) çalışma alanında hazır bulundurulmalıdır. Tesis içerisinde acil göz ve vücut yıkama istasyonları kurulmalı**,** çalışanlar asit temasına karşı acil müdahale prosedürleri konusunda düzenli olarak eğitilmelidir. Risk değerlendirme süreci düzenli periyotlarla tekrar edilmeli**,** yeni teknolojik gelişmeler ve güvenlik standartlarına uygun önlemler alınmalıdır. Çalışanların maruziyet seviyeleri belirli aralıklarla ölçülmeli, iş sağlığı taramaları düzenli olarak gerçekleştirilmelidir. Yapılan analizler, iş sağlığı ve güvenliği kapsamında öncelikli olarak ele alınması gereken riskleri belirlemiş ve alınması gereken önlemleri ortaya koymuştur. Özellikle sülfürik asit dolum süreçlerinde taşma ve sızıntı risklerinin önlenmesine yönelik mühendislik ve operasyonel kontrollerin artırılması**,** çalışan güvenliğinin sağlanması açısından kritik bir gerekliliktir. Ayrıca, acil durum yönetimi, KKD kullanımı ve sürekli eğitim faaliyetleri gibi önleyici tedbirlerin uygulanması, risk seviyelerinin minimize edilmesine önemli katkı sağlayacaktır. Bu kapsamda, işletmelerin daha güvenli çalışma ortamları oluşturabilmesi için dinamik risk yönetimi yaklaşımlarını benimsemesi ve sürekli iyileştirme prensiplerini iş güvenliği politikalarına entegre etmesi büyük önem taşımaktadır. Bakım-onarım sırasında elektrik panolarına yetkisiz erişimi önlemek için kilitleme ve etiketleme prosedürleri uygulanmalıdır. Enerji kesildiğinde sesli ve görsel uyarı sistemleri devreye girmeli, test cihazlarıyla doğrulama yapılmalıdır. Çalışanlara düzenli eğitimler verilerek güvenlik farkındalığı artırılmalı ve süreçler dijital olarak takip edilmelidir. Ayrıca, kamera ve denetim mekanizmalarıyla uygulamaların eksiksiz yerine getirildiği kontrol edilmelidir. Yapılan çalışma, literatürdeki bazı çalışmalarla paralellik göstermektedir. Örneğin, Wang ve ark. (2018), kimyasal tanklar için yapılan risk analizlerinde sensör destekli otomatik seviye kontrol sistemlerinin taşma ve sızıntı risklerini önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, Hasan ve ark. (2021), asit tanklarının çevresel kaplamalarla korunmasının ve etkin havalandırma sistemlerinin kurulmasının,

kimyasal maruziyet riskini minimize ettiğini göstermiştir. Ayrıca, Çelik ve Ergin (2019) tarafından yapılan bir çalışmada kimyasal maruziyetin önlenmesinde kişisel koruyucu donanımın (KKD) etkinliğine vurgu yapılmıştır ki bu çalışma da KKD kullanımının önemini güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın farklılaştığı nokta ise risklerin sadece geleneksel değerlendirme yöntemleriyle sınıflandırılmasının ötesine geçerek SWARA yöntemiyle önceliklendirilmesi ve böylece önlem planlamasına sistematik bir bakış kazandırmasıdır. Sonuç olarak, bu çalışma literatürdeki mevcut araştırmalarla paralel şekilde risk önceliklendirmesi, mühendislik kontrolleri ve KKD uygulamalarının önemine vurgu yapmakta; ek olarak L tipi matris ve SWARA yöntemlerini bir arada kullanarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır. Bu yöntemlerin birlikte kullanımı, karar vericilerin daha etkili ve stratejik önlemler almasına olanak tanımaktadır. Ancak, literatürde de belirtildiği gibi (Baş ve Eren, 2018; Wang ve ark., 2018), bu tür analizlerin daha geniş örneklem grupları ile desteklenmesi ve farklı sektörlerde uygulanması, yöntemin genellenebilirliğini artıracaktır.

Çalışma genel olarak değerlendirildiğinde iş sağlığı ve güvenliği alanında, özellikle risk faktörlerinin önceliklendirilmesi ve etkili önlem alınması açısından bu yöntemin büyük avantajlar sağlaması beklenmektedir. L tipi matrisin sağladığı sistematik kategorilendirme ve SWARA'nın sunduğu ağırlıklandırma avantajı birlikte kullanıldığında**,** karar vericilerin daha doğru, tutarlı ve etkin stratejiler geliştirmesine olanak tanıyan özgün bir model ortaya çıkmıştır**.** Çalışmanın kısıtları; az sayıda kişiye uygulanması, analize dahil edilen kriterlerin sınırlı olması çalışma sonuçlarının genellenebilirliğini sınırlayabilir**.** Gelecekte çalışma yapmak isteyen araştırmacılar bu yaklaşımı, farklı sektörlerdeki iş güvenliği risk analizlerinde daha geniş çapta bir metodoloji olarak uygulayabilirler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Aghdaie MH., Zolfani SH., Zavadskas EK. Decision making in machine tool selection: An integrated approach with SWARA and COPRAS-G methods. Engineering Economics 2013; 24(1): 5-17.

Akkoyun Ö., Ekinci G. Farklı İSG-risk değerlendirme yöntemlerinin bir yeraltı maden işletmesinde karşılaştırmalı uygulanması ve yöntem önerisi. Bilimsel Madencilik Dergisi 2021; 60(4): 181-189. https://doi.org/10.30797/madencilik.937920.

Ashton P., Love D., Mahachi H. Appendix 2: Environmental and social impacts of mining, environmental key 2003; https://pdf.wri.org/mining_background_literature_review.pdf

Aytaç Adalı E., Tuş Işık A. Bir tedarikçi seçim problemi için SWARA ve WASPAS yöntemlerine dayanan karar verme yaklaşımı. International Review of Economics and Management 2017; 5(4): 56-77.

Baş M., Eren T. İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmelerinde matris yöntemlerinin karşılaştırılması. Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 24(2): 85-96.

Çağlar G., Demirbilek M. Krom cevher üretimi ve hazırlık galerisi yapım işleri risk değerlendirmesi. OHS Academy 2022; 5(2): 66-75. https://doi.org/10.38213/ohsacademy.1128841

Çakır E. Kriter ağırlıklarının SWARA – Copeland yöntemi ile belirlenmesi: Bir üretim işletmesinde uygulama. Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2017; 4(1): 42-56. https://doi.org/10.30803/adusobed.309069.

Çelik M., Ergin S. İş sağlığı ve güvenliği alanında teknolojik gelişmelerin etkisi. İSG Dergisi 2019; 7(1): 45-59.

Demir Şahin D., Eker H. Bir mermer ocağındaki tehlike ve risklerin değerlendirilmesi. Black Sea Journal of Engineering and Science 2024; 7(6): 1294-1301. https://doi.org/10.34248/bsengineering.1532507

Dogan O., Bozbeyoglu P., Erkoc N. Evaluation of risks by L-type (5x5) matrix method in an Ore concentration structure: A case study. International Journal of Innovative Approaches in Science Research 2023; 7(3): 75-90. https://doi.org/10.29329/ijiasr.2023.606.2

Doğan G. SWARA ve WASPAS metotlarına dayalı bir performans değerlendirme modeli. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, Yüksek Lisans Tezi, 2020.

Doğan O., Keskin MÖ. L tipi matris yöntemi ve AHP yöntemi kullanılarak risklerin değerlendirilmesi: Örnek bir uygulama. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2023; 11(4): 1282-1293. https://doi.org/10.21923/jesd.1256900.

Dold B. Sustainability in metal mining: from exploration, over processing to mine waste management, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 2008; 7(4): 275-285.

Dündar AC. Enerji üretim tesislerinde tehlike ve risk analizinde yeni interaktif bir yöntem ve uygulaması. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul, Doktora Tezi, 2016.

Ekin E., Cesur İG. Ağırlıklandırılmış risk değerlendirme tablosu ve SWARA yöntemi ile risk analizine ilişkin hibrit bir çalışma. Bucak İşletme Fakültesi Dergisi 2023; 6(2): 191-213. https://doi.org/10.38057/bifd.1328088

Hacıfazlıoğlu H., Şahin H. Cevher hazırlama tesislerinden çıkan atıklar ve yönetimi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 35(1): 119-133. https://doi.org/10.35234/fumbd.1170187.

Hasan M., Ali SM., Sarkar B. Application of IoT-based smart sensors in industrial safety: A review. Safety Science 2021; 139: 105246.

Helvacıoğlu MM. Bakır cevher zenginleştirmesi işletmesinde iş sağlığı ve güvenliğinin değerlendirilmesi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, 2016.

Keršuliene V., Zavadskas EK., Turskis Z. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). Journal of Business Economics and Management 2010; 11(2): 243-258.

Keskin MÖ., Doğan O., Ersoy S. Metalik bir yeraltı maden işletmesi, cevher çıkarma, üretim ve nakliyat aşamalarında risk değerlendirmesi. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi 2020; 9(2): 84-98.

Maiti J. Development of risk indices for underground coal mine workers in India. Mining Technology 2003; 112(2): 119-124.

Okur M. Açık kaynaklardaki risk değerlendirme raporlarının istatistiksel değerlendirilmesi. SBE, İSG ABD, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Dönem Projesi, 2020.

Özbek A., Erol E. AHS ve SWARA yöntemleri ile yem sektöründe iş sağlığı ve güvenliği kriterlerinin ağırlıklandırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2018; 20(2): 51-66. https://doi.org/10.33707/akuiibfd.451969.

Özkılıç Ö. İş sağlığı ve güvenliği, yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri. Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu (TİSK), Ankara, 2005.

TÜİK. Atık İstatistikleri, Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara, 2022. https://data.tuik.gov.tr.

Türkmen M., Yalçın MA. İmalat sektöründe sürdürülebilir tedarikçi seçim probleminin SWARA ve WASPAS yöntemleri ile çözümü. İşletme ve Karar Bilimleri Dergisi 2022; 10(2): 145-164. https://doi.org/10.15295/bmij.v10i2.1166.

Wang X., Zhang Y., Li J. Risk assessment and control measures of hazardous chemicals in storage tanks. Process Safety and Environmental Protection 2018; 116: 98-107.

Zolfani SH., Salimi J., Maknoon R., Kildienė S. Technology foresight about projects selection: application of SWARA method at the policy making level. Engineering Economics 2015; 26(5): 571-580.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2327-2335, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2327-2335, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Biyotin ile Zenginleştirilmiş Rasyonların Damızlık Bıldırcınlarda Performansa, Yumurta Kalitesine ve Kuluçka Parametrelerine Etkisi

Alpönder YILDIZ[1], Esra Tuğçe GÜL[2], Ahmet Engin TÜZÜN[3], Osman OLGUN[4*]

[1,2,4]Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, 42130, Konya
[3]Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, 09970, Aydın

[1]https://orcid.org/0000-0002-3274-7710
[2]https://orcid.org/0000-0002-2496-685X
[3]https://orcid.org/0000-0003-3493-1623
[4]https://orcid.org/0000-0002-3732-1137
*Sorumlu yazar: oolgun@selcuk.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.02.2025
Kabul tarihi:26.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Biyotin
Bıldırcın
Performans
Yumurta kalitesi
Kuluçka

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, farklı seviyelerde rasyona ilave edilen biyotinin damızlık bıldırcınlarda performansa, yumurta kalitesine ve kuluçka parametreleri üzerine etkilerini araştırmaktır. Bu çalışmada, 11 haftalık yaşta toplam 120 Japon bıldırcını (80 dişi ve 40 erkek) rastgele 4 deneme grubuna dağıtılmıştır. Her bir muamele grubu, her birinde 6 bıldırcın (2 erkek, 4 dişi) bulunan 5 tekrardan oluşturulmuştur. Çalışmada 70 günlük deneme süresi boyunca, bıldırcınlara 0,495 mg/kg biyotin içeren mısır ve soya küspesine dayalı ve 0 (kontrol), 0,20, 0,40 ve 0,80 mg/kg biyotin ilaveli 4 rasyon verilmiştir. Farklı seviyelerde ilave edilen biyotinin ortalama canlı ağırlığa, yem tüketimine, yumurta kalite özelliklerine ve kuluçka parametrelerine etkisi olmamıştır (P>0,05). Rasyona biyotin ilavesi dişi bıldırcınların canlı ağırlıklarında linear bir artış sağlamış (P<0,05), aksine erkeklerde kuadratik etki göstermiştir (P<0,05). Ortalama canlı ağırlık artışı ise rasyona biyotin ilavesi ile linear olarak artmıştır (P<0,05). Rasyona biyotin ilavesi ile damızlık bıldırcınların yumurta verimi linear olarak iyileşmiş (P<0,05), yumurta ağırlığı, yumurta kitlesi ve yem değerlendirmesi ise kuadratik (P<0,01) olarak iyileşmiş ve bu parametrelerde en iyi sonuçlar 0,40 mg/kg seviyesinde elde edilmiştir. Yumurta dış ve iç kalite özellikleri ile kuluçka sonuçları rasyona biyotin ilavesinden etkilenmemiştir (P>0,05). Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre rasyona 0,40 mg/kg (toplam 0,895 mg/kg) seviyesinde biyotin ilavesi damızlık bıldırcınların yumurta kalitesi ve kuluçka parametrelerini etkilemeksizin performansı arttırmada etkili olmuştur.

Effects of Biotin Enriched Diets on Performance, Egg Quality and Hatchability Parameters in Breeding Quails

Research Article

Article History:
Received: 24.02.2025
Accepted: 26.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Biotin
Quail
Performance
Egg quality
Hatchability

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effects of dietary supplementation of biotin at different levels on performance, egg quality, and hatchability parameters in breeder quails. In this study, a total of 120 Japanese quails (80 females and 40 males) at 11 weeks of age were randomly distributed into 4 experimental groups. Each treatment group consisted of 5 replicates with 6 quails (2 males, 4 females) each. In the study, during the 70-day trial period, diets were prepared based on corn and soybean meal containing 0,495 mg/kg biotin, and with 0 (control), 0,20, 0,40 and 0,80 mg/kg biotin added. Different biotin levels did not affect average body weight, feed consumption, egg quality traits, and hatchability parameters (P>0,05). Biotin supplementation to the diet provided a linear increase in body weights of female quails (P<0,05), whereas it demonstrated a quadratic effect in males

(P<0,05). The average body weight gain increased linearly with biotin supplementation to the diet (P<0,05). Egg production of breeder quails was linearly improved (P<0,05), egg weight, egg mass, and feed evaluation were quadratically improved (P<0,01) with biotin supplementation to the diet, and the best results in these parameters were obtained at 0,40 mg/kg level. External and internal egg quality characteristics and hatchability results were not affected by biotin supplementation to the diet (P>0,05). According to the results obtained from the study, biotin supplementation at 0,40 mg/kg (total 0,895 mg/kg) to the diet was effective in increasing the performance of breeding quails without affecting egg quality and hatchability parameters.

To Cite: Yıldız A., Gül ET., Tüzün AE., Olgun O. Biyotin ile Zenginleştirilmiş Rasyonların Damızlık Bıldırcınlarda Performansa, Yumurta Kalitesine ve Kuluçka Parametrelerine Etkisi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2327-2335.

1. Giriş

Vitaminler, büyüme, üreme ve sağlığın sürdürülmesi için hayati önem taşıyan ve genellikle µg'dan birkaç mg'a kadar değişen miktarlarda rasyonla alınması gereken organik bileşiklerdir. Bu vitaminlerden biri de suda çözünen bir vitamin olan biyotindir. Biyotin, esas olarak karboksilasyon, dekarboksilasyon ve deaminasyon reaksiyonlarındaki enzimler için koenzim görevi gören temel bir vitamindir. Koenzim görevi gördüğü enzimlerle bağlantılı olarak yağ asidi sentezi, glukoneogenez, kan glukoz seviyesi düzenlenmesi, amino asit parçalanması ve propiyonat metabolizmasındaki işlevleri sayesinde karbonhidrat, yağ ve protein metabolizmasında önemli görevler üstlenir (Mock, 2001; Berdanier ve ark., 2007; Janos ve ark., 2009). Bu nedenle, biyotin tüm çiftlik hayvanlarında büyüme, besin maddelerinin kullanımı, epitel doku sağlığının korunması ve kemik gelişimi için gerekli bir vitamindir (Quarantelli ve ark., 2007; Youssef ve ark., 2012; Yossa ve ark., 2015).

Bıldırcın üretimi, kolay yetiştirilmesi, hızlı üretim döngüleri, etine ve yumurtasına olan ilginin artması ve ekonomik sürdürülebilirlik gibi avantajları nedeniyle dünya çapında artmaktadır (Sarmiento-García ve ark., 2023). Ancak bıldırcınların besin gereksinimleri hakkındaki bilgiler oldukça yetersizdir. Bıldırcınların besin gereksinimleri genellikle NRC tarafından 1994 yılında yayınlanan verilere dayanmaktadır. Sonraki yıllarda yapılan çalışmalar bıldırcınların enerji, protein ve mineral gereksinimlerine odaklanmıştır. Ancak bıldırcınların vitamin gereksinimleri, özellikle B grubu vitaminleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlı ve yetersizdir. Biyotin, B grubu vitaminleri için gereksinim NRC (1994) tarafından 0,15 mg/kg olarak bildirilmektedir, ancak yıllar içinde değişen genetik yapıya uygun olarak gereksinimlerin güncellenmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesinin performansı iyileştirdiği (Daryabari ve ark., 2015; El-Garhy ve ark., 2019; El-Katcha ve ark., 2019; Atsen ark., 2020), yumurta iç ve dış kalite parametrelerini iyileştirdiği (Atsen ve ark., 2020) ve oksidatif stresi azalttığı (Sahin ve ark., 2004; Onderci ve ark., 2005) bildirilmiştir. Bazı çalışmaların sonuçları, rasyonla alınan biyotin takviyesi ile üreme performansı arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. Whitehead ve ark. (1985) biyotinin normal embriyonik gelişim ve embriyonun yumurtadan çıkması için gerekli olduğunu bildirmiştir. Biyotinin kanatlı hayvanlarda kuluçka parametrelerine etkisi üzerine yapılan çalışma sonuçları tartışmalıdır. İlk çalışmalarda rasyona biyotin ilavesinin kuluçka çıkış oranını arttırdığı (Bradley ve ark., 1976; Robel, 1991; Chen ve ark., 1994) ya da etkilemediği (Bradley ve ark., 1976; Chen ve ark., 1994)

bildirilmektedir. Son 10 yılda yapılan çalışmalarda da döllülüğü arttırdığı (Daryabari ve ark., 2014; 2015) veya kuluçka randımanını arttırdığı (Okasha ve ark., 2018) bildirilmektedir.

Bu araştırmanın hipotezi rasyonunun biyotin ile zenginleştirilmesinin damızlık bıldırcınların performansında ve kuluçka parametrelerinde iyileşme sağlanabileceğidir. Bu nedenle bu araştırma, rasyona artan seviyelerde biyotin ilavesinin damızlık bıldırcınların performansına, yumurta kalitesine ve kuluçka özelliklerine etkisini inceleyerek bu hayvanlar için optimum biyotin düzeyini belirlemeyi amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Araştırma Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulunun 64583101/2025/020 sayılı izni ile Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Zootekni Bölümü Bıldırcın Birimi'nde yürütülmüştür.

2.1.Materyal

Çalışmada 10 haftalık yaşta 80 adet dişi ve 40 adet erkek olmak üzere toplam 120 adet Japon bıldırcını bazal rasyona 0, 0,20, 0,40 ve 0,80 mg/kg seviyelerinde biyotin ilave edilmiş rasyonlar ile 8 hafta boyunca yemlenmişlerdir (Tablo 1). Çalışma damızlık bıldırcınlarda yürütüldüğünden dolayı ilave biyotin seviyeleri NRC (1994) tarafından yumurtlayan bıldırcınlar için önerilen (0,15 mg/kg) biyotin gereksiniminin bir miktar fazlası olan 0,20 mg/kg ve bunun katları olacak şekilde seçilmiştir. Çalışmada bazal rasyon NRC (1994)'nin yumurtlayan bıldırcınlar için önerilen biyotin içeriği hariç besin madde seviyeleri baz alınarak hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan biyotin (%2'lik) Miavit Yem Katkı Maddeleri Tic. Ltd. Şti. İzmir/Türkiye ve yem hammaddeleri de ticari bir firmadan tedarik edilmiştir. Çalışma, beş tekerrürden oluşan dört muamele grubunda yürütülmüş olup, her tekerrüre dört adet dişi ve iki adet erkek bıldırcın yerleştirilmiştir. Denemede her bir tekerrür için 45 × 30 cm alan sağlanmış ve yerleşim sıklığı 225 cm^2/bıldırcın olacak şekilde ayarlanmıştır. Çalışmada 16 saat aydınlatma programı uygulanmıştır.

2.2.Metot

Çalışmada her bir muamele grubu için hazırlanan yem, yemliklere 0,01 g'a hassas terazi ile tartıldıktan sonra verilmiş ve deneme bitiminde yemliklerde kalan yemler toplanmıştır. Yem tüketimi verilen toplam yem ve yemliklerde kalan yem miktarından g/gün/bıldırcın olarak hesaplanmıştır. Günlük olarak toplanan yumurtalarda yumurta verimi % olarak belirlenmiştir. Yumurtalar denemenin her haftasının aynı günüde tartılarak yumurta ağırlığı tespit edilmiştir. Bu verilerden yumurta kitlesi ve yemden yararlanma oranı belirlenmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan bazal damızlık bıldırcın rasyonu ve hesaplanmış besin madde içeriği

Yemler	%	Besin maddeleri	%
Mısır	53,90	Metabolik enerji, kkal/kg	2900
Soya küspesi	35,00	Ham protein	19,981
Soya yağı	3,69	Kalsiyum	2,499
Kireç taşı	5,60	Kullanılabilir fosfor	0,350
Dikalsiyum fosfat	1,14	Lisin	1,100
Tuz	0,35	Metiyonin	0,455
Premiks	0,10	Metiyonin+sistin	0,859
DL-metiyonin	0,22	Biyotin, mg/kg	0,495

[1] Premiks: rasyonun kg'ına 13.000 IU vitamin A; 5.000 IU vitamin D_3; 80 mg vitamin E; 4 mg vitamin K_3; 5 mg tiamin; 9 mg riboflavin; 0,35 mg biotin; 70 mg niasin; 25 mg pantotenik asit; 5 mg piridoksin; 2,5 mg folik asit; 0,02 mg vitamin B_{12} mg; 16 mg bakır; 1,25 mg; 20 mg demir; 120 mg manganez; 0,30 mg selenyum; 120 mg çinko sağlar.

Yumurta iç ve dış kalitesi denemenin 68-70. günlerinde toplanan toplam 210 yumurtadan tespit edilmiştir. Temiz bir zemine kırılan yumurtaların kabukları kalıntı kalmayacak şekilde temizlenerek üç gün oda sıcaklığında kurutulmuştur. Kabuk oranı kuru kabukların yumurta ağırlığına oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Yumurtanın kabuk kalınlığı orta, küt ve sivri kısımlardan alınan değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. İç kalite parametreleri için ise yükseklik mihengini kullanılarak yumurtaların ak ve sarılarının yüksekliği ve dijital kumpas yardımı ile de yumurtaların uzunluk ve genişlik ölçümleri yapılmıştır. Bu verilerden faydalanarak ak indeksi [ak yüksekliği / ((ak genişliği + ak uzunluğu) / 2)] × 100, sarı indeksi (sarı yüksekliği/sarı çapı) × 100 ve Haugh birimi ise 100 × log (ak yüksekliği + 7,57 – 1,7 × yumurta ağırlığı^{0,37}) formülleri kullanılarak bulunmuştur.

Çalışmanın 60.-67. günlerinde toplanan kuluçkalık özelliğindeki bütün yumurtalardan (n=450) döllülük ve kuluçka randımanı belirlenmiştir. Bu amaçla toplanan yumurtalar 14 gün boyunca %65 bağıl nem ve 37,7°C sıcaklıktaki kuluçka makinasının gelişim bölümünde inkübe edilmiştir. Daha sonra rastgele olarak kuluçka çıkış tepsilerine aktarıldı ve yumurtadan çıkana kadar 37,2°C sıcaklıkta ve %75 bağıl nemde tutulmuştur. Kuluçkadan çıkan civcivlerin sayısı 18 günlük inkübasyondan sonra sayılmış ve ardından muamele gruplarındaki döllülük, çıkış gücü ve kuluçka randımanı belirlenmiştir.

Veriler Minitab'da One-Way kullanılarak ANOVA'ya tabi tutulmuştur. Gruplar arasında farklılığın önemli olması durumunda Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Aynı zamanda elde edilen verilere ortogonal analiz yapılarak linear ve kuadratik etki belirlenmiştir. İstatistiksel analizler çalışmadan elde edilen ham veriler kullanılarak yapılmıştır. İstatistiksel farklılıklar ifadeleri P<0,05 olasılığına göre yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Performans

Damızlık bıldırcın rasyonlarının biyotin ile zenginleştirilmesinin performansa etkisi Tablo 2'de verilmiştir. Çalışma başlangıcında dişi, erkek ve genel ortalama bakımından gruplar arasında istatistiki farklılık bulunmamaktadır. Rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesi bıldırcınların ortalama canlı ağırlığını ve yem tüketimini etkilememiştir (P>0,05). Çalışma sonunda damızlık dişi bıldırcınların

canlı ağırlığı ve canlı ağırlık artışı rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesi ile linear olarak artmış ve 0,80 mg/kg biyotin ilaveli grupta maksimum olmuştur (P<0,05).

Tablo 2. Damızlık bıldırcın rasyonlarının biyotin ile zenginleştirilmesinin performansa etkisi

Parametreler	Biyotin ilavesi, mg/kg				SHO	M	L	Q
	0	0,20	0,40	0,80				
Dişi başlangıç CA, g	253,10	247,80	252,90	250,30	2,949	0,924	0,901	0,912
Dişi bitiş CA, g	248,90	251,00	257,30	262,80	2,577	0,217	0,044	0,921
Dişi CAD, g	-4,20	3,20	4,40	12,50	2,443	0,107	0,019	0,790
Erkek başlangıç CA, g	228,20	221,40	224,20	224,40	3,766	0,948	0,855	0,695
Erkek bitiş CA, g	234,60	214,00	214,40	232,60	2,842	0,079	0,774	0,014
Erkek CAD, g	6,40	-7,40	-9,80	8,20	3,739	0,206	0,629	0,043
Ortalama başlangıç CA, g	244,80	239,00	243,33	241,67	2,652	0,900	0,857	0,788
Ortalama bitiş CA, g	244,13	238,67	243,00	252,73	2,314	0,181	0,091	0,190
Ortalama CAD, g	-0,67	-0,33	-0,33	11,07	2,221	0,166	0,048	0,304
Yumurta verimi, %	92,71^{b}	93,00^{ab}	94,15^{a}	94,15^{a}	0,236	0,036	0,011	0,285
Yumurta ağırlığı, g	11,89^{B}	13,00^{A}	13,33^{A}	12,87^{A}	0,172	0,008	0,042	0,004
Yumurta kitlesi, g/gün/bıldırcın	11,02^{B}	12,09^{A}	12,55^{A}	12,11^{A}	0,171	0,003	0,013	0,002
Yem tüketimi, g/gün/bıldırcın	27,60	27,35	28,25	28,47	0,222	0,245	0,086	0,976
Yemden yararlanma oranı	2,503^{a}	2,265^{b}	2,257^{b}	2,345^{ab}	0,0337	0,018	0,200	0,005

$^{A, B}$: Aynı satırda farklı üst simgelere sahip ortalamalar arasındaki farklılık istatistiki olarak önemlidir (P<0,01).
$^{a, b}$: Aynı satırda farklı üst simgelere sahip ortalamalar arasındaki farklılık istatistiki olarak önemlidir (P<0,05). CA: canlı ağırlık, CAD: canlı ağırlık değişimi, SHO: Ortalamaların standart hatası, M: Muamelenin etkisi, L: Linear, Q: Kuadratik

Damızlık erkek bıldırcınların bitiş canlı ağırlığı ve canlı ağırlık artışı ise rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesinden kuadratik olarak etkilenmiştir (P<0,05). Rasyona 0,20 ve 0,40 mg/kg seviyelerinde biyotin ilavesinde erkek bıldırcınların canlı ağırlığında düşme gözlenirken, bu düşme 0,80 mg/kg biyotin ilaveli grupta telafi edildiği gözlenmiştir. Damızlık bıldırcınların ortalama canlı ağırlık artışı rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesi ile linear olarak artmış ve 0,80 mg/kg seviyesindeki biyotin ilavesi ile maksimum olmuştur (P<0,05). Önceki yıllarda yapılan çalışmalarda biyotin ilavesinin kanatlı hayvanların canlı ağırlığına etkisi değişkenlik göstermektedir. Büyüyen bıldırcın (Sahin ve ark., 2005) ve hindi (Youssef ve ark., 2012) çalışmalarında rasyona sırasıyla 0,50 mg/kg ve 2 mg/kg biyotin ilavesinin canlı ağırlığa etkisini olmadığı bildirilmektedir. Etlik piliçlerde ise 0,10-0,50 mg/kg seviyesinde biyotin ilavesinin ilk 21 gün canlı ağırlığı düşürdüğü, ancak daha sonra canlı ağırlıkta önemli bir artış olduğu bildirilmektedir (Quarantelli ve ark., 2007). Bu çalışmaların kullanılan hayvan materyali veya fizyolojik dönemleri nedeniyle mevcut çalışma ile benzerlik göstermemesi beklenen bir durumdur. Mevcut çalışma ile kısmen uyumlu olan bir çalışmada yumurta tavuklarında rasyona 0,10 mg/kg seviyesinde biyotin ilavesinin canlı ağırlığı artırdığı, daha yüksek (0,15 veya 0,20 mg/kg) biyotin ilavesinde gözlenmediği El-Garhy ve ark. (2019) tarafından belirtilmiştir. İlaveten El-Katcha ve ark. (2019) yumurtacı tavuk rasyonlarına 0,30 mg/kg seviyesinde biyotin ilavesinin canlı ağırlığı düşürdüğünü bildirmişlerdir. Damızlık bıldırcınların yumurta verimi rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesi ile linear olarak artmış ve bu artış 0,40 ve 0,80 mg/kg seviyelerinde daha belirgin olmuştur (P<0,05). Bu sonuç El-Garhy ve ark. (2019) tarafından yumurta tavuklarında (0,10, 0,15 ve 0,20 mg biyotin/kg yem) ve Daryabari ve ark. (2015) tarafından etlik piliç damızlıklarında (0,30 ve 0,45 mg biyotin/L içme suyu) biyotin ilavesinin yumurta veriminin arttığını

bildirdikleri sonuçlar ile uyumludur. Ancak farklı bir sonuç olarak El-Katcha ve ark. (2019) yumurtacı tavuk rasyonlarına 0,30 mg/kg seviyesinde biyotin ilavesinin yumurta verimini etkilemediğini bildirmişlerdir. Rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesi yumurta ağırlığında ve yumurta kitlesinde kuadratik bir artış sağlamış ve her iki parametre 0,40 mg/kg biyotin seviyesinde maksimum olmuştur (P<0,01). Atsen ve ark. (2020) içme suyuna 1-2 g/L tavukların yumurta ağırlığını arttırdığını, El-Garhy ve ark. (2019) 0,20 mg/kg biyotin yumurta ağırlığını düşürdüğünü, ancak 0,15 mg/kg ise yumurta kitlesini arttırdığını bildirmişlerdir. El-Katcha ve ark. (2019) ise yumurta tavuklarında yumurta ağırlığının ve kitlesinin rasyona 0,30 mg/kg seviyesinde biyotin ilavesinden etkilenmediğini bildirmişlerdir. Mevcut çalışmada, damızlık bıldırcınların yemden yararlanma oranı kuadarik olarak etkilenmiş (P<0,01) ve kontrol (0 mg/kg) grubuna göre rasyonun 0,20 ve 0,40 mg/kg seviyesinde biyotin ile zenginleştirilmesiyle önemli derecede iyileşmiştir. Benzer olarak El-Garhy ve ark. (2019) ve El-Katcha ve ark. (2019) yumurta tavuklarında 0,10-0,30 mg/kg YYO iyileştirdiğini bildirirlerken, büyüyen bıldırcınlarda 0,50 mg/kg seviyesinde biyotin (Sahin ve ark., 2005) ve etlik piliçlerde 0,05-0,40 mg/kg seviyesinde biyotin (Cengiz ve ark., 2012) ilavesinin YYO'yu etkilemediği bildirilmektedir. Çalışmalar arasında hayvan materyali, biyotinin farklı seviyelerde yeme veya suya ilavesi, yetiştirme şartları ve rasyon bileşimi arasındaki farklılıklar çalışmalar arasında farklılıklara neden olmaktadır. Ancak önceki yıllarda yapılan çalışmalar ve mevcut çalışma sonuçları yumurtlayan veya damızlık bıldırcınların NRC (1994) tarafından bildirilen 0,15 mg/kg seviyesinden daha yüksek biyotine gereksinimlerinin olduğu görülmektedir. Biyotinin performansta gerçekleştirdiği bu iyileşme onun karbonhidrat, yağ ve protein metabolizmasındaki olumlu etkilerinden (Mock, 2001; Berdanier ve ark., 2007; Janos ve ark., 2009) kaynaklanmış olabilir. Bu çalışma sonuçlarına göre damızlık veya yumurtlayan bıldırcınların optimum performansın devamı için rasyona 0,40 mg/kg biyotin ilavesi veya 0,895 mg/kg toplam biyotine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Ancak özellikle dişi ve erkek bıldırcınlarının biyotin ilavesine canlı ağırlık bakımından farklı tepki vermesi daha fazla çalışmaya gerek olduğunu göstermektedir.

3.2. Yumurta kalitesi

Damızlık bıldırcınların rasyonlarının biyotin ile zenginleştirilmesinin yumurta kalitesine etkisi Tablo 3'te gösterilmiştir. Yumurta kabuk kalite parametrelerinde hasarlı yumurta oranı, kabuk oranı ile kabuk kalınlığı ve yumurta iç kalite parametrelerinden sarı indeksi, albümin indeksi ile Haugh birimi rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesinden istatistiki olarak etkilenmemiştir (P>0,05). Mevcut çalışma ile benzer olarak Okasha ve ark. (2018) ve El-Katcha ve ark (2019) yumurtacı tavuk rasyonlarına 0,10-0,30 mg/kg seviyesinde biyotin ilavesinin yumurta iç kalite parametrelerini etkilemediğini bildirmişlerdir. Diğer çalışmalarda da biyotinin sıcaklık stresine maruz kalan bıldırcın rasyonlarına (Sahin ve ark., 2004) veya yumurtacı tavukların (Atsen ve ark., 2020) içme suyuna ilavesinde Haugh birimi ile yumurta sarı ve albümin ölçümlerinin etkilenmediği bildirilmiştir. Diğer taraftan El-Garhy ve ark. (2019) ve El-Katcha ve ark. (2019) yumurtacı tavuk rasyonlarına 0,10-0,30 mg/kg

seviyelerinde biyotin ilavesinin yumurta kabuk ağırlığını ve kalınlığını etkilemediğini bildirmişlerdir. Ancak Atsen ve ark. (2020) yumurta tavukların içme suyuna 2000 mg/kg biyotin ilavesinin yumurta kabuk kalınlığını ve ağırlığını iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Mevcut çalışma sonuçlarına göre damızlık bıldırcınlarda optimum yumurta kalitesi için bazal rasyonun sağladığı 0,495 mg/kg biyotinin yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 3. Damızlık bıldırcın rasyonlarının biyotin ile zenginleştirilmesinin yumurta kalitesine etkisi

Parametreler	Biyotin ilavesi, mg/kg				SHO	M	L	Q
	0	0,20	0,40	0,80				
Hasarlı yumurta oranı, %	1,08	0,00	0,34	0,15	0,278	0,562	0,396	0,440
Kabuk oranı, %	8,48	8,33	8,04	8,52	0,474	0,384	0,893	0,115
Kabuk kalınlığı, µm	228,3	219,9	222,2	234,3	3,03	0,347	0,314	0,148
Sarı indeksi	47,77	45,58	46,70	47,75	0,566	0,499	0,700	0,338
Albümin indeksi	2,64	2,54	2,81	2,55	0,046	0,126	0,726	0,193
Haugh birimi	90,38	86,95	91,36	89,37	0,680	0,111	0,882	0,959

SHO: Ortalamaların standart hatası, M: Muamelenin etkisi, L: Linear, Q: Kuadratik

3.3. Kuluçka parametreleri

Rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesinin damızlık bıldırcınlarda kuluçka parametrelerine etkisi Tablo 4'de gösterilmiştir. Damızlık bıldırcınların döllülük oranı, çıkış gücü ve kuluçka randımanı rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesinden istatistiki olarak etkilenmemiştir (P>0,05). Önceki yıllarda biyotinin damızlık kümes hayvanlarda etkisi üzerine yapılan çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Daryabari ve ark. (2014; 2015) rasyona biyotin ilavesinin (0,30-0,45 mg/kg) damızlık etlik piliçlerde döllülüğü arttırdığını ama diğer kuluçka parametrelerini etkilemediğini, Okasha ve ark. (2018) ise 0,15 mg/kg biyotinin kuluçka randımanını iyileştirdiğini ancak döllülük üzerine etkisinin (0,1-0,2 mg/kg) olmadığını bildirmişlerdir. Rasyonun biyotin ile zenginleştirilmesinin bıldırcınlarda kuluçka sonuçlarına istatistiki etkisi olmamakla birlikte damızlık yumurta sayısını istatistiki olarak arttırarak elde edilecek civciv sayısının artmasını sağladığı söylenebilir.

Tablo 4. Damızlık bıldırcın rasyonlarının biyotin ile zenginleştirilmesinin kuluçka sonuçlarına etkisi

Parametreler	Biyotin ilavesi, mg/kg				SHO	M	L	Q
	0	0,20	0,40	0,80				
Döllülük,	94,29	97,14	96,67	97,14	1,471	0,903	0,608	0,684
Çıkış gücü, %	100,00	97,50	100,00	97,14	2,857	0,583	0,429	0,858
Kuluçka randımanı, %	94,29	94,64	96,67	94,29	1,580	0,951	0,974	0,635

SHO: Ortalamaların standart hatası, M: Muamelenin etkisi, L: Linear, Q: Kuadratik

4. Sonuçlar

Bu çalışmada 0,20, 0,40 ve 0,80 mg/kg seviyelerinde damızlık bıldırcın rasyonlarına ilave edilen biyotinin yumurta kalitesine ve kuluçka parametrelerine etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak yumurta verimi, yumurta ağırlığı, yumurta kitlesi ve yem değerlendirme rasyona biyotin ilavesi ile iyileşmiştir. İlaveten rasyona biyotin ilavesi ile dişi bıldırcınların canlı ağırlıkları artmış, aksine erkek bıldırcınların canlı ağırlıkları (0,20 ve 0,40 mg/kg seviyelerinde) azalmıştır. Sonuç olarak damızlık bıldırcınların yumurta kalitesi ve kuluçka parametrelerini etkilenmeden optimum performans için

rasyona 0,40 mg/kg ilavesine veya 0,895 mg/kg rasyon toplam biyotine gereksinimlerinin olduğu tespit edilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Atsen SB., Mancha YP., Kalla DJU. Effects of supplemental biotin on yolk, albumen and external quality parameters of Noiler hen eggs. In the 45th Annual Conference of the Nigerian Society for Animal Production, 2020, Sayfa no: 98-101, 15-19 March 2020, Bauchi, Nigerian.

Berdanier CD., Dwyer JT., Feldman EB. Handbook of nutrition and food. Florida, USA: CRC Press; 2007.

Bradley JW., Atkinson RL., Krueger WF. Relationship of biotin to reproductive performance of Leghorn-type hens. Poultry Science 1976; 55: 2490-2492.

Cengiz Ö., Hess JB., Bilgili SF. Dietary biotin supplementation does not alleviate the development of footpad dermatitis in broiler chickens. Journal of Applied Poultry Research 2012; 21: 764-769.

Chen F., Noll SL., Waibel PE. Dietary biotin and turkey breeder performance. Poultry Science 1994; 73: 682–686.

Daryabari H., Akhlaghi A., Zamiri MJ., Rahimi Mianji G., Ansari Pirsaraei Z., Deldar H., Eghbalian AN. Reproductive performance and oviductal expression of avidin and avidin-related protein-2 in young and old broiler breeder hens orally exposed to supplementary biotin. Poultry Science 2014; 93: 2289-2295.

Daryabari H., Akhlaghi A., Zamiri MJ., Pirsaraei ZA., Mianji GR., Deldar H., Eghbalian AN. Oral administration of supplementary biotin differentially influences the fertility rate and oviductal expression of avidin and avidin-related protein-2 in low-and high-fertility broiler line hens. Poultry Science 2015; 94: 289-295.

El-Garhy OHM., El-Gendi GM., Okasha HM. Effect of housing system and dietary biotin supplementation on productive performance, some blood constituents and economic efficiency of Benha line chicken. Egyptian Poultry Science Journal 2019; 39: 219-234.

El-Katcha MI., Soltan MA., El-Naggar K., El-Shobokshy SA., El-Erian MA. Laying performance, fat digestibility and liver condition of laying hens supplemented with vitamin B_{12} or biotin and/or bile acids in diet. Slovenian Veterinary Research 2019; 56(Suppl 22): 341-352.

Janos Z., Wijeratne SSK., Hassan YI. Biotin. Biofactors 2009; 35: 36-46.

Mock DM. Handbook of vitamins. New York, USA: Marcel Dekker: 2001.

NRC. Nutrient Requirements of Poultry, 9th Rev. Ed. Washington, D.C. 1994.

Okasha HMA., El Garhy OHM., El-Gendi GM. Effect of housing system and dietary biotin supplementation on 2- Egg quality traits and some blood constituents. 4th International Conference on Biotechnology Applications in Agriculture (ICBAA), 2018, Sayfa no: 91-98, 4-7 April 2018, Moshtohor and Hurghada, Egypt.

Onderci M., Sahin K., Sahin N., Cikim G., Vijaya J., Kucuk O. Effects of dietary combination of chromium and biotin on growth performance, carcass characteristics, and oxidative stress markers in heat-distressed Japanese quail. Biological Trace Element Research 2005; 106: 165-176.

Quarantelli A., Cacchioli A., Romanelli S., Righi F., Alpigiani I., Gabbi C. Effects of different levels of dietary biotin on the performance and bone structure of broilers. Italian Journal of Animal Science 2007; 6: 5-7.

Robel EJ. The value of supplemental biotin for increasing hatchability of turkey eggs. Poultry Science 1991; 70: 1716–1722.

Sahin K., Onderci M., Sahin N., Gursu MF., Vijaya J., Kucuk O. Effects of dietary combination of chromium and biotin on egg production, serum metabolites, and egg yolk mineral and cholesterol concentrations in heat-distressed laying quails. Biological Trace Element Research 2004; 101: 181-192.

Sahin N., Sahin K., Onderci M., Gursu MF., Cikim G., Vijaya J., Kucuk O. Chromium picolinate, rather than biotin, alleviates performance and metabolic parameters in heat-stressed quail. British Poultry Science 2005; 46: 457-463.

Sarmiento-Garcia A., Olgun O., Kılınç G., Sevim B., Gökmen SA. The use of purple carrot powder in the diet of laying quails improved some egg quality characteristics, including antioxidant capacity. Tropical Animal Health and Production 2023; 55: 220.

Whitehead CC., Pearson RA., Herron KM. Biotin requirements of broiler breeders fed diets of different protein content and effect of insufficient biotin on the viability of progeny. British Poultry Science 1985; 26: 73–82.

Yossa R., Sarker PK., Mock DM., Lall SP., Vandenberg GW. Current knowledge on biotin nutrition in fish and research perspectives. Reviews in Aquaculture 2015; 7: 59-73.

Youssef IMI., Beineke A., Rohn K., Kamphues J. Influences of increased levels of biotin, zinc or mannan-oligosaccharides in the diet on foot pad dermatitis in growing turkeys housed on dry and wet litter. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 2012; 96: 747-761.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2336-2352, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2336-2352, 2025

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Yenilebilir Böcekler Hakkında Sağlık Eğitimi Alan Öğrencilerin Tutum Analizi

Yusuf ARSLAN[1], Sevda HASTAOĞLU ÖRGEN[2*]

[1]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, 58140, Sivas
[2]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 58140, Sivas

[1]https://orcid.org/ 0009-0009-6580-1718
[2]https://orcid.org/0000-0001-8313-2946
*Sorumlu yazar: hastaoglu@cumhuriyet.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.01.2025
Kabul tarihi:29.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Entomoloji
Yenilebilir böcekler
Entomofaji

ÖZ

Bu çalışmada, sağlık programlarında eğitim gören meslek yüksekokulu öğrencileri odak alınarak, öğrencilerin böceklere bir gıda kaynağı olarak bakış açılarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın evrenini Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulunda öğrenim gören üniversite öğrencileri oluşturmuştur. Örnekleme ise, çalışmaya katılmaya gönüllü, iletişim kurabilen 327 öğrenci dâhil edilmiştir. Veri toplama formları olarak sosyodemografik form ve böceklere karşı tutum ölçeği kullanılmıştır. Öğrencilerin genel olarak yenilenebilir böcekleri tüketmeye yönelik tutumları gösteren veriler incelendiğinde, %46' sının (n=151) böcekleri sevmediği ve %37,8'inin (n=124) böceklerden korktuğu, %57,9'unun (n=190) böceklerin gıda olarak ülkemizde tüketilmeyeceğine dair görüşleri olduğu belirlenmiştir. Böcek tüketiminin diğer kültürlerde varlığı ve besinsel faydaları kabul edilmiş olsa da özellikle iğrenme ve korku başta olmak üzere kültürel, psikolojik ve demografik faktörler öğrencilerin tutumlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Sonuç olarak yenilebilir böceklerin gelecekte sürdürülebilir gıda kaynakları arasında önemli bir yer tutacağı öngörülmektedir. Özellikle sağlık alanında öğrenim gören öğrencilerin bu konudaki tutumlarının belirlenmesinin literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Attitude Analysis of Students Receiving Health Education Towards Edible Insects

Research Article

Article History:
Received: 24.01.2025
Accepted: 29.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Entomology
Edible insects
Entomophagy

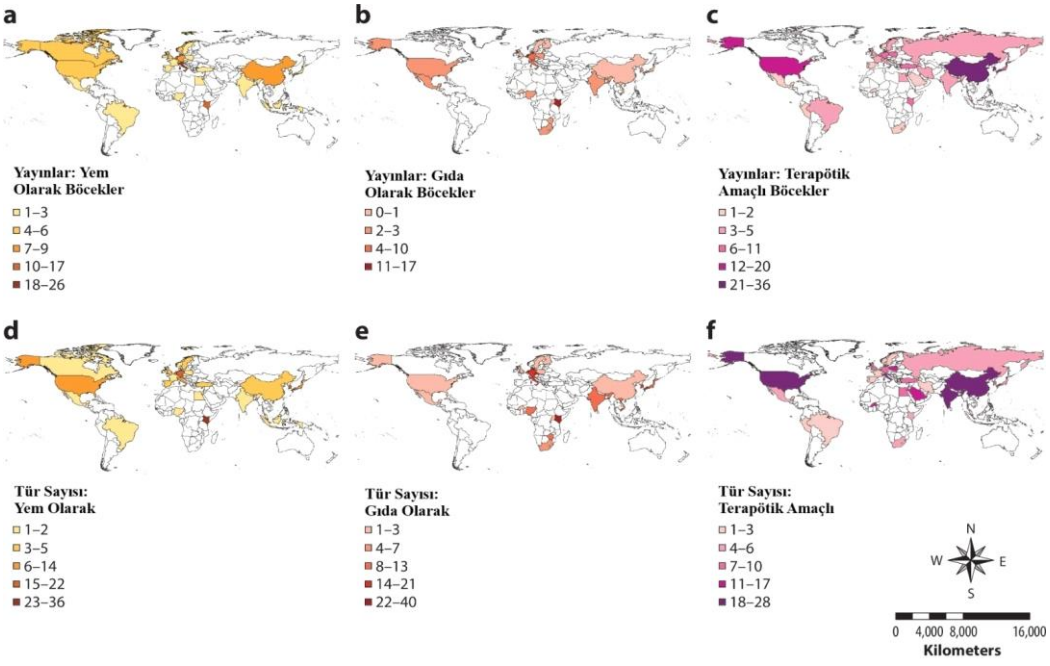
ABSTRACT

In this study, The aim was to evaluate students' perspectives on insects as a food source by focusing on vocational school students studying in health programmes. The population of the study consisted of university students studying at Sivas Cumhuriyet University Vocational School of Health Services. In the sample, 327 students who volunteered to participate in the study and who could communicate were included. Sociodemographic form and attitude towards insects scale were used as data collection forms. When the data showing the attitudes of the students towards consuming edible insects in general were examined, it was determined that 46% (n=151) did not like insects, 37.8% (n=124) were afraid of insects, and 57.9% (n=190) had the opinion that insects could not be consumed as food in our country. Although the existence and nutritional benefits of insect consumption in other cultures are accepted, cultural, psychological and demographic factors, especially disgust and fear, significantly affected the attitudes of the students. As a result, it is predicted that edible insects will have an important place among sustainable food sources in the future. It is thought that determining the attitudes of students, especially those studying in the field of health, will make important contributions to the literature.

To Cite: Arslan Y., Hastaoğlu Örgen S. Yenilebilir Böcekler Hakkında Sağlık Eğitimi Alan Öğrencilerin Tutum Analizi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2336-2352.

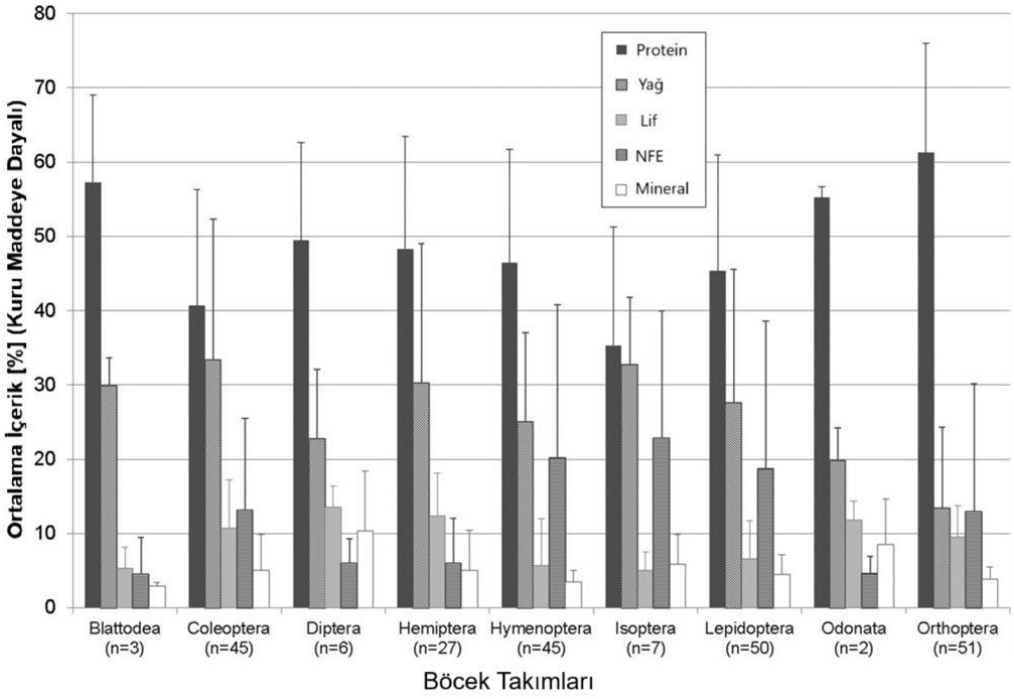
1.Giriş

Böcekler bir milyonun üzerinde tür sayısı ile tüm hayvan türleri arasında en zengin takson olarak bilinmekte olup, muazzam bir biyoçeşitlilik sergilemektedir (Chapman, 2009). Bu tür sayısı ve çeşitlilik doğada devasa bir biyokütleyi temsil etmekte ve ekosisteme sayısız katkı sunmaktadırlar (Stork, 2018); biyolojik kontrol ajanı olarak kullanılmakta, tozlaşmada görev almakta, geri dönüşüm ve tıbbi amaçlar gibi birçok alanda kullanılarak biyotik ve abiyotik çevreye çok sayıda fayda sağlamaktadırlar. Ayrıca, böceklerin bu faydaların yanı sıra üreme ve popülasyon kontrolü yapılabilen böcek gruplarının, düşük bakım maliyeti, hızlı üreme ve yüksek besin değeri gibi özelliklerinden dolayı Dünya'nın birçok bölgesinde antik çağlardan bu yana insanlar ve diğer canlılar için besin kaynağı olarak kullanılmaktadır (Van Huis ve ark., 2013). (Şekil 1). Böcekleri besin olarak tüketme süreci 'entomofaji' olarak adlandırılmaktadır. Dünya genelinde, yaklaşık 2 milyar insanın düzenli olarak böcek tükettiği bilinmektedir (Van Huis ve ark., 2013; Bernard ve Womeni, 2017). Bu beslenme alışkanlığı birçok kişi tarafından iğrenç olarak görülse de, böceklerin bu alanda kullanılması günümüzde popüler hale gelmeye başlamıştır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (Van Huis ve ark., 2013) tahminlerine göre, küresel nüfusun 2050 yılına kadar 9 milyara ulaşması beklenmekte ve bu rakam, bu kadar çok sayıda insanı besleme kapasitesi konusunda endişelere yol açmaktadır (De Marchi ve ark., 2021; Jankowski ve ark., 2025). İnsan popülasyonundaki artışa ilaveten, mahsul verimliliğinin ve tüketilen temel gıdaların azalması nedeniyle gıda güvenliğini büyük bir küresel soruna dönüştürmüştür.



Şekil 1. a-c) Yenilebilir böceklerin faydalarının araştırılmasına odaklanan bilimsel yayınların küresel dağılımları (a) yem, (b) gıda, (c) terapötikler ve (d-f) uygulama açısından incelenen ülke başına yenilebilir böcek tür sayısı; (d) yem, (e) gıda ve (f) terapötikler (Tanga ve Ekesi, 2024)

Böcek tüketimi, geleneksel hayvansal protein kaynaklarına kıyasla çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek olarak görülebilir. Böceklerin yetiştirilmesi; daha az arazi, su ve yem kaynağı gerektirmektedir (Oonincx ve ark., 2010). Ayrıca, böcek yetiştiriciliği, geleneksel hayvancılığa kıyasla daha az sera gazı üreten sürdürülebilir bir yaşam tarzı sunmakta ve insan popülasyonu için su tüketiminde azalma gibi birçok çevresel avantaj sunarak doğal kaynakların korunmasına yardımcı olmaktadır (Oonincx ve de Boer, 2012; Lin ve ark., 2023; Karakuş ve ark., 2025). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü, entomofajinin düşük maliyeti ve yüksek besin değeri sebebiyle yararlı bir besin kaynağı olduğunu söylemektedir. Böceklerin besleyici değerleri ve protein kaynakları açısından önemi giderek daha fazla vurgulanmaktadır. Yenilebilir böcekler, karbonhidratlar, proteinler, yağlar, mineraller ve vitaminler açısından doğal bir besin kaynağı olarak bilinmektedir (Bukkens, 1997; Omotoso, 2006; Chen ve ark., 2010; Chakravorty ve ark., 2011; Rumpold ve Schlüter, 2013; Aksoy ve El, 2021; Jain, 2021; Lin ve ark., 2023; Zielińska ve Pankiewicz, 2024; Jankowski ve ark., 2025) (Şekil 2). Ayrıca, böcekler, doymamış yağ asitleri, demir, çinko, bakır ve B vitaminleri gibi önemli besin öğeleri bakımından da oldukça zengindir (Oonincx ve de Boer, 2012; Lin ve ark., 2023; Wangorsch ve ark., 2024; Jankowski ve ark., 2025). Hayvan çalışmaları sonuçlarına göre, yenilebilir böceklerin tüketiminin lipid düşürücü ve iştah düzenleyici etkiler gibi obezite karşıtı özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir (Jankowski ve ark., 2025). Yenilebilir böcekler kırmızı ete kıyasla daha az yağ ve kalori içermektedir. Örneğin, 100 g tırtılın (güve veya kelebek larvaları) insanlar için gerekli olan günlük protein miktarının %76'sını ve önerilen vitamin miktarının yaklaşık %100'ünü sağladığı tespit edilmiştir (Rumpold ve Schlüter, 2013). Sahip oldukları besin değerleri nedeniyle böcekler, birçok toplumda protein eksikliğini giderme açısından fırsat sunmaktadır (Gahukar, 2011; Lange ve Nakamura, 2021). Bazı böceklerin sütten ve tavuk yumurtasından daha fazla kalsiyum içerdikleri de bilinmektedir. Ancak böceklerin zararlı bileşenlerinin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir (Rumpold ve Schlüter, 2013). İnsan sağlığı için tehlikeli olabilecek ağır metaller, allerjenler, mikotoksinler, pestisit kalıntıları, bakteriler gibi çeşitli biyolojik, kimyasal ve fiziksel zararlılar içerebilirler (Kaldırım ve Keser, 2023; Jankowski ve ark., 2025)



Şekil 2. Aynı takıma ait yenilebilir böceklerin ortalama besin içerikleri [%] (kuru madde bazında). n, literatürden elde edilen böcek örneklerinin sayısı; NFE, azotsuz ekstrakt. Böcek takımları: Blattodea (hamamböcekleri), Coleoptera (kınkantlılar), Diptera (sinekler), Hemiptera (yarım kanatlılar, tahtakurtları), Hymenoptera (karıncalar, arılar, eşekarıları), Isoptera (termitler), Lepidoptera (kelebekler, güveler), Odonata (kız böcekleri, yusufçuklar), Orthoptera (çekirgeler, cırcır böcekleri) (Rumpold ve Schlüter, 2013).

Tarihsel olarak incelendiğinde böceklerin insan beslenmesinin bir parçası olduğuna ait kanıtlar tarih öncesi arkeolojik alanlarda bulunmuştur (Olivadese ve Dinlo, 2023). Özellikle zor avlanma zamanlarında, insanlığın biyolojik ihtiyaçlarını karşılayan birincil besin kaynağı olarak kullanılmıştır (Bodenheimer, 1951). Birçok tropik ülkede böcekler, insan beslenmesinin bir parçasını oluşturmasına karşın batı ülkelerinde entomofaji, tropik ülkelerdeki ilkel insanlar tarafından tercih edilen tuhaf bir alışkanlık olarak kabul edilmiştir.

Günümüzde 1900'den fazla böcek türünün besin olarak tüketildiği kaydedilmiştir (Bektaş, 2024). Dünyada 25 ayrı takıma ait toplam 2205 böcek türü yiyecek olarak tüketilmektedir. En yaygın takım %32 yenilebilir böcek türü ile Coleoptera olurken, bunu Hymenoptera (%15,5), Lepidoptera (%15,2), Orthoptera (%14,1), Hemiptera (%11,4) takip etmektedir. Ayrıca diğer takımlarda daha az derecelerle yer almaktadır (Omuse ve ark., 2024).

Yenilebilir böcekler kaynatılarak, kızartılarak, kurutularak, toz haline getirilerek veya başka herhangi bir hazırlık biçimiyle tüketilebilmektedir. Besleyici değeri yüksek olan birçok böceğin sağlık açısından da önemli birer besin kaynağı olduğu bilinmektedir. Örneğin gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak demir ve çinko eksikliğini gidermek amacıyla kullanılmaktadır. Dünya üzerinde rapor edilen yaklaşık 2 milyon insan çinko eksikliği yaşarken, 1 milyon insanda demir eksikliği görülmektedir (Müller ve Krawinkel, 2005). *Formica fusca* L. (Hymnoptera) türünde yüksek miktarda çinko ve demir

bulunduğundan bu eksikleri gidermek için tüketilen önemli türler arasında yer almaktadır. Günümüzde yenilebilir böcekler; Asya, Afrika ve Güney Amerika dahil olmak üzere 113'ten fazla ülkede bulunan sayısız geleneksel diyetin bir parçası olasına karşın sosyo-kültürel ve tarihsel nedenlerden dolayı batı kültüründe kolayca kabul görmemektedir (Rumpold ve Schlüter, 2013; Van Huis ve ark., 2013; Tao ve Li, 2018; Batat ve Peter, 2020). Batı için entomofaji, yeni bir tüketim kültürü olmasa da nüfusun artması, yiyecek kaynaklarının hızla azalması ve böceklerin düşük kalorili besleyici birer ürün olması yakın gelecekte önemli bir besin kaynağı olacağı inancını doğurmaktadır.

Günümüzde sağlıklı beslenme bilincinin artması ve sürdürülebilir gıda kaynaklarına duyulan ihtiyaç, özellikle sağlık alanında eğitim gören bireylerin alternatif protein kaynaklarına yönelik tutumlarını daha da önemli hale getirmiştir. Sağlık eğitimi alan öğrenciler, gelecekte bireylerin beslenme alışkanlıklarını şekillendirecek önemli birer sağlık profesyoneli olacaklarından, onların yenilebilir böceklere ilişkin tutumlarının belirlenmesi bu konuda farkındalık yaratmak ve politika geliştirmek açısından gereklidir. Bu bağlamda çalışmanın temel araştırma sorusu şu şekilde belirlenmiştir: "Sağlık alanında eğitim gören öğrencilerin yenilebilir böcekleri gıda kaynağı olarak algılama düzeyleri nasıldır ve bu algıyı etkileyen temel faktörler nelerdir?" Alternatif bir gıda kaynağı olarak böceklere olan ilgi son yıllarda artmış olup, yenilebilir böceklerin gelecekte küresel gıda arzında daha büyük bir paya sahip olacağı tahmin edilmektedir (Van Huis ve Dunkel, 2017). Bununla birlikte, algılanan sosyal normlar nedeniyle yenilebilir böcek tüketiminin kabulü hala önemli bir engel teşkil etmektedir. Birçok ülkede böcek tüketimi yok denilecek kadar azdır. Böcek ürünlerinin daha fazla kabul edilmesi, net çevresel ve beslenme avantajları sunmaktadır. 2012 ve 2050 yılları arasında, hayvansal proteinlere yönelik küresel talebin %70-80 oranında artması beklenmektedir (Oonincx ve Boer, 2012). İnsanoğlu artan nüfus ve alternatif gıda kaynaklarına duyulan ihtiyaçla ilgili zorluklarla karşılaşacaktır. Tüm bu bağlamlar çerçevesinde toplumların entomofajiye bakış açılarının değerlendirilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Toplumların yenilebilir böceklere bakış açıları, bu besin kaynağının gelecekteki gıda güvenliği açısından değerlendirilmesi adına kritik bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma ile Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulunda (SHMYO) eğitim gören üniversite öğrencilerinin yenilebilir böcekler ve entomofaji konusundaki algı ve tutumlarını incelemek amacıyla yürütülmüştür. Sağlık programlarında eğitim gören öğrencilerin böceklere gıda kaynağı olarak bakış açılarını değerlendirmek ve böcek tüketimine yönelik bakış açılarını ölçmek amaçlanmıştır. Ayrıca, öğrencilerin böcek tüketimi konusundaki düşüncelerini analiz ederek, entomofajiye bakış açılarını etkileyen faktörlerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Hem eğitim düzeyi hem de sağlık bilgisi açısından toplumun genelinden farklılık gösterdiğinden, sağlık eğitimi alan öğrencilerin gelecekte toplum sağlığı alanında bilinç oluşturacak kişiler olmaları nedeniyle, SHMYO öğrencilerinin entomofajiye bakış açılarının belirlenmesi planlanmıştır. Araştırmanın evreni, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu'nun tüm öğrencilerini hedef alan

kesitsel bir anket olarak tasarlanmıştır. Araştırmada örneklem seçim yöntemine gidilmeden evrenin tamamına ulaşılması hedeflenmiştir ve araştırmaya katılmaya gönüllü olan, iletişim engeli olmayan 327 öğrenci araştırmaya alınmıştır (%95 güven aralığı, 0,05 hata payı). Daha önce bu çalışmada kullanılan ölçek, benzer örneklem grubunda uygulanmış olduğundan, yeniden geçerlilik analizi yapmaya gerek duyulmamıştır (ölçeğin güvenirlik analizi Cronbach Alpha=0,85) (Özkan, 2019; Özkan ve Güneş, 2020).

Dâhil edilme kriterleri: Bu çalışmaya; Sivas Cumhuriyet Üniversitesi SHMYO' da öğrenim gören, çalışmaya gönüllü olarak katılmayı kabul eden, iletişim kurabilen ve etik kurul onamı veren öğrenciler dâhil edilmiştir.

Dışlanma kriterleri: Araştırmaya katılmak istemeyen, anket sorularını eksik veya geçersiz şekilde yanıtlayan ya da iletişim kurulamayan öğrenciler çalışmaya dâhil edilmemiştir.

Araştırmanın Bağımlı Değişkeni

Böceklere Bakışın Değerlendirilmesi Ölçek Puan Ortalaması

Araştırmanın Bağımsız Değişkeni

Sosyo demografik Özellikler (öğrencilerin yaşadığı bölge, cinsiyet, yaş, medeni durum, okudukları bölüm ve gelir düzeyleri)

Veri Toplama Araçları

Araştırmanın verileri Kişisel Bilgi Formu ve Böceklere Bakışın Değerlendirilmesi ile toplanmıştır.

Kişisel Bilgi Formu: Araştırmacılar tarafından hazırlanan, öğrencilerin sosyodemografik özelliklerini içeren 6 sorudan oluşmaktadır (Tablo 1).

Böceklere Bakışın Değerlendirilmesi Ölçeği: 14 sorudan oluşan bu ölçek (Tablo 2) böceklere bakışın değerlendirilmesi amacıyla Neves (2015) tarafından oluşturulmuş, ülkemizde geçerlilik ve güvenirliği yapılmıştır (Özkan, 2019). Daha önce yayımlanan ve izinleri alınan ölçek, Özkan ve Güneş (2020) tarafından kullanıldığı şekliyle kullanılmıştır.

Araştırmanın Uygulanması

Araştırmaya başlamadan önce Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Etik Kurulundan Etik Kurul Onayı alınmıştır (06.01.2022 tarih ve 2022-01-46 no'lu başvuru ve 50 no'lu karar) ve daha sonra SHMYO müdürlükten kurum izni alınmıştır.

Gerekli izinler alındıktan sonra Böceklere Bakışın Değerlendirilmesi Ölçeği Sivas Cumhuriyet Üniversitesi SHMYO'da eğitim gören öğrencilere anket şeklinde yaptırılmıştır.

Verilerin Analizi

Verilerin istatistiksel değerlendirmesinde kurum lisanslı SPSS 22.0 paket program kullanılmıştır. Ölçek puanlarının normal dağılıma uygunluğu Kolmogorov-Smirnov testi ile değerlendirilmiştir. Toplam ölçek puanı için $p > 0,05$ değeri elde edilmiş ve verilerin normal dağılıma uygun olduğu kabul edilerek parametrik testler (Independent t-testi, ANOVA) kullanılmıştır.

Bireylerin tanıtıcı özelliklerinin incelenmesinde sayı, yüzde ve sürekli değişkenler ise ortalama ± standart hata vb. kullanılmıştır. Önem derecesi 0,05 olarak alınmıştır. Veriler incelendiğinde, standart hatanın görece yüksek olduğu belirlenmiştir. Standart hataların daha yüksek çıkması, bazı gruplardaki düşük örneklem sayısı ve grup içindeki yanıtların geniş varyans göstermesine bağlanabilir.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Çalışmadan elde edilen veriler sadece Sivas Cumhuriyet Üniversitesi SHMYO' da eğitim gören ve çalışmaya katılan 327 öğrenciyi kapsamaktadır. Bu anlamda, çalışmadaki sınırlı örneklemin, daha geniş öğrenci gruplarında tekrarlanması uygun olabilir.

3. Bulgular

Aşağıda, öğrencilerin sosyodemografik özelliklerinin frekans dağılımları, ölçek maddelerine verdikleri cevapların örneklem dağılımları, ölçek puanı ve sosyodemografik özelliklerinin karşılaştırılması ve ölçek alt boyut puan ortalamaları verilmiştir.

Çalışmada katılımcıların sosyo demografik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre, katılımcıların %75,9'u kadın %24,1'i erkek olduğu, çalışmaya en fazla İç Anadolu (%69,5) bölgesinden öğrenci katıldığı, %96,3'ünün bekâr ve %97'sinin 18-25 yaş aralığında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmaya katılan öğrencilerin okudukları bölümlere göre dağılımlarına bakıldığında, Tıbbi Laboratuvar Teknikleri (%22,1), Eczane Hizmetleri (%20,4), Diyaliz (%18,6), Tıbbi Dokümantasyon ve Sekreterlik (%11), Diş Protez Teknolojisi (%7), Ağız Diş Sağlığı / Anestezi (%6,1) ve Çocuk Gelişimi / Optisyenlik (%5,2) olarak belirlenmiştir. Katılımcıların gelir durumu; %41,5'i asgari ücret altı, %29,9'u asgari ücret üstü ve %28,7'si asgari ücret düzeyindedir.

Tablo 1. Öğrencilerin sosyo-demografik özelliklerinin örneklem dağılımları

DEMOGRAFİK ÖZELLİKLER	Değişkenler	Örneklem (n)	Yüzde (%)
Yaşadığınız Bölge	İç Anadolu	228	69,5
	Marmara /Ege/ Güneydoğu Anadolu	20	6,1
	Karadeniz	23	7
	Akdeniz	34	10,4
	Doğu Anadolu	23	7
Cinsiyetiniz	Erkek	79	24,1
	Kadın	249	75,9
Yaşınız	18-25	318	97
	26-33	6	1,8
	34-41	4	1,2
	44-49	0	0
	50+	0	0
Medeni Haliniz	Evli	12	3,7
	Bekâr	316	96,3
Bölümünüz	Ağız ve Diş Sağlığı / Anestezi	20	6,1
	Çocuk Gelişimi / Optisyenlik	17	5,2
	Diş Protez Teknolojisi	23	7
	Diyaliz	61	18,6
	Eczane Hizmetleri	67	20,4
	Tıbbi Dokümantasyon ve Sekreterlik	36	11,1
	Tıbbi Laboratuvar Teknikleri	73	22,1
	Yaşlı Bakım	31	9,5
Gelir Durumunuz	Asgari Ücret	94	28,6
	Asgari Ücret Üstü	98	29,9
	Asgari Ücret Altı	136	41,5

Tablo 2. Öğrencilerin böceklere bakışın değerlendirilmesi ölçek maddelerine verdikleri cevapların örneklem dağılımları

Böceklere Bakışın Değerlendirilmesi	Değişkenler	Örneklem (n)	Yüzde (%)
Böcekleri sevmem	Katılıyorum	151	46
	Bazen	84	25,6
	Kararsızım	40	12,2
	Katılmıyorum	40	12,2
	Hiç Katılmıyorum	13	4
Böceklerden korkarım	Katılıyorum	124	37,8
	Bazen	120	36,6
	Kararsızım	13	4
	Katılmıyorum	44	13,4
	Hiç Katılmıyorum	27	8,2
Böceklerin aklıma gelmesi midemi bulandırır	Katılıyorum	53	16,2
	Bazen	98	29,9
	Kararsızım	27	8,2
	Katılmıyorum	91	27,7
	Hiç Katılmıyorum	59	18
Böceklerin yenildiğini duydum	Katılıyorum	199	60,7
	Bazen	63	19,2
	Kararsızım	26	7,9

	Katılmıyorum	25	7,6
	Hiç Katılmıyorum	15	4,6
Diğer kültürlerde böceklerin yenildiğini duydum	Katılıyorum	262	79,9
	Bazen	43	13,2
	Kararsızım	8	2,4
	Katılmıyorum	7	2,1
	Hiç Katılmıyorum	8	2,4
Bazı restoranlarda böceklerin yenildiğini duydum	Katılıyorum	186	56,7
	Bazen	56	17,1
	Kararsızım	27	8,2
	Katılmıyorum	37	11,3
	Hiç Katılmıyorum	22	6,7
Böceklerin sağlıklı olduğunu düşünüyorum	Katılıyorum	19	5,8
	Bazen	26	7,4
	Kararsızım	62	18,9
	Katılmıyorum	134	40,9
	Hiç Katılmıyorum	87	27,0
Gelecek yıllarda insanların böcekleri gıda olarak kullanacağını düşünüyorum	Katılıyorum	124	37,8
	Bazen	38	11,6
	Kararsızım	88	26,8
	Katılmıyorum	59	18
	Hiç Katılmıyorum	18	5,5
İlerleyen yıllarda ülkemizde böceklerin gıda olarak kullanılmayacağını düşünüyorum	Katılıyorum	161	49,1
	Bazen	29	8,8
	Kararsızım	76	23,2
	Katılmıyorum	42	12,8
	Hiç Katılmıyorum	20	6,1
Üretim yapılacak alan ve personel olmayacağını düşünüyorum	Katılıyorum	83	25,3
	Bazen	55	12,8
	Kararsızım	105	31,9
	Katılmıyorum	74	26,6
	Hiç Katılmıyorum	11	3,4
Besleyici ancak insanların alışkanlıklarından dolayı tercih etmeyeceğini düşünüyorum	Katılıyorum	147	44,8
	Bazen	40	12,2
	Kararsızım	61	18,6
	Katılmıyorum	62	18,9
	Hiç Katılmıyorum	18	5,5
Satılmasında sorunlar yaşanabileceğini düşünüyorum	Katılıyorum	202	61,6
	Bazen	49	14,9
	Kararsızım	48	14,7
	Katılmıyorum	21	6,4
	Hiç Katılmıyorum	8	2,4
Olası risklerden dolayı tercih edilmeyeceğini düşünüyorum	Katılıyorum	220	67,1
	Bazen	53	16,2
	Kararsızım	37	11,3
	Katılmıyorum	9	2,7
	Hiç Katılmıyorum	9	2,7
Başka formlarda (gıda üretimi esnasında içeriğe eklenerek) tüketime sunulsa da tercih edilmeyeceğini düşünüyorum	Katılıyorum	174	53,2
	Bazen	49	14,9
	Kararsızım	68	20,7
	Katılmıyorum	30	9,1
	Hiç Katılmıyorum	7	2,1

Tablo 2'de öğrencilerin ölçek maddelerine göre verdikleri cevaplar gösterilmektedir. Buna göre, öğrencilerin %46'sı böcekleri sevmediğini ve %37,8'i böceklerden korktuğunu belirtmiştir. Aynı zamanda, %29,9'u bazen böceklerin midelerini bulandırdığını ifade etmişlerdir. Yine öğrencilerin %79,9'u başka kültürlerde böceklerin gıda olarak tüketildiğini duyduklarını, %67,9'u böceklerin sağlıklı olmadığını düşündüklerini belirtmişlerdir. Katılımcıların %37,8'i gelecek yıllarda böceklerin gıda olarak kullanılabileceğini, %49,1'i ise ilerleyen yıllarda ülkemizde böceklerin gıda olarak kullanılmayacağını düşündüklerini, %67,1 oranında öğrenci ise olası risklerden dolayı tercih edilmeyeceğini ve başka formlarda (üretim esnasında gıda içeriğine eklenerek) olsa bile gıda olarak kullanılmayacağını düşünmektedir.

Tablo 3. Öğrencilerin demografik özellikleri ile ölçek puanı karşılaştırılması (*p<0,05, anlamlı)

	Değişkenler	**Örneklem (n)**	**X± SH**	**İstatiksel test**
Cinsiyetiniz	Kadın	248	30,01±6,32	p:0,02*
	Erkek	79	33,06±8,59	
Medeni Durumunuz	Evli	12	31,66±13,87	p:0,01*
	Bekar	315	30,71±6,69	
Yaş Grubunuz	18-25	317	30,84±7,02	p:0,98
	25 ve üzeri	10	27,60±7,57	
Hangi bölgede yaşıyorsunuz	İç Anadolu	228	30,74±7,02	p:0,12
	Karadeniz	23	29,91±6,25	
	Akdeniz	33	30,79±5,84	
	Doğu Anadolu	23	31,04±6,37	
	Güneydoğu Anadolu/ Marmara/Ege	20	31,30±10,56	
Bölümünüz	Ağız ve Diş Sağlığı / Anestezi	20	28,50±6,73	p:0,71
	Çocuk Gelişimi/Optisyenlik	17	31,82±7,01	
	Diş Protez Teknolojisi	23	32,39±9,92	
	Diyaliz	61	30,73±6,78	
	Eczane Hizmetleri	67	30,64±6,80	
	Tıbbi Dökümantasyon ve Sekreterlik	35	31,85±6,46	
	Tıbbi Laboratuvar Teknikleri	73	30,19±6,41	
	Yaşlı Bakım	31	30,70±8,00	
Gelir Durumunuz	Asgari Ücret	93	30,66±6,93	p:0,44
	Asgari Ücret Üstü	98	30,09±6,96	
	Asgari Ücret Altı	136	31,27±7,19	

X: ortanca, SH: standart hata

Tablo 3'de öğrencilerin demografik özellikleri ile ölçek puanlarının karşılaştırması verilmiştir. Erkek katılımcıların kadınlara göre böceklerin gıda olarak tüketilmesine daha sıcak baktığı görülmektedir. Aradaki fark istatistiksel açıdan anlamlıdır (p<0,05). Öğrencilerin medeni durumları ile ölçek puanları karşılaştırıldığında, evli öğrencilerin böceklerin alternatif gıda olarak kullanılmasına olumlu bakış açısında oldukları görülmüş, aradaki fark önemli bulunmuştur (p<0,05). 18-25 yaş aralığındaki katılımcıların, 25 ve üzeri yaş grubundaki katılımcılardan daha çok böceklerin yenilmesine sıcak baktığı

belirlenmiştir. Doğu Anadolu ve Akdeniz bölgelerinde yaşayan öğrencilerin diğer bölgelere göre böceklerin gıda olarak tüketilmesine daha sıcak baktığı ancak Karadeniz bölgesinde yaşayan öğrencilerin böceklerin gıda olarak tüketilmesine sıcak bakmadığı görülmektedir. Tıbbi Dokümantasyon ve Sekreterlik bölümü öğrencileri diğer bölümlere göre böcek yiyiciliğine daha olumlu bir bakış açısı gösterirken, Anestezi ile Ağız ve Diş Sağlığı öğrencileri böceklerin gıda olarak tüketilmesine karşın olumlu bir bakış göstermemektedir. Gelir düzeyi asgari ücret altı olan öğrenciler böceklerin gıda olarak tüketilmesine olumlu yaklaşırken gelir düzeyi asgari ücretin üzerinde olan öğrenciler böceklerin gıda olarak tüketilmesine olumlu yaklaşmamaktadır.

Tablo 4. Ölçek alt boyut puan ortalamaları

	Ortanca	**SH**	**Min**	**Max**
Böceklerin besin olarak kullanılması	16,00	4,35	7,00	35,00
Gelecek 50 yıl	14,73	4,84	7,00	35,00
Toplam Ölçek Puanı	30,74	7,04	14,00	70,00

Mean: ortanca, SH: standart hata, Min: minimum, Max: maximum

Tablo 4'te ölçek toplam ve alt boyut puan ortalamaları verilmiştir. Buna göre böceklerin besin olarak kullanılması alt boyut puan ortalaması 16,00 ±4,35 gelecek 50 yıl alt boyut puan ortalaması 14,73± 4,84 ve toplam ölçek puanı 30,74 ± 7,04 olarak bulunmuştur.

Ölçek alt boyutlarına ilişkin puanlarda gözlenen bazı yüksek standart sapmaların, katılımcıların böceklere yönelik tutumlarında görülen uç yanıt dağılımlarından ve demografik çeşitlilikten kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. Tartışma

Günümüzde böcekler, yüksek besleyici özellikleri ve çevre dostu üretim koşulları nedeniyle sürdürülebilir bir alternatif gıda kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular da bu görüşü desteklemektedir. Öğrencilerin %79,9'u başka kültürlerde böceklerin tüketildiğini duymuş, ancak %67,1'i olası riskler nedeniyle böcekleri tercih etmeyeceğini ifade etmiştir. Bu durum, böceklerin gıda olarak potansiyelini kabul etseler dahi, öğrencilerin kişisel tercihlerinde kültürel ve psikolojik faktörlerin baskın olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, öğrencilerin %46'sı böcekleri sevmediğini, %37,8'i ise böceklerden korktuğunu belirtmiştir. Bu olumsuz algı, toplumdaki kültürel öğrenmenin etkisini yansıtmaktadır. Bulgular, özellikle "böceklerden korkarım" ve "böcekleri sevmem" ifadelerinde yüksek oranlar görülmesiyle,

tartışmada vurgulanan kültürel dirençle doğrudan örtüşmektedir. Ayrıca, Türkiye'de böceklerin yiyecek olarak değil, genellikle olumsuz duygularla ilişkilendirilmesi bu sonucu desteklemektedir. Öğrencilerin yalnızca %5,8'inin böceklerin sağlıklı olduğunu düşündüğünü ifade etmesi de bu algının ne derece güçlü olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bilgiler ışığında, yenilebilir böcekleri olası bir gıda krizinde alternatif gıda olarak düşünmek mümkündür (Demir ve Altun, 2021).

Türkiye'nin farklı bölgelerinden çalışmamıza katılan öğrencilerin böceklere ve böcek yiyiciliğine karşı bakışları değerlendirilmiştir. Öğrencilerin büyük bir bölümü daha önce "böceklerin bazı kültürlerde tüketildiğini" duymuşlar ve bazı restoranlarda böceklerin yiyecek olarak servis edildiklerini bilmektedirler. Çalışmamıza katılım sağlayan öğrencilerin çoğu yenilebilir böceklerin sağlıksız olduğunu ve gelecek yıllarda ülkemizde gıda olarak tercih edilmeyeceğini düşünmektedirler. Fakat aynı öğrenciler gelecek yıllarda dünyada yenilebilir böceklerin gıda olarak tüketileceğini de ifade etmiştir. Bu ikilemin Türk kültüründen kaynaklandığını düşünmekteyiz. Türk kültüründe böcekler yiyecek olarak değil daha çok korku unsuru olarak kullanılmaktadır. Ankete katılan öğrencilerin büyük bölümünden alınan "böcekleri sevmem" ve "böceklerden korkarım" cevapları bunu kanıtlar niteliktedir.

Tablo 3 dikkate alındığı zaman erkek öğrencilerin kadın öğrencilerden "böcek tüketimine daha açık" oldukları ortaya çıkmaktadır. Evli öğrencilerin de bekâr öğrencilere göre "böcek tüketimine daha açık" oldukları görülmektedir. Öğrencilerin yaşları ilerledikçe böcek yiyiciliğine olan bakışlarının olumsuzlaştığı anlaşılmaktadır. Türkiye'nin Doğu Anadolu bölgesinde yaşayan anket katılımcılarının böcek yiyiciliğine yatkınlığı diğer bölgeler arasında en yüksek oranda karşımıza çıkmaktadır. Karadeniz bölgesinde yaşayan öğrencilerin ise böcek yiyiciliğine en düşük yatkınlık gösterdiği anlaşılmaktadır. Ankete katılım sağlayan öğrenciler gelir dağılımlarına göre sınıflandırıldığında ise asgari ücret altı gelir sınıfında bulunan öğrencilerin böcek yiyiciliğine yatkınlığı asgari ücret ve asgari ücret üstünde gelir sahibi öğrencilerden fazla olduğu görülmektedir. Anket sonuçları genel olarak Erciyes Üniversitesi ve Necmettin Erbakan Üniversitesinde okuyan öğrenciler ile yapılan çalışmalar ile benzer sonuçlar sergilemektedir (Yüksel ve Canhilal, 2018; Özkan ve Güneş, 2020; Sarı ve Karaçeper, 2024).

Bu çalışmada öğrencilerin büyük bir kısmının böceklere karşı olumsuz tutum sergilediği bulunmuştur. Benzer şekilde Özkan ve Güneş (2020), Türk toplumunun genelinde böcek tüketimine karşı olumsuz bir bakış açısı olduğunu ve bu tutumun kültürel faktörlerden etkilendiğini bildirmiştir. Ayrıca Sarı ve Karaçeper (2024), gastronomi eğitimi alan öğrencilerin dahi bu konuda belirli bir direnç sergilediğini ortaya koymuştur. Deroy ve ark., (2015), böcek tüketimine yönelik olumsuz algıların çoğunlukla kültürel alışkanlıklara ve öğrenilmiş iğrenme duygularına dayandığını belirtmiştir. Shelomi (2023) tarafından yapılan bir başka çalışmada, böcek tüketimine dair eğitim almanın bireylerin tutumlarını olumlu yönde etkilediği ifade edilmiştir. Bu bağlamda çalışmamızda yer alan sağlık eğitimi gören bireylerin de böceklere karşı benzer dirençler gösterdiği ve eğitimin önemli bir değişken olduğu görülmektedir. Dahası, Jankowski ve ark., (2025) tarafından yürütülen incelemede, böcek bazlı ürünlerin kabulü konusunda en büyük engelin psikolojik faktörler, özellikle de iğrenme ve korku olduğu vurgulanmıştır. Benzer bir sonuç Hartmann ve Siegrist' in 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada

ortaya konulmuştur. Çalışmamızın bulguları da bu tespitleri destekler niteliktedir. Çalışmada bazı ölçek puanlarında gözlemlenen yüksek standart sapmalar, örneklem grubunun içsel çeşitliliğinden ve katılımcıların tutumlarında gözlenen belirgin farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Ayrıca çalışmamızda bazı ölçek puanlarında gözlenen yüksek standart sapmalar, örneklem grubunun içsel çeşitliliğinden ve katılımcıların tutumlarında gözlenen belirgin farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Örneğin, "Böceklerin sağlıklı olduğunu düşünüyorum" maddesinde katılıyorum oranı sadece %5,8 iken "hiç katılmıyorum" oranı %27'dir. Bu uç cevaplar arası dengesizlik, ortalamanın çevresine olan uzaklığı (varyansı) artırmakta bu da standart hatayı büyütmektedir. Özellikle ölçek maddelerine verilen yanıtların hem olumlu hem de olumsuz uçlarda yoğunlaştığı, yani çift kutuplu dağılım gösterdiği maddelerde, ortalamadan sapma düzeyinin arttığı görülmektedir. Örneğin, "Gelecek yıllarda insanların böcekleri gıda olarak kullanacağını düşünüyorum" ifadesinde hem "katılıyorum" (%37,8) hem de "katılmıyorum/hiç katılmıyorum" toplamı %23,5'tir. Bu tür çift kutuplu cevap dağılımları, standart hatayı yükseltmektedir çünkü grubun merkezi (ortalama) herkes için temsil edici olmaktan çıkar. Bununla birlikte, katılımcıların farklı bölüm, gelir düzeyi ve yaş gruplarından oluşması da tutumlar arasında değişkenliğe yol açarak varyansı artırmakta, dolayısıyla standart sapmaları yükseltmektedir. Örneğin, Diş protez öğrencileri ile Tıbbi laboratuvar öğrencilerinin ortalama puanları farklıdır. Bu içsel farklılıklar, toplam puan ortalamasında yüksek bir sapmaya neden olmaktadır. Korku, iğrenme, önyargı gibi psikolojik faktörler bireysel düzeyde farklı şekillerde ortaya çıkar. Bu bireysel farklılıklar, ölçek maddelerine verilen cevapların geniş bir yelpazeye dağılmasına neden olmakta bu da standart sapmaları artırmaktadır. Ayrıca bazı demografik gruplardaki düşük örneklem sayısı, gruplar arası karşılaştırmalarda sapmanın daha belirgin olmasına neden olmuştur. Örneğin, evli öğrenciler sadece 12 kişi. Bu durum, elde edilen puan ortalamalarının genellenebilirliğini sınırlayabilmektedir.

Çalışmaya katılım sağlayan öğrencilerin gelecek 50 yılda böcek üretimi, tüketimi ve satışına yönelik öngörüleri de ölçülmüştür. Buna göre öğrencilerin çoğunun düşünceleri şu şekildedir. Entomofajiyi sağlıklı bulduklarını ancak insanların alışkanlıklarından dolayı tercih etmeyeceklerini, satılmasında sorunlar yaşanabileceğini, başka formlarda dahi olsa insanların kabul etmeyeceğini ve olası risklerden dolayı insanların tercih etmeyeceklerini düşünmektedirler.

Türkiye'de böcek yeme alışkanlıklarının değerlendirilmesi genellikle gastronomi eğitimi alan öğrenciler üzerine odaklanmış olsa da farklı alandaki bireylerde de yenilebilir böceklere bakış açısının değerlendirildiği çalışmalar mevcuttur (Yüksel ve Canhilal, 2018; Altun ve Demir, 2021; Yılmaz ve Yalçın, 2022; Sarı ve Karaçeper, 2024).

5. Sonuç

Yapmış olduğumuz bu çalışma ile sağlık eğitimi alan öğrencilerin tutum ve davranışı değerlendirilmiş ve entomofajiye karşı önemli bir direnç olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonucun muhtemelen Türk toplumunun, toplumsal yapısından kaynaklandığı öngörülmektedir. Öğrencilerin farklı kültürlerde böcek yenildiğini duyduğu fakat sağlıklı olsalar bile insanların alışkanlıklarından dolayı tercih

edilmeyeceğini ve böceklere karşı korku iğrenme gibi duygular besledikleri öğrenilmiştir. Böceklerin yiyecekten ziyade korkutucu ve iğrenç bir şey olarak algılanması kültürel ve psikolojik faktörlerin önündeki en büyük engellerden birini oluşturmaktadır. Öte yandan böcekler küresel olarak gelecek için umut verici bir alternatif gıda kaynağı olarak görülmektedir. Bununla birlikte yapılan çalışmada gözlenen olumsuz tutumlar göz önüne alındığında yakın gelecekte Türkiye'de böcek bazlı gıdaların öncelikli besin kaynağı olarak kullanılmasının olası olmadığı ortaya çıkmaktadır. Herhangi bir müdahalenin yokluğunda, böceklerin yakın gelecekte Türkiye'de diyetin bir parçası olması olası görülmemektedir. Entomofajinin daha geniş kabul görmesi için köklü kültürel ve psikolojik engellerin üstesinden gelmek önemli bir yer almaktadır. Bu nedenle yenilebilir böceklerin Türkiye'de yaygın bir gıda seçeneği olarak tanıtılmadan önce önemli eğitim ve kültürel değişim gerekli olacaktır. Bu sebeple, özellikle sağlık alanında görev alacak öğrencilerin, böceklerin yüksek besin içeriğine sahip gıda kaynakları olduklarını düşünmeleri ve farkındalık kazanmaları oldukça kıymetlidir. Bu bağlamda sağlık alanında eğitim gören öğrencilerin yenilebilir böceklere yönelik farkındalıklarının artırılması amacıyla müfredat içine entomofaji konusunun dâhil edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, görsel materyaller, tadım etkinlikleri ve bilimsel bilgilendirme toplantıları yoluyla öğrencilerin önyargılarının azaltılması ve alternatif gıda kaynaklarına yönelik olumlu tutumlarının desteklenmesi sağlanabilir. Bu yaklaşım, hem bireysel farkındalık hem de toplumsal kabul açısından etkili bir strateji olabilir. Bazı ölçek maddelerinde gözlenen yüksek standart sapmalar ise, katılımcıların tutumlarındaki uç yanıtlar ile demografik çeşitliliğin yarattığı varyansa bağlanabilir.

Sonuç olarak yenilebilir böceklerin gelecekte sürdürülebilir gıda kaynakları arasında önemli bir yer tutacağı öngörülmektedir. Fakat kültürel direnç ve eğitim eksikliği bu süreci yavaşlatmaktadır.

Teşekkür

Bu araştırma, TÜBİTAK 2209-A Programı kapsamında desteklenmiştir. Sağladıkları destek için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Bilgi

Bu makale Yusuf Arslan'ın Üniversite Öğrenci Araştırma Projesinden üretilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynakça

Aksoy AB., El SN. Protein source of the future: edible insects. Turk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 9: 887-896.

Batat W., Peter P. The healthy and sustainable bugs appetite: factors affecting entomophagy acceptance and adoption in Western food cultures. J Consum Mark 2020; 37(3): 291-303.

Bektaş M. Edible Insects. Ankara, Türkiye: Iksad Publications; 2024.

Bernard T., Womeni HM. Entomophagy: Insects as food. Insect Physiol Ecol 2017; 12: 233-249.

Bodenheimer FS. Insects as human food. In: Insects as Human Food. Dordrecht, Netherlands: Springer; 1951: 7-38.

Bukkens SG. The nutritional value of edible insects. Ecol Food Nutr 1997; 36(2-4): 287-319.

Chakravorty J., Ghosh S., Meyer-Rochow VB. Chemical composition of Aspongopus nepalensis Westwood 1837 (Hemiptera: Pentatomidae), a common food insect of tribal people in Arunachal Pradesh, India. Int J Vitam Nutr Res 2011; 81: 49-56.

Chapman AD. Numbers of living species in Australia and the world. 2nd ed. Canberra: Australian Biological Resources Study; 2009.

Chen X., Feng Y., Hong Z. Review of the nutritive value of edible insects. In: Durst PB, Johnson DV, Leslie RN, Shono K, eds. Edible Forest Insects. Bangkok, Thailand: FAO; 2010; 85-93.

De Marchi L., Wangorsch A., Zoccatelli G. Allergens from edible insects: cross-reactivity and effects of processing. Curr Allergy Asthma Rep 2021; 21: 35.

Demir H., Altun Ö. Yenilebilir böcekler ve Kıbrıs ada halkının bakış açısı. Turk Turizm Araştırmaları Dergisi 2021; 5(4): 2425-2447.

Deroy O., Reade B., Spence C. The insectivore's dilemma, and how to take the West out of it. Food Qual Prefer 2015; 44: 44-55.

Gahukar RT. Entomophagy and human food security. Int J Trop Insect Science 2011; 31(3): 129-144.

Hartmann C., Siegrist M. Insects as food: perception and acceptance. Nutr Bull 2017; 42(4): 293-308.

Jain V. Entomophagy and the preservation of human food security. South Asian J Mark Manag Res. 2021; 11(11): 21-26.

Jankowski WM., Przychodniak D., Gromek W., Majsiak E., Kurowski M. Edible insects as an alternative source of nutrients: benefits, risks, and the future of entomophagy in Europe—a narrative review. Foods 2025; 14(2): 270.

Kaldırım ŞN., Keser A. Besin kaynağı olarak yenilebilir böcekler. Celal Bayar Univ Saglık Bilim Enstitüsü Dergisi 2023; 10(1): 54-59.

Karakuş Y., Onat G., Sarıgül Yılmaz D. Modeling the effect of climate change on sustainable food consumption behaviors: a study on artificial meat and edible insects. Sustainability 2025; 17(3): 924.

Lange KW., Nakamura Y. Edible insects as future food: chances and challenges. J Future Foods 2021; 1(1): 38-46.

Leach M., Nisbett N., Cabral L., Harris J., Hossain N., Thompson J. Food politics and development. World Dev 2020; 134: 105024.

Lin X., Wang F., Lu Y., Wang J., Chen J., Yu Y., Tao X., Xiao Y., Peng Y., A review on edible insects in China: nutritional supply, environmental benefits, and potential applications. Curr Res Food Sci 2023; 7: 100596.

Müller O., Krawinkel M. Malnutrition and health in developing countries. CMAJ 2005; 173(3): 279-286.

Neves AT. Determinants of consumers' acceptance of insects as food and feed: a cross-cultural study [master's thesis]. Porto, Portugal: Universidade do Porto; 2015.

Olivadese M., Dindo ML. Edible insects: historical and cultural perspective on entomophagy with a focus on Western societies. Insects 2023; 14(8): 690.

Omuse ER., Tonnang HE., Yusuf AA., Machekano H., Egonyu JP., Kimathi E., Mohamed SF., Kassie M., Subramanian S., Onditi J., Mwangi S., Ekesi S., Niassy S. The global atlas of edible insects: analysis of diversity and commonality contributing to food systems and sustainability. Sci Rep. 2024; 14(1): 5045.

Omotoso OT. Nutritional quality, functional properties and anti-nutrient compositions of the larva of Cirina forda (Westwood) (Lepidoptera: Saturniidae). J Zhejiang Univ Sci B. 2006; 7(1): 51-58.

Oonincx DG., Van Itterbeeck J., Heetkamp MJ., Van Den Brand H., Van Loon JJ., Van Huis A. An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. PloS one 2010; 5(12).

Oonincx DG., De Boer IJ. Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans: a life cycle assessment. PLoS One 2012; 7(12): e51145.

Özkan M. Alternatif gıda kaynaklarının (böcekler) kullanımına dair bakış açılarının değerlendirilmesi: Konya örneği [master's thesis]. Konya, Türkiye: Necmettin Erbakan Üniversitesi; 2019.

Özkan M., Güneş E. Alternatif gıda kaynağı olarak yenilebilir böceklerin kullanımına dair bakış açılarının değerlendirilmesi. J Tourism Gastronomy Stud 2020; 8(2): 839-851.

Rumpold BA., Schlüter OK. Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. Innov Food Sci Emerg Technol 2013; 17: 1-11.

Sarı D., Karaçeper Eİ. Z kuşağının yenilebilir böceklere yönelik tutum ve tercihleri: gastronomi ve mutfak sanatları öğrencileri üzerine bir inceleme. Int J Social Humanit Sci 2024; 8(2): 215-245.

Shelomi M. Factors affecting willingness and future intention to eat insects in students of an edible insect course. J Insects Food Feed 2023; 9(7): 865-876.

Stork NE. How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on Earth? Annu Rev Entomol. 2018; 63: 31-45.

Tanga CM., Ekesi S. Dietary and therapeutic benefits of edible insects: a global perspective. Annu Rev Entomol 2024; 69: 303-331.

Tao J., Li YO. Edible insects as a means to address global malnutrition and food insecurity issues. Food Qual Saf 2018; 2(1): 17-26.

Van Huis A., Van Itterbeeck J., Klunder H., Mertens E., Muir AHG., Vantomme P. Edible insects: future prospects for food and feed security. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013. Report No.:171.

Van Huis A., Dunkel FV. Edible insects: a neglected and promising food source. In: Sustainable Protein Sources. London, UK: Academic Press; 2017: 341-355.

Wangorsch A., Jamin A., Spiric J., Vieths S., Scheurer S., Mahler V., Hofmann SC. Allergic reaction to a commercially available insect snack caused by house cricket (Acheta domesticus) tropomyosin. Mol Nutr Food Res 2024; 68(5): 2300420.

Yılmaz İ., Yalçın E. Evaluation of individuals' perspectives and preferences for entomophagy. Gida Yem Bilim Teknol Dergisi 2022; 28: 38-46.

Yüksel E., Canhilal R. A survey of public opinion about entomophagy in Erciyes University. Uluslar Tarım Yaban Hayat Bilim Dergisi 2018; 4(2): 203-208.

Zielińska E., Pankiewicz U. Edible insects as an alternative source of nutrients: benefits, risks, and legal regulations. Foods 2024; 14(2): 270.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2353-2366, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2353-2366, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Küçük ve Orta Ölçekli Şantiyelerde İş Ekipmanların Sağlık ve Güvenlik Şartlarının Araştırılması

Ali Erkan KARAMAN[1*], Barış ÖZKUL[2], G. Sakhi HAMID[3]

[1,2,3]Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 10145, Balıkesir

[1]https://orcid.org/0000-0003-1958-9743
[2]https://orcid.org/0000-0002-3039-3381
[3]https://orcid.org/0000-0002-5284-3531
*Sorumlu yazar: ekaraman@balikesir.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 03.03.2025
Kabul tarihi:29.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Yapı işlerinde iş sağlığı ve güvenliği
İş ekipmanları
Küçük ve orta ölçekli şantiyeler
Şantiyelerse iş güvenliği

ÖZ

İş ekipmanları, birçok sektörde olduğu gibi, inşaat sektöründe de projelerin yapım aşamasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu araştırmada küçük ve orta ölçekli inşaat şantiyelerinde "Yapı İşlerinde İSG Yönetmeliği" EK-5 de yer alan "İş Ekipmanlarının Asgari Sağlık ve Güvenlik Şartlarının" incelenmesi amaçlanmıştır. Araştırmada veri toplama aracı olarak anket kullanılmıştır. Ankette katılımcılara Yönetmeliğin EK-5 bölümüne ilişkin olarak Evet/Hayır şeklinde cevap içeren sorular yöneltilmiştir. Elde edilen verilerin frekans dağılımı yapılarak ankete katılan teknik personel ve yöneticilerin mevzuat hakkındaki farkındalığı ölçülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde katılımcıların 31/12/2018 tarihinde yayımlanan Yönetmeliğin EK-5 (İş Ekipmanlarının Asgari Sağlık ve Güvenlik Şartları) bölümünü, küçük ve orta ölçekli inşaat şantiyelerinde büyük ölçüde uygulamadıkları ortaya çıkmıştır. Yapı İşlerinde İSG Yönetmeliğinin bilinmemesi veya eksik uygulanması bu tip şantiyelerde en önemli İSG problemi olarak ortaya çıkmaktadır.

Investigation of Health and Safety Conditions of Work Equipment in Small and Medium-Scale Construction Sites

Research Article

Article History:
Received: 03.03.2025
Accepted: 29.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
OHS in construction works
Work equipment
Small and medium-sized construction sites
Occupational safety in construction sites

ABSTRACT

Work equipment is frequently used during the construction phase of projects in the construction sector, as in many other industries.. This study aims to examine the "Minimum Health and Safety Requirements for Work Equipment" listed in Annex-5 of the "Occupational Health and Safety Regulation in Construction Works" in small and medium-sized construction sites. A survey was used as a data collection tool in the study. The survey included YES/NO questions regarding Annex-5 of the Regulation, directed to participants. The frequency distribution of the collected data was analyzed to measure the awareness of technical personnel and managers about the regulation. The data obtained revealed that the participants largely failed to implement the Annex-5 (Minimum Health and Safety Requirements for Work Equipment) section of the Regulation, published on 31/12/2018, in small and medium-sized construction sites. The lack of knowledge or inadequate implementation of the Occupational Health and Safety Regulation in Construction Works emerges as the most significant occupational health and safety issue in such construction sites.

To Cite: Karaman AE., Özkul B., Hamid GS. Küçük ve Orta Ölçekli Şantiyelerde İş Ekipmanların Sağlık ve Güvenlik Şartlarının Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2353-2366.

1. Giriş

İnşaat firmaları projelerin gerçekleştirilmesi aşamalarında insan ve makine gücünü birlikte kullanmaktadır. Otomasyon sürecinin yavaş ilerlediği inşaat sektöründe insan gücü, üretim sürecinin merkezinde yer almakta olup insanın olmadığı bir üretim şekli mümkün değildir. Çalışanların işyerinden veya dışarıdan kaynaklanabilecek risklere karşı korunmaları için, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nda (İSG, 2012) yer alan risk değerlendirmesi bu sürecin en önemli kısımlarından birini oluşturmaktadır (Ceylan, 2014). İş sağlığı ve güvenliğinin temel işleyişini oluşturan unsurları barındıran bu süreç, işçilerin çalışmaları sırasında işyerinde var olan tehlike ve risklerin belirlenmesi bakımından son derece önemlidir.

Yüksekten düşme riski, şantiyelerde karşılaşılan iş sağlığı ve güvenliği sorunlarından biri olarak görülmektedir (Bayram, 2018). Çünkü risk her zaman vardır ve gerekli önlemler alınmadığında her an çalışanlar bu riskle karşı kaşıya kalabilirler. İSG mevzuatınca "seviye farkı bulunan ve düşme sonucu yaralanma ihtimalinin oluşabileceği her türlü alanda yapılan çalışma" yüksekte çalışma olarak kabul edilmektedir. Yüksekte yapılan çalışmalarda kullanılması gereken sağlık ve güvenlik ekipmanları, yönetmeliğin EK-5 kısmında açıklanmaktadır (YİİSGY, 2013). Bu ekipmanlar kullanılmadığı ya da gerekli yeterlilikleri sağlamadıkları durumlarda iş kazaları kaçınılmaz olmaktadır.

Yapılan çalışmalara göre iş kazalarının % 98'i önlenebilmektedir. Sadece % 2 gibi küçük bir bölümü ise belirlenemeyen sebeplerden meydana gelmektedir (Yağımlı ve Engin 2017; Bayram, 2018). Bu istatistiklere göre çalışanların, çalışma sırasında tehlikeli davranışlarda bulundukları, iş kazalarına karşı herhangi bir tedbir almadıkları ve koruyucu ekipmanları kullanmadan çalışma eğiliminde oldukları anlaşılmaktadır (Demir ve Öz, 2018). Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığının 2023 yılı için yayınladığı veriler incelendiğinde, iş kazası geçiren sigortalı sayısı 681.655'dir. Maalesef bu kazalarda 1972 kişi hayatını kaybetmiştir. Bu kazaların 82.112'si inşaat sektöründe meydana gelmiştir. İnşaat sektöründe gerçekleşen kazalarda 552 çalışan hayatını kaybetmiştir. Dolayısıyla bu yılda Türkiye'de gerçekleşen iş kazalarına bakıldığında, inşaat sektörünün payı %12,05'tir. Toplam iş kazası sayısında inşaat sektörünün oranı %12,05 olmasına karşılık inşaat sektöründe yaşanan kazaların %28'i ölümle sonuçlanmıştır (ÇHİ, 2024). Yine 2023 yılına bakıldığında tüm sektörlerdeki iş kazalarının 128.680'i (%18,88) düşmeye bağlı gerçekleşmekte olup, 316 (ölümlü kazaların %16'sı) kişi bu sebeple hayatını kaybetmiştir. Özellikle yüksekte yapılan çalışmalardan kaynaklı düşmeye bağlı kazalar ve ölümler bu istatistikte önemli yer tutmaktadır. İnşaat sektöründeki iş kazalarının ve dolayısıyla can kayıplarının bu kadar fazla olmasının en önemli nedenlerinden biri "Yapı İşlerinde İSG Yönetmeliğinin EK-5 de yer alan İş Ekipmanlarının Asgari Sağlık ve Güvenlik Şartlarının" eksik uygulanması ya da hiç dikkate alınmamasıdır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, 2018 yılı sonunda değişen Yapı İşlerinde İSG Yönetmeliğinden sonra iş ekipmanlarının kullanımına yönelik Aydoğan ve Uçan (2022) tarafından genel bir literatür taraması ve durum tespiti yapılmış olup, saha çalışmasının yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada; küçük ve orta ölçekli inşaat şantiyelerinde, iş ekipmanlarının sahip olması gereken asgari güvenlik şartlarının ne derecede uygulanıp/uygulanmadığının ölçülmesi amaçlanmıştır.

2. Şantiyelerde İş Sağlığı ve Güvenliği

Şantiyeler, inşaat sektöründe yoğun faaliyetlerin yürütüldüğü alanlardır ve çalışanlar için birçok risk ve tehlike barındırmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği, şantiyelerde çalışanların sağlığını korumak ve iş kazalarını önlemek için hayati bir öneme sahiptir. Bu nedenle, iş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin etkin bir şekilde uygulanması için işverenler ve çalışanlar birlikte hareket etmelidirler (ÇHİ, 2024). İşverenin çalışanlarına yönelik öncelikli sorumluluklarından biri, İSG eğitimlerinin ilgili yönetmelik çerçevesinde verilmesidir. Çalışanların, şantiyelerde karşılaşabilecekleri tehlikeler ve bu tehlikelerden korunma yöntemleri hakkında bilgilendirilmesi gerekmektedir. Bu eğitimler, iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma alışkanlıklarının geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. İşverenlerin; güvenlik kültürünün oluşmasına katkıda bulunması ve çalışanlarını teşvik etmesi, çalışanların bu konudaki farkındalığının artmasına ve iş kazalarının azalmasına büyük katkı sağlayacağı açıktır.

İSG mevzuatının temeli proaktif bir süreci içeren risk değerlendirmesine dayanmaktadır. Şantiyelerde risk değerlendirmesi yapılması, iş sağlığı ve güvenliği planlamasının temel taşını oluşturmaktadır. Risk değerlendirmesi, potansiyel tehlikelerin belirlenmesi, bu tehlikelerden ortaya çıkacak risklerin olasılık ve etkilerinin analiz edilmesi sürecidir. Bu süreç sonucunda, riskleri minimize edecek önlemler alınmakta ve güvenli bir çalışma ortamı sağlanmaktadır (Güvel ve Laptaalı, 2018).

Yapılan risk değerlendirmesi sonucunda şantiyelerde alınması gereken güvenlik önlemleri belirlenmektedir. Bu önlemler sırasıyla riskin kaynağında yok edilmesinden başlayıp kişisel koruyucu donanımların (KKD) kullanılmasına kadar tanımlanmaktadır (Şekil 1). Bertaraf edilemeyen risklere karşı önlem önceliği, toplu koruma önlemleri alınarak riskleri kabul edilebilir seviyelerde tutmaktır. Toplu koruma önlemlerinin de riskleri yeteri kadar sınırlandıramadığı durumlarda kişisel koruyucu donanımlar kullanılarak risklerin etkilerinden çalışanlar korunmuş olur. Kişisel koruyucu donanım kullanımı, şantiyelerde iş sağlığı ve güvenliği açısından son derece önemli bir unsurdur. Çalışanlar, bulundukları ortamın gerektirdiği koruyucu ekipmanları kullanarak, meydana gelebilecek muhtemel kazalar sonucu oluşabilecek ölüm ve yaranma gibi riskleri azaltabilirler. İşverenler, çalışanlara uygun KKD sağlamalı ve bu ekipmanların doğru kullanımı konusunda eğitim vermelidirler (Çelik ve Temel, 2018).



Şekil 1. Önlem hiyerarşisi (Maden Profesyonelleri, 2025)

Şantiyelerde İSG ile ilgili yapılacak bir diğer önemli çalışma; çalışanların İSG süreçlerine dâhil edilmesidir. Şantiyelerde İSG uygulamaları; üst yönetimin liderliğinde, teknik personelin desteğiyle ve

tüm çalışanların katılımı ile başarıya ulaşılabilmektedir. Bundan dolayı tüm çalışanların iş sağlığı ve güvenliği konusundaki katılımlarının teşvik edilmesi gerekmektedir. Çalışanlar, kendi güvenlikleri konusunda aktif bir rol almalı ve güvenli çalışma yöntemleri benimsemelidirler. İşverenler, bu katılımı teşvik etmek için çalışanlarla sürekli iletişim içinde olmalı ve geri bildirim mekanizmaları oluşturmalıdırlar. İş sağlığı ve güvenliği, herkesin ortak sorumluluğu olup, birlikte hareket edildiğinde daha etkili sonuçlar elde edilebilmektedir.

3. Şantiyelerde İş Ekipmanlarının Kullanımı

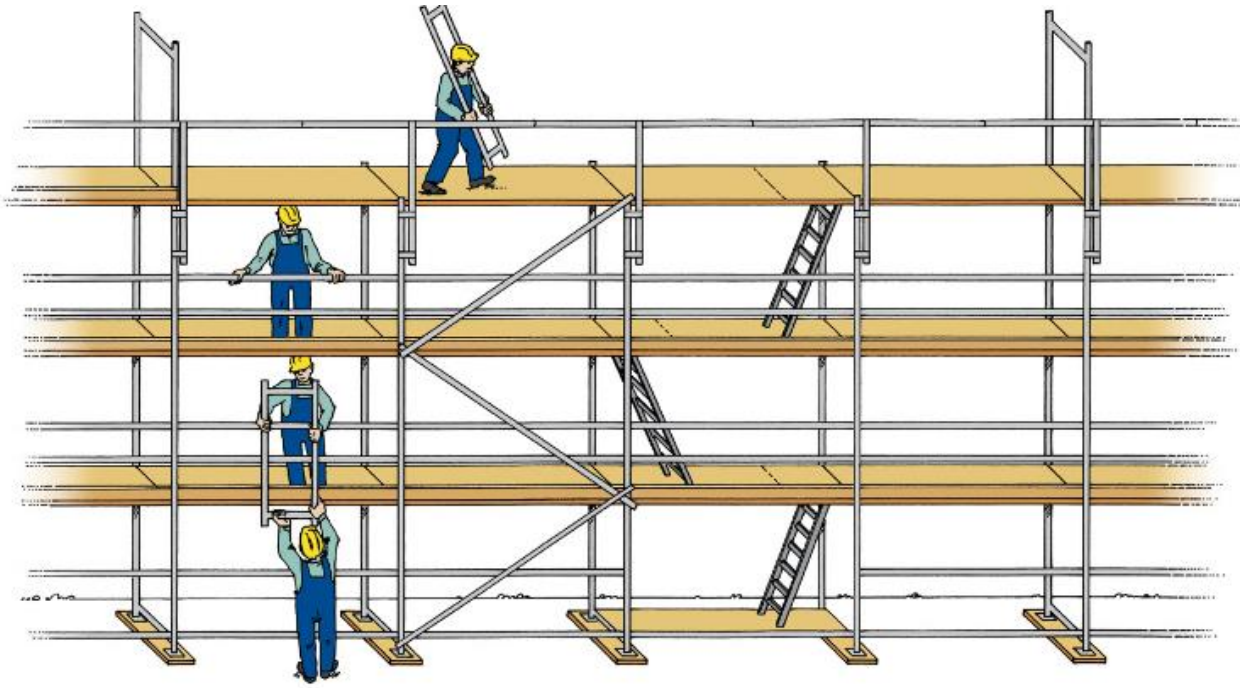
Şantiyeler, inşaat sektörünün dinamik yapısını yansıtan ve aynı zamanda birçok tehlike barındıran çalışma alanlarıdır. Şantiyelerde iş ekipmanlarının doğru kullanımı, inşaat sektöründeki iş kazalarını azaltmak ve çalışanların sağlığını korumak açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak bu ekipmanların bilinçsiz veya hatalı kullanımı, ciddi iş kazalarına ve maddi kayıplara yol açabilmektedir. 05.10.2013 tarih ve 28786 sayı ile yayımlanan Resmî Gazetedeki "Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği" şantiye sahalarında alınması gereken iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının yasal temel taşını oluşturmaktadır. Yönetmeliğe göre işin yapımında kullanılan her türlü makine, alet, tesis ve tesisat iş ekipmanı olarak tanımlanmaktadır. Yapı işlerinde kullanılan iş ekipmanlarına ilişkin asgari sağlık ve güvenlik şartları ayrıntılı olarak düzenlenmiştir. Bu bağlamda, belirlenen en temel gerekliliklerden biri, kullanılacak ekipmanların ilgili standartlara uygunluk belgesine sahip olmasıdır. İnşaat faaliyetleri, yalnızca ilgili Türk Standartları kapsamında belgelendirilmiş ekipmanlar kullanılarak yürütülmelidir. Asgari teknik gereklilikleri karşılamayan standart dışı ürünlerin kullanımı ise iş kazalarına zemin hazırlamaktadır (İş ekipmanları, 2025). Yürütülen faaliyetlerin çok çeşitli olması nedeniyle inşaat sektöründe birçok farklı türde iş ekipmanı kullanılmaktadır. Dört ekten oluşan bu yönetmeliğe 31/12/2018 tarihinde EK-5 "Yapı İşlerinde Kullanılan İş Ekipmanlarının Asgari Sağlık ve Güvenlik Şartları" eklenmiştir. EK-5 yapı işlerinde kullanılan iş ekipmanlarını 5 kategoride toplamıştır;

(1) Ön yapımlı bileşenlerden oluşan cephe iskeleleri,
(2) Geçici kenar koruma sistemleri (korkuluk sistemleri),
(3) Sütunlu çalışma platformları (cephe platformları),
(4) Yaşam hatları (ankraj hatları),
(5) Güvenlik ağları.

3.1. Ön Yapımlı Bileşenlerden Oluşan Cephe İskeleleri

Cephe iskeleleri, inşaat sektöründe sıkça kullanılan ve dış cephe imalatlarında iş güvenliği ve verimliliği açısından önemli ekipmanlardandır. Bunlar, işçilerin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayan temel yapı elemanlarından biridir (Şekil 2). Geleneksel iskele sistemlerinin yanı sıra, ön yapımlı bileşenlerden oluşan modern cephe iskelelerinin, pratiklik, hız ve güvenlik açısından birçok avantajı bulunmaktadır. Yapı işlerinde kullanılan ön yapımlı bileşenlerden oluşan cephe iskeleleri; TS EN 12810-1 standardına uygun olmalı ve yapılacak işe göre (yük sınıfı, boyut vb.) cephe iskelesi seçilmelidir. Cephe iskelesi

olarak ahşap kullanılacaksa, bu iskeleler TS 13662 standardına uygun olmalı ve iskele yüksekliği 13,5 metreyi aşmamalıdır. İskelelerdeki bütün bileşenler, kullanım amacına uygun olarak yeterli dayanım ve boyutlarda olmalı, bu bileşenlerin kullanımı sırasında kendiliğinden hareket etmemeli ve yerinden çıkmamalıdır. Kurulum ve söküm işlemleri; kurma, kullanma ve sökme planı, üretici talimatları ve teknik detaylar dikkate alınarak yapılmalıdır (YİİSGY, 2013).

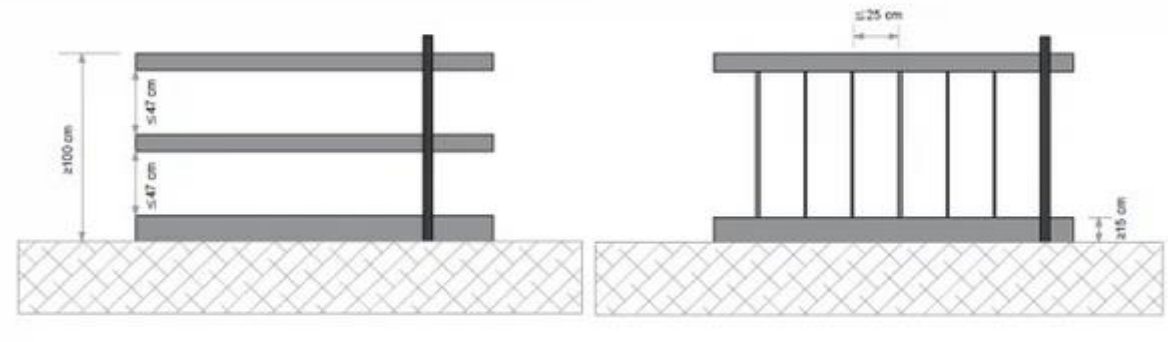


Şekil 2. Cephe iskelesi

3.2. Geçici Kenar Koruma Sistemleri (Korkuluk Sistemleri)

Şantiyelerde sıklıkla kullanılan geçici kenar koruma sistemleri, iş sağlığı ve güvenliğini arttırmak amacıyla kullanılan kritik yapısal elemanlardır (Şekil 3). Bu sistemler, özellikle düşme riski bulunan çalışma sahalarında çalışanların korunması amacıyla tasarlanırlar. Geçici kenar koruma sistemleri çoğunlukla; korkuluklar, ara korkuluklar ve topuk levhalarından oluşurlar. Bu sistemler, yüksekte çalışma sırasında güvenli bir çevre yaratır ve düşme kaynaklı iş kazalarını azaltmada önemli rol oynar. TS EN 13374, yapı işlerinde kullanılan geçici kenar koruma sistemlerinin sağlaması gereken bir standart olup bu standarda ve yapılan işe uygun sınıf ve tipte geçici kenar koruma sistemi seçilmelidir. Mevcut çalışma alanları ve bağlantı (sabitleme) koşulları dikkate alınarak, TS EN 13374 standardında yer alan üç sınıftan ve dokuz tipten en uygun olan geçici kenar koruma sistemi seçilmelidir. Bu standarda göre geçici kenar koruma sistemleri; çalışma alanları ve bağlantı (sabitleme) koşulları dikkate alındığında, üç sınıftan ve dokuz tipten oluşmaktadır.

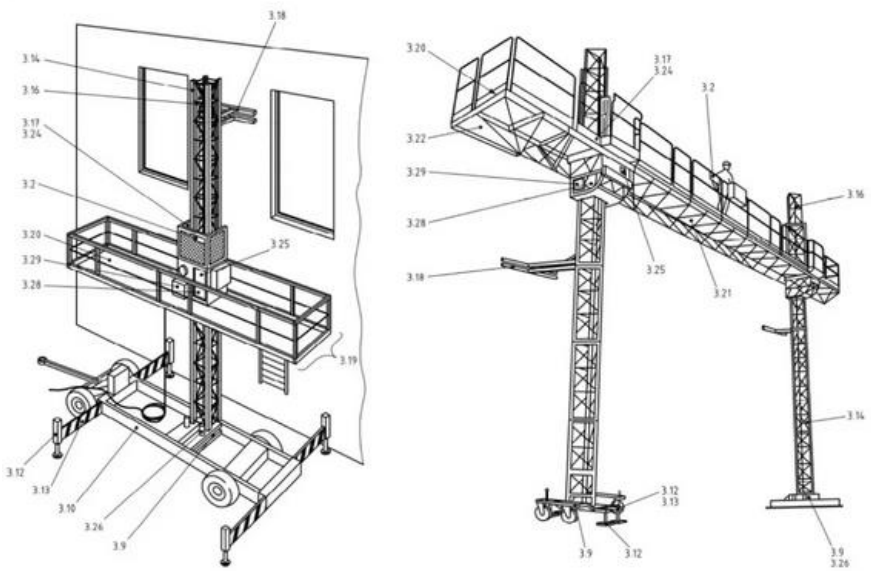
Sınıf A geçici kenar koruma sistemleri; eğimin 10°'den az olduğu çalışma yüzeylerinde kullanılır.
Sınıf B geçici kenar koruma sistemleri; eğimin 30°'den az olduğu alanlarda veya eğimin 60°'den az ve düşme yüksekliğinin 2 metreden az olduğu alanlarda kullanılır.
Sınıf C geçici kenar koruma sistemleri; eğimin 30° ile 45° arasında olduğu alanlarda veya eğimin 45° ile 60° arasında ve düşme yüksekliğinin 5 metreden az olduğu alanlarda kullanılır (YİİSGY, 2013).



Şekil 3. Korkuluk

3.3. Sütunlu Çalışma Platformları (Cephe Platformları)

Sütunlu çalışma platformları (cephe platformları), bina cephelerinde ve yüksekte çalışma gerektiren projelerde kullanılan mekanik veya elektrikli kaldırma sistemleridir (Şekil 4). İnşaat, tadilat ve cephe temizliği gibi işlerde sıkça tercih edilen bu platformlar, çalışanlara hem güvenli hem de ergonomik bir çalışma alanı sağlamaktadır. Bu platformlar, sabit veya hareketli olarak tasarlanabilir ve genellikle metalden inşa edilirler. Bu sistemler, yüksekte çalışma sırasında karşılaşılan tehlikeleri minimize etmekle kalmaz, aynı zamanda iş verimliliğini de arttırmaktadırlar. Sütunlu çalışma platformlarının en büyük avantajı, işçilerin yüksekte çalışırken güvenli bir şekilde durabilmelerini sağlamasıdır. Ayrıca, geniş çalışma alanları sunarak ekipman ve malzemelerin rahatlıkla taşınmasına olanak tanırlar. Şantiyelerde, TS EN 1495+A2 standardına uygunluk belgesine sahip cephe platformları kullanılır ve işin gerekliliklerine uygun özelliklere sahip platformlar tercih edilir. Bu platformların kurulumu, kullanımı ve sökümü ise üreticinin talimatlarına uygun şekilde gerçekleştirilir (YİİSGY, 2013).

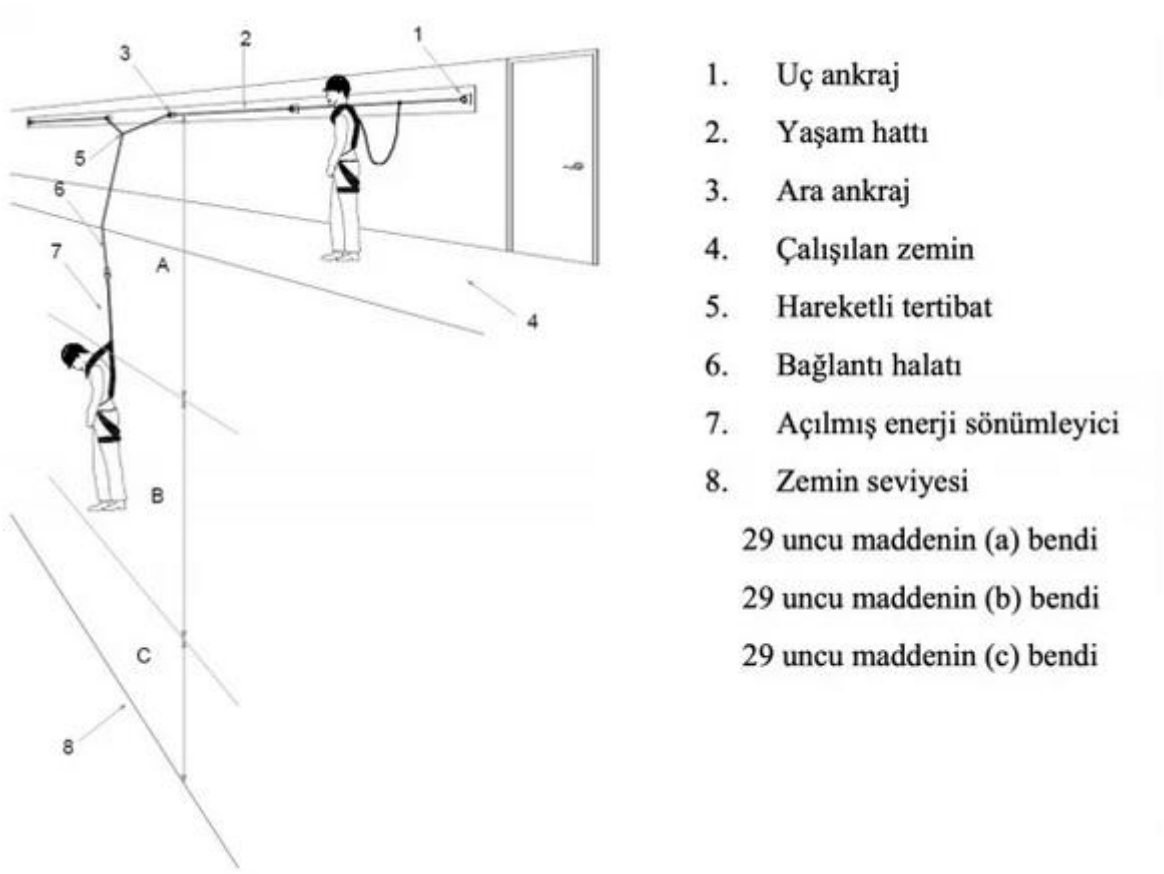


Şekil 4. Sütunlu çalışma platformu

3.4. Yaşam Hatları (Ankraj Hatları)

Yaşam hatları; toplu koruma tedbirlerinin yeterli olmadığı veya hiç alınamadığı durumlarda uygun ankraj sistemleri ve kişisel koruyucu donanımlar ile birlikte kullanılır. Şantiyelerde kullanılan yaşam hatları, çalışanların yüksekte güvenli bir şekilde çalışabilmelerini sağlamak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Yaşam hatları, düşme riskini en aza indirgemek için tasarlanmış olup, çalışanların hareket özgürlüğünü kısıtlamadan güvenli bir çalışma alanı sunmaktadır. Çalışanlar, emniyet kemerleri ve karabinalar aracılığıyla bu hatlara bağlanarak düşme riskini en aza indirirler. Gelişen teknolojiyle birlikte daha dayanıklı malzemelerden üretilen, ergonomik tasarımlara sahip ve kullanım kolaylığı sağlayan yaşam hatları, çalışanların şantiyelerde güvenle çalışabilmesini mümkün kılarak iş verimliliğini artırmaktadır (YİİSGY, 2013).

Yönetmelikte yaşam hatları ikiye ayrılmaktadır: (1) Yatay yaşam hattı (Şekil 5), (2) Dikey yaşam hattı. İki ana ankraj noktası arasında gerdirilerek konumlandırılan yatay yaşam hatlarının yatay düzlemden sapma açısı 15º'yi geçemez. Kullanılan esnek veya rijit yatay yaşam hatları EN 795 veya CEN/TS 16415 standardını mutlaka sağlamalıdır. Dikey yaşam hatlarında ray veya çelik tel halat kullanılır. Kılavuzlu tip düşme durdurucular ile rijit ve dikey yaşam hatlarının kullanıldığı sistemlerde, EN 353-1 standardı, esnek ve dikey yaşam hatlarının kullanıldığı sistemlerde, EN 353-2 standardında olmalıdır (YİİSGY, 2013).

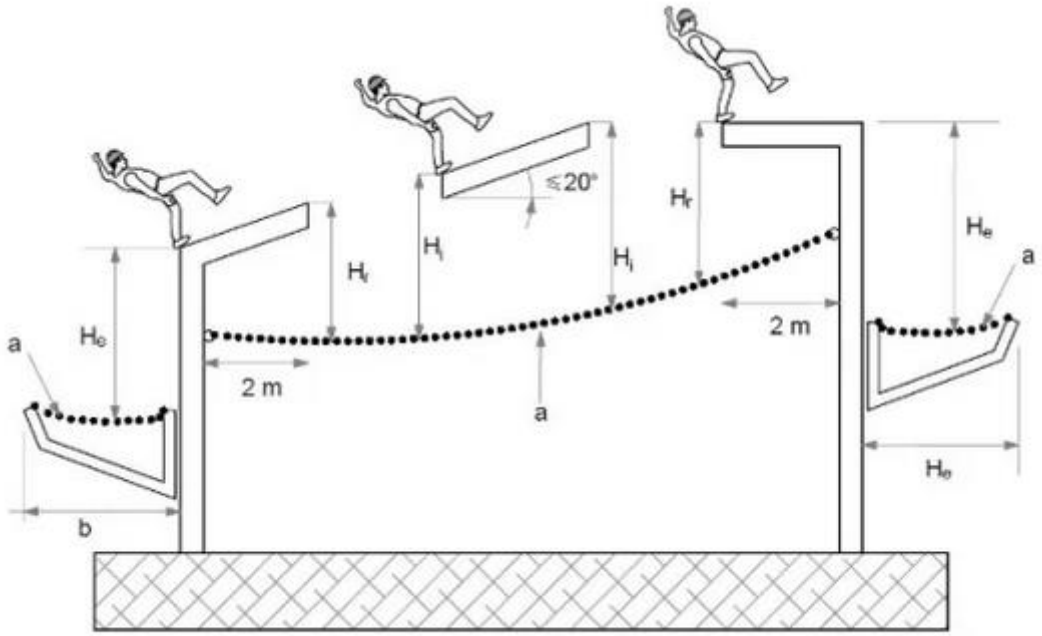


Şekil 5. Yaşam hattı

3.5. Güvenlik Ağları

Düşmeyi durdurucu toplu korunma sistemlerinden olan güvenlik ağları; bir kenar (sınır) halatı, diğer destekleme elemanları veya bunların birleşimi ile desteklenen ve yüksekten düşen kişileri yakalamak için tasarlanan ağlardır (Şekil 6). Tanımından da anlaşılacağı üzere, mevzuatta asgari şartları ayrıntılı şekilde düzenlenmiş olan güvenlik ağları, malzeme düşmesini engellemek için değil, yüksekten düşen çalışanları yakalayarak düşmenin olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla tasarlanmakta ve kullanılmaktadır. Güvenlik ağları, genellikle diğer tedbirlere ek bir tedbir olarak veya düşmenin önlenmesinin diğer tedbirlerle mümkün olmadığı çalışma alanlarında düşmeyi durdurucu toplu korunma tedbiri olarak kullanılmaktadır. Düşmeyi durdurucu toplu korunma tedbirleri, düşme mesafesinin sınırlandırılması veya düşme sonucu oluşacak etkinin azaltılması amacıyla alınan tedbirler olarak nitelendirilmektedir (Güvenlik ağları, 2025).

Güvenlik ağları, düşme sırasında enerjiyi emerek darbeyi azaltır ve kullanıcıların yere çarpmasını engelleyerek, daha güvenli bir çalışma ortamı sağlar. Bu sistemler, özellikle geniş alanları kapsayan açık çalışma sahalarında, sabit ankraj noktalarının yetersiz kaldığı durumlarda hayati bir rol oynar. Güvenlik ağlarının tasarımı ve kurulumu, uluslararası güvenlik standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir. TS EN 1263-1 ve TS EN 1263-2 standartlarına uygun olması gereken bu ağlar, dört sınıftan ve dört sistem tipinden oluşmaktadır. Güvenlik ağlarının kurulumunda düşme yüksekliğine bağlı olarak yakalama genişliği önemli olmakta olup düşme yüksekliği 6 metreyi geçmemesi gerekir (YİİSGY, 2013).



He, Hr, Hi: Düşme yükseklikleri, **a:** Güvenlik ağı, **b:** Yakalama genişliği

Şekil 6. Güvenlik ağı

4. Örneklem, Hedef Yanıtlayıcılar ve Yöntem

Bu çalışmanın evreni 100'ün altında çalışan sayısına sahip küçük ve orta ölçekli inşaat şantiyeleri, örneklemi ise iş ekipmanı kullanım potansiyeline sahip 100'ün altında çalışanı olan küçük ve orta ölçekli İstanbul ili şantiyeleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Araştırma örnekleminin belirlenmesinde yargısal örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde örnekler, araştırmaya katkıları dikkate alınarak; araştırmacılar tarafından belirlenmektedir (Dilman, 1978). Araştırmada yer alan "Yapı İşlerinde İSG Yönetmeliği" EK-5 ilişkin kavramlar, yöneticileri ve teknik personeli kapsamaktadır. Bu nedenle firma yöneticileri, genel müdür ve yardımcıları, proje müdürleri ve teknik elemanlar araştıranın hedef yanıtlayıcıları olarak tespit edilmiştir.

Bu araştırmada, şantiyelerde kullanılan iş ekipmanlarına ilişkin bir anket yürütülmüş ve çalışmaya konu olan her bir iş ekipmanı için aşağıdaki sorular sorulmuştur:

(1) Belirtilen sistemi kullanıyor musunuz/kullanacak mısınız?

(2) Kullanılan sistemlerin standartlara uygunluk belgeleri mevcut mu?

(3) Bu belgelerin üretici onaylı suretleri ve talimat el kitabı sahada bulunuyor mu?

(4) Sistemlerin kurulum ve kullanım şekline dair ek bilgiler sağlanıyor mu?

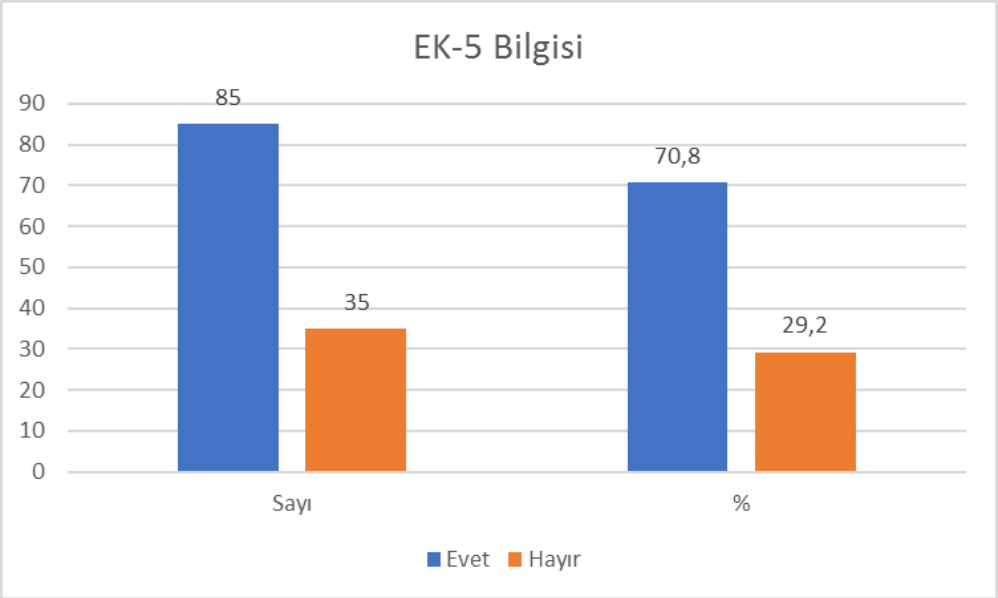
Çalışmaya ilişkin veriler, yüz yüze gerçekleştirilen anket çalışması ile toplanmıştır. Anket formu, bilimsel araştırma yöntemlerinin belirlemiş olduğu ilkeler ışığında hazırlanmış olup (Kinnear, 1991), verilerin çözümlenmesi ve değerlendirilmesinde istatistiksel analiz programından faydalanılmıştır. Ölçeklerden elde edilen puanlara ait frekans ve yüzde dağılımları hesaplanmıştır.

5. Araştırma Bulguları

Bu çalışmada küçük ve orta ölçekli 120 inşaat şantiyesinde yöneticiler veya teknik personel tarafından anket formu doldurulmuştur (Hamid, 2022). Anketin uygulandığı şantiyelerin demografik özellikler bakımından değerlendirilmesi Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'e bakıldığında ankete katılanların büyük çoğunluğunu erkek (%85,8) katılımcılar oluşturmaktadır. Ankete katılan katılımcıların %43,3'ü 18-30 yaş aralığında olup %60,8'i lisans ve %19,2'si lisansüstü mezunudur. Tablo 1'den de anlaşıldığı üzere, ankete katılanların büyük çoğunluğu (%63,3) 5 yıl üzeri hizmet süresine sahip deneyimli mühendis veya yöneticilerden oluşmaktadır.

Tablo 1. Demografik değişkenler (Hamid, 2022)

Sosyo-demografik Değişkenler		N	%
Cinsiyet	Kadın	17	14,2
	Erkek	103	85,8
Yaş	18-30	52	43,3
	30-40	34	28,3
	40-50	19	15,8
	50-60	10	8,3
	60 yaş üstü	5	4,2
Eğitim durumu	Lise	7	5,8
	Yüksekokul	17	14,2
	Lisans	73	60,8
	Yüksek Lisans	23	19,2
Çalışan sayısı	10dan az	28	23,3
	10-20	23	19,2
	21-30	27	22,5
	31-40	12	10,0
	41-50	15	12,5
	51-101	15	12,5
Pozisyon	Yönetici	18	15,0
	Teknik personel	102	85,0
Hizmet süresi	1-5 yıl	44	36,7
	5-10 yıl	36	30,0
	10-15 yıl	15	12,5
	15-20 yıl	15	12,5
	20 yıl üstü	10	8,3



Şekil 7. Katılımcıların EK-5 bilgisi

Katılımcılara Yapı İşlerinde İSG Yönetmeliği" EK-5 bilgilerinin olup olmadığı yöneltilmiştir. Şekil 7'de katılımcıların %70,8'nin EK-5 hakkında bilgi sahibi olduklarını beyan ederken %29,2'si haberlerinin olmadığını ifade etmişlerdir. Bu oran, anketin uygulandığı katılımcıların büyük oranda "iş ekipmanlarının sağlaması gereken asgari sağlık ve güvenlik şartları hakkında" bilgili olduğunu gösterir.

Tablo 2. Değişkenlerin frekans dağılımları (Hamid, 2022)

1. Cephe İskeleleri	Evet		Hayır	
	F	%	F	%
1-1 Şantiyede İskele Kullanıyor musunuz / Kullanacak mısınız?	120	100	0	0
Yukarıdaki soruya cevabınız evet ise aşağıdaki ifadeleri yanıtlayınız.				
1-2 Şantiyede TS EN 12810-1 standardına uygun iskele kullanılmaktadır / kullanılacaktır.	42	35	78	65
1-3 İskeleye ait kullanım kılavuzu şantiyede bulunmaktadır.	27	22,5	93	77,5
1-4 İskeleye ilişkin sağlamlık ve dayanıklılık hesapları bulunmaktadır.	35	29,2	85	70,8
2. Korkuluk Sistemleri				
2-1 Şantiyede Korkuluk Kullanıyor musunuz / Kullanacak mısınız?	67	55,8	53	44,2
Yukarıdaki soruya cevabınız evet ise aşağıdaki ifadeleri yanıtlayınız.				
2-2 Projede TS EN 13374 standardına uygun korkuluk kullanılmaktadır / kullanılacaktır.	18	26,9	49	73,1
2-3 Korkuluğa ilişkin kullanım kılavuzu şantiyede bulunmaktadır.	13	19,4	54	80,6
	A	B	C	D
2-4 Şantiyede kullanılan korkuluk, yönetmelikte belirtilenlerden hangisi ya da hangileridir? (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)	47 (%70,1)	8 (%11,9)	4 (%6)	8 (%11,9)
3. Cephe Platformları				

3-1 Şantiyede Cephe Platformları Kullanıyor musunuz / Kullanacak mısınız?	9	7,5	111	92,5
Yukarıdaki soruya cevabınız evet ise aşağıdaki ifadeleri yanıtlayınız.				
3-2 Şantiyede TS EN 1495+A2 standardına uygun cephe platformu kullanılmaktadır / kullanılacaktır.	1	11,1	8	88,9
3-3 Cephe platformuna ilişkin kullanım kılavuzu şantiyede bulunmaktadır.	3	33,3	6	66,7
3-4 Şantiyede kullanılan cephe platformunda, maksimum çalışan sayısı, azami yük kapasitesine ilişkin bilgiler yer almaktadır.	6	66,7	3	33,3
4. Yaşam Hatları (Düşmeyi Önleyici Sistemler)				
4-1 Şantiyede Yaşam Hatları (Ankraj Hatları) Kullanıyor musunuz / Kullanacak mısınız?	85	70,8	35	29,2
Yukarıdaki soruya cevabınız evet ise aşağıdaki ifadeleri yanıtlayınız.				
4-2 Şantiyede; TS EN 10264-2 standardına uygun paslanmaz çelik veya galvanizli çelikten yapılmış rijit ve dikey yaşam hatları kullanılmaktadır / kullanılacaktır.	48	56,5	37	43,5
4-3 Esnek veya rijit yatay yaşam hatlarının kullanıldığı sistemlerde, EN 795 Standardı veya CEN/TS 16415 Standartları sağlanmaktadır / sağlanacaktır.	35	41,2	50	58,8
4-2 Şantiyede; TS EN 10264-2 standardına uygun paslanmaz çelik veya galvanizli çelikten yapılmış rijit ve dikey yaşam hatları kullanılmaktadır / kullanılacaktır.	50	58,8	35	41,2

1. Cephe Ağları	Evet		Hayır	
	F	%	F	%
5-1 Projede Güvenlik Ağları kullanıyor musunuz / kullanacak mısınız?	68	56,7	52	43,3
Yukarıdaki soruya cevabınız evet ise aşağıdaki ifadeleri yanıtlayınız.				
5-2 Şantiyede TS EN 1263-1 standardına uygunluk belgesi olan güvenlik ağları kullanılmaktadır / kullanılacaktır.	31	45,6	37	54,4
5-3 Güvenlik ağlarının kullanım kılavuzu şantiyede bulunmaktadır.	26	38,2	42	61,8
5-4 Güvenlik ağlarının kurulumunda yönetmelikte belirtilen düşme yüksekliklerine göre kurulum gerçekleştirilmektedir.	54	79,4	14	20,6

Değerlendirmenin bu aşamasında katılımcılara EK-5'de belirtilen iş ekipmanının şantiyede kullanılıp kullanılmadığı sorulmuş, cevap evet ise o iş ekipmanına ilişkin ifadelere yanıt vermeleri istenmiş ve bunlara ilişkin frekans dağılımları Tablo 2'de sunulmuştur. Ankete katılan şantiyelerin tamamında ön yapımlı bileşenlerden oluşan cephe iskelesi kullanılmaktadır. Ankete katılanların %65'i TS EN 12810-1 standardına uygun iskele kullanılmadığını, %77,5'i talimat el kitabının olmadığını ve %70,8'i sağlamlık ve dayanıklılık hesaplarının olmadığını beyan etmiştir.

Tablo 2 incelendiğinde geçici kenar koruma (korkuluk) sistemleri 67 şantiyede kullanılmaktadır. Korkuluk sistemleri kullanan şantiyelerin %73,1'inde korkuluklar standartlara uygun olmayıp, %80,6'sında talimat el kitabı bulunmamaktadır. Şantiyede kullanılan korkuluk tipine %11,9'u D Tipi olarak ifade etmiştir. Oysa, ilgili yönetmelikte korkuluk tipleri A, B, C olarak sınıflandırılmış olup D tipi korkuluk sistemi bulunmamaktadır. Bu da katılımcıların yönetmelikte tarif edilen korkuluk sistemleri hakkında yeterli, bilgiye sahip olmadıklarını göstermektedir.

Anket katılımcılarının yer aldığı 120 şantiyeden sadece 9 tanesinde sütunlu çalışma platformu kullanıldığı belirtilmiştir. Kullanılan 9 çalışma platformundan sadece bir tanesi yönetmelikte belirtilen şartları sağlamaktadır. Yaşam hattı kullanılan 85 şantiyedeki, dikey yaşam hatlarının %56,5'i, yatay yaşam hatlarının ise %41,2'si standartlara uygun olduğu belirlenmiştir. Son olarak incelenen şantiyelerin %56,7'sinde güvenlik ağı kullanılmakta olup, güvenlik ağlarının %38,2'sinde talimat el kitabı şantiye sahasında bulunurken %61,8'inde bulunmamaktadır.

6. Sonuçlar

Küçük ve orta ölçekli inşaat şantiyeleri şeklinde ifade edilen orta ölçekli taahhüt projeleri veya yap-sat tarzı konut projeleri yürüten şirketlere ait şantiyeler genellikle iş güvenliğinin sağlanması açısından çoğunlukla problemli alanlar olarak kabul edilirler. Bunun en önemli sebebi; bahse konu işverenlerin İSG'ne karşı sergiledikleri tutum ve buna bağlı olarak kurumsallaşmış bir İSG kültürünün oluşmaması olduğu ifade edilebilir. Ancak, her şantiyede, ilgili mevzuatın uygulanmasının da zorunlu olduğu aşikârdır. Uygulanması zorunlu olan yönetmeliklerden bir tanesi de, aynı zamanda bu çalışmanın konusu olan, iş ekipmanlarının sağlaması gereken asgari sağlık ve güvenlik şartlarıdır. Bu çalışmaya konu olana verilerin analizi yapıldıktan sonra elde edilen bulgular değerlendirildiğinde aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır;

1) Araştırmaya katılan şantiyelerin tümü, mevzuatın zorunlu tuttuğu İSG uygulamalarını yerine getirmek amacıyla OSGB'den (Ortak Sağlık Güvenlik Birimi) hizmet almaktadırlar ve iş ekipmanlarının kullanım şartlarına ilişkin gereklilikleri büyük oranda sağlayamamaktadırlar. Bunun en önemli sebebi İG Uzmanları tarafından saha denetimlerinin gerektiği gibi ve yeteri kadar yapılmaması gösterilebilir.
2) Elde edilen verilere dayanarak tespit edilen bir diğer problem ise işveren ile OSGB arasındaki ticari ilişki kaygısı gösterilebilir. İşveren kendisine hizmet verecek OSGB firmasını kendisi belirlemekte ve çoğunlukla karar sürecindeki en önemli kriter; hizmetin maliyeti olmaktadır. En düşük teklifi veren OSGB firması ile imzalanan İSG hizmet sözleşmesi de çoğunlukla kâğıt üzerinde kalmakta ve İSG uygulamaları için gereken hassasiyet gösterilmemektedir.
3) Bir diğer dikkat çekici sonuç ise katılımcıların %70,8'inin EK-5'den haberdar olmalarına karşılık, Ek-5'i şantiyelerinde uygulama konusunda yetersiz kalmalarıdır.

Bu çalışmanın en önemli katkısı; İş Ekipmanların Asgari Sağlık ve Güvenlik Şartları, EK-5'in yürürlüğe girmesinin üzerinden 5 yıl geçmesine rağmen uygulamada ciddi eksiklikler olduğu, mevzuat çıkartmanın tek başına yeterli olmadığı, mevzuatla birlikte eğitimlerin ve saha denetimlerinin birlikte yürütülmesi gerektiğinin anlaşılmış olmasıdır. Çalışmada katılımcı sayısı ve zaman önemli bir kısıtlayıcı faktör olmuştur. İleriki çalışmalarda, EK-5'in uygulama eksikliğinin iş kazaları üzerindeki etkisine yönelik araştırmalar yapılması önerilmektedir.

Not: Balıkesir Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Etik Komisyonu'nun 17.03.2022 tarih ve 2022/2 sayılı toplantısında etik kurul onayı verilmiştir.

6. Kaynaklar

Bayram S. Şantiyelerde yaşanan güncel iş kazaları, çalışan farkındalıkları ve eğitim seviyeleri arasındaki ilişki. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2018; 33(1): 241-252.

Ceylan H. Türkiye'de inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının analizi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi 2014; 6(1): 1-6.

Çelik GT., Temel CD. İnşaat sektöründe kişisel koruyucu donanım kullanımında ödül-ceza uygulamaları. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2018; 33(4): 197-202.

ÇHİ. Çalışma hayatı istatistikleri, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2024.

Demir A., Öz A. Teolojik açıdan iş kazalarının incelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2018; 14: 189-197.

Dilman DA. Mail and telephone surveys: The total design method. John Wiley&Sons. Newyork, 1978.

Güvel ŞT., Laptalı OE. İş sağlığı ve güvenliği yasal mevzuatının Türkiye inşaat sektöründe uygulanma düzeyi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2018; 33(1): 189-198.

Güvenlik ağları. https://guvenliinsaat.csgb.gov.tr/media/calplhon/31-g%C3%BCvenlik-a%C4%9F%C4% B1-sistemleri.pdf. Erişim Tarihi:02.02.2025.

Hamid, GS. Küçük ve orta ölçekli inşaat şantiyelerinde iş ekipmanların asgari sağlık ve güvenlik şartlarının incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 2022.

İSG Kanunu. İş sağlığı ve güvenliği kanunu. 2012; Kanun No: 6331: 28339.

İş ekipmanları. https://guvenliinsaat.csgb.gov.tr/isg-konulari/is-ekipmanlari, Erişim Tarihi:02.02.2025.

Kinnear TC., Taylor JR. Marketing research: an applied approach. fourth edition. McGraw-Hill, Singapore, 1991.

Maden Profesyonelleri. https://www.madenprofesyonelleri.com/sifir-tolerans-ilkesiyle-katmanli-risk-yonetimi/sifir-tolerans-5-2/ Erişim Tarihi:01.06.2025

Özmen Aydoğan S., Uçan R. İş sağlığı ve güvenliğinin saha gözetimi ve iş ekipmanları açısından incelenmesi: Yapı sektörü. Resilience 2022; 6(1): 111-125.

Yağımlı M., Ergin H. Türkiye'de iş kazalarının üssel düzeltme metodu ile tahmin edilmesi. MFBD 2017; 29(4): 118-123.

YİİSGY. Yapı işlerinde İSG yönetmeliği. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2013.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2367-2390, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2367-2390, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Sürdürülebilir Kampüs Yönetiminde Risk Temelli Yaklaşım: Fine-Kinney Yöntemiyle Meslek Yüksekokulu Örneği

Pınar SARIOĞLU ALTIN[1], Özlem YURTSEVER[2*]

[1,2]Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İstanbul, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-2237-2200
[2]https://orcid.org/0000-0002-5312-3771
*Sorumlu yazar: ozlem.yurtsever@marmara.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 13.05.2025
Kabul tarihi: 30.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Fine Kinney yöntemi
İş sağlığı ve güvenliği
Sürdürülebilir kampüs
Risk değerlendirmesi
Sürdürülebilirlik

ÖZ

Eğitim kurumlarında güvenli ve sağlıklı bir çevrenin, sürdürülebilirlik politikalarının ayrılmaz bir bileşeni olduğu kabul edilmektedir. Bu bağlamda, yükseköğretim kurumlarında iş sağlığı ve güvenliği (İSG) odaklı risk değerlendirmeleri, sürdürülebilir kampüs hedeflerine ulaşmada kritik bir araç olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, bir meslek yüksekokulunda sürdürülebilir kampüs anlayışı çerçevesinde Fine-Kinney yöntemi ile risk değerlendirmesi yapılmıştır. Toplam 93 tehlike tanımlanmış ve laboratuvar, ortak alanlar, merdivenler ve açık alanlar gibi çeşitli mekânlarda gözlem temelli analizler gerçekleştirilmiştir. Bulgular, yüksek risk düzeyine sahip unsurların çoğunlukla laboratuvar ortamlarında yoğunlaştığını göstermektedir. Ayrıca öğrenci, akademik ve idari personelden alınan nitel görüşler saha gözlemleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda kısa, orta ve uzun vadeli stratejik öneriler sunulmuş ve üniversite yönetimi için uygulanabilir bir eylem planı önerilmiştir. Sonuç olarak, kampüslerde İSG temelli risk değerlendirmelerinin sistematik biçimde uygulanması, sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu şekilde mekânsal güvenlik politikalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

A Risk-Based Approach to Sustainable Campus Management: A Case Study at a Vocational School Using the Fine-Kinney Method

Research Article

Article History:
Received: 13.05.2025
Accepted: 30.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Fine Kinney method
Occupational health and safety
Sustainable campus
Risk assessment
Sustainability

ABSTRACT

A safe and healthy environment in educational institutions is considered an integral component of sustainability policies. In this context, occupational health and safety (OHS)-focused risk assessments in higher education institutions are seen as a critical tool for achieving sustainable campus goals. This study conducted a risk assessment using the Fine-Kinney method within a vocational school, aligned with the sustainable campus framework. A total of 93 hazards were identified and observational analyses were carried out across laboratories, common areas, stairways, and open spaces. Findings indicated that high-risk elements were predominantly concentrated in laboratory settings. In addition, qualitative insights were collected from students, academic and administrative staff and interpreted alongside field observations. Based on the findings, strategic recommendations were developed for short-, medium-, and long-term actions, resulting in an actionable roadmap for university administrators. In conclusion, systematically implementing OHS-based risk assessments in campus environments can contribute to developing spatial safety policies aligned with sustainability objectives.

To Cite: Sarıoğlu Altın P., Yurtsever Ö. Sürdürülebilir Kampüs Yönetiminde Risk Temelli Yaklaşım: Fine-Kinney Yöntemiyle Meslek Yüksekokulu Örneği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2367-2390.

1. Giriş

Sürdürülebilirlik, günümüzde çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla birlikte ele alınan bütüncül bir yaklaşım haline gelmiştir. Bu dönüşüm yalnızca sanayi ve enerji gibi alanlarla sınırlı kalmayıp, eğitim gibi toplumsal gelişimin temel alanlarını da doğrudan etkilemektedir. Üniversiteler, artık yalnızca bilgi üretimi ve aktarımıyla sınırlı kurumlar değil; aynı zamanda güvenli, sağlıklı ve erişilebilir yaşam alanları sunan sosyal mekanizmalar olarak değerlendirilmektedir. Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH), yoksulluğun sona erdirilmesi, eşitsizliklerin azaltılması, sağlıklı yaşam koşullarının oluşturulması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması gibi 17 ana hedeften oluşan küresel bir kalkınma gündemidir (Birleşmiş Milletler, 2015). Bu hedefler, yalnızca devletlere değil, aynı zamanda eğitim kurumları gibi yerel aktörlere de yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır. Özellikle kampüs yönetimi düzeyinde alınan kararlar, doğrudan SKH'lerin çevresel, sosyal ve yönetsel boyutları ile ilişkilidir. Sürdürülebilir kampüs yönetimi, çevresel uygulamaların ötesinde sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliği de içeren bütüncül bir yaklaşımı gerektirmektedir (Velazquez ve ark., 2006). Bu çerçevede, üniversitelerde İSG uygulamaları, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin özellikle "İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme" (SKH 8) ve "Sağlık ve Kaliteli Yaşam" (SKH 3) başlıklarıyla doğrudan ilişkili bir unsuru olarak öne çıkmaktadır.

İSG alanında yapılan son dönem çalışmalar, bu kavramın farklı sektörlerdeki uygulamalarını disiplinlerarası bir bakış açısıyla ele alarak hem kuramsal hem de pratik düzeyde zenginleştirmiştir. İnşaat, enerji, gıda, sağlık, eğitim, tekstil ve imalat gibi sektörlerde gerçekleştirilen araştırmalar; İSG performansının, çalışan algılarının, yönetsel tutumların ve kullanılan analiz yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Akbıyıklı ve Dikmen, 2018; Bekleviç ve Gedik, 2018; Üner ve Ayberk, 2019; Çağri ve Sabir, 2023; Erin ve ark., 2023; Delice ve Koçbulut, 2024; Özmen, 2025). Özellikle meslek hastalıkları, ergonomik problemler, kimyasal maruziyet, çevresel riskler ve kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanımı gibi konular çalışmaların ortak odak noktalarını oluşturmaktadır (Gedik ve ark., 2017; Öztürk, 2021; Dalkıran ve Olcay, 2023; Gökcan ve ark., 2025).

Alan uygulamaları, İSG risklerinin yalnızca teknik değil, kültürel ve örgütsel bağlamda da analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Göymen (2021) atık su arıtma tesislerinde çevresel maruziyetin sağlık üzerindeki etkilerini değerlendirirken; Sağir ve ark. (2022), inşaat sektöründe kaza sonrası etkileyici değişkenleri yapay sinir ağlarıyla analiz etmiştir. Aksoy ve ark. (2013), meslek yüksekokulu öğrencilerinin İSG farkındalığını ortaya koymuş; Üner ve Ayberk (2019) ise çalışanların eğitim düzeyinin iş kazası riskine etkisini incelemiştir. Benzer biçimde, Ordu (2023) da kalkınma bölgeleri ölçeğinde yaptığı çalışmayla İSG'nin sürdürülebilir kalkınmadaki yönetsel boyutuna dikkat çekmiştir.

Sektörel farklılıkların altını çizen diğer çalışmalarda; Delice ve Koçbulut (2024), çimento fabrikasında aydınlatma, termal konfor ve titreşim gibi riskleri analiz etmiş; Çağrı ve Sabır (2023), tekstil sektöründe iş etüdü yöntemiyle fiziksel risklerin tespitine odaklanmıştır. Korkmaz (2021) metal sektöründe, Bayram ve Çelenk Kaya (2022), liman alanlarında, Doğan (2023), kapalı alan çalışmalarında; Gedik ve

ark. (2017) ile Bekleviç ve Gedik (2018) ise ofis ortamlarında ergonomik riskleri detaylı şekilde ele almıştır.

Ayrıca, İSG risk analizinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi de önem kazanmıştır. Gökcan ve ark. (2025), enerji santralinde KKD kullanımının risk skorlarına etkisini incelemiş; İnanlı ve Özbakır (2024), Fine-Kinney ve 3T yöntemlerini karşılaştırarak karar süreçlerindeki önemini vurgulamıştır. Durmuş ve ark. (2021) ise çay fabrikasında Fine-Kinney ve FMEA yöntemlerini birlikte uygulayarak sektörel risk türlerinin çok boyutluluğuna dikkat çekmiştir.

Küresel sürdürülebilirlik hedeflerinin, eğitim kurumları üzerindeki yansımaları ve bu çerçevede İSG uygulamalarının önemi, yükseköğretim yapıları açısından daha yakından incelenmelidir. Üniversitelerin bireylerin sağlığını ve refahını önceliklendiren sosyal mekanizmalar olarak yeniden tanımlanması bu gerekliliği daha da pekiştirmektedir. Bu doğrultuda, sürdürülebilirlik ilkelerinin üniversitelerdeki fiziksel ortamlar, yönetsel yaklaşımlar ve güvenlik politikalarıyla nasıl kesiştiğini ortaya koymak kritik bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Türkiye'de Fine-Kinney yöntemiyle üniversite kampüslerinde yürütülen, sürdürülebilirlik temelli ve sosyal boyutu da içeren kantitatif risk analizleri oldukça sınırlıdır. Bu duruma ilişkin mevcut literatür, çalışmanın 1.1. bölümünde ayrıntılı biçimde tartışılmıştır. Bu çalışma, meslek yüksekokulu düzeyinde farklı fiziksel alanlarda yürütülen kapsamlı risk değerlendirmesi ile söz konusu boşluğu doldurmakta; İSG'yi yalnızca yasal bir zorunluluk olarak değil, aynı zamanda sosyal sürdürülebilirlik ilkesinin ayrılmaz bir parçası olarak ele alan özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

1.1. Yükseköğretim Kurumlarında Sürdürülebilirlik ve İSG İlişkisi

Eğitim kurumlarında sürdürülebilirlik vizyonu, çevresel duyarlılığın ötesine geçerek iş sağlığı ve güvenliği, acil durum planlaması, erişilebilirlik ve fiziksel altyapı güvenliği gibi konuları da kapsamaktadır (Velazquez ve ark., 2005). Bu unsurlar, kurumsal sürdürülebilirliğin ayrılmaz parçaları olarak değerlendirilmektedir.

İSG, sürdürülebilirlik çerçevesinde değerlendirildiğinde, çalışanların ve hizmet alan bireylerin sağlığının korunması, iş süreçlerinin kesintisiz sürdürülebilmesi ve kurumsal verimliliğin artırılması gibi birçok kritik rol üstlenmektedir. Özellikle yükseköğretim kurumlarında, öğrenciler, akademik-idari personel ve ziyaretçiler gibi çok sayıda bireyin aynı anda bulunduğu yapılar, çeşitli tehlikelere ev sahipliği yapmaktadır. Sınıflar, laboratuvarlar, ofisler ve ortak kullanım alanlarında ortaya çıkabilecek ergonomik, kimyasal, biyolojik ya da fiziksel riskler hem bireysel hem de kurumsal düzeyde ciddi sonuçlar doğurabilmektedir (Bağcı ve ark., 2024).

Sürdürülebilir kampüs yaklaşımı, çevresel, sosyal ve yönetsel boyutların dengeli biçimde ele alındığı, üniversitelerin bütünsel kalkınma hedefleriyle uyumlu bir kurumsal model olarak öne çıkmaktadır (Ağı Günerhan ve Günerhan, 2016; Çelik ve Öztürk, 2022). Bu yaklaşım yalnızca doğal kaynakların korunmasını değil; aynı zamanda öğrenciler, akademik/idari personel ve ziyaretçiler gibi kampüs yaşamının tüm paydaşlarının sağlığını, güvenliğini ve refahını gözeten kapsayıcı bir yönetim anlayışını

da içermektedir (Kalawi, 2021). Güvenli ve sağlıklı çalışma ortamlarının tesisi, sosyal sürdürülebilirliğin temel gerekliliklerinden biridir (Akandere, 2020). Bu doğrultuda üniversite kampüslerinde sürdürülebilirlik uygulamaları yalnızca enerji ve kaynak verimliliği ile sınırlı kalmamalı; aynı zamanda çalışanların ve öğrencilerin güvenliği, sağlığı ve refahı gibi sosyal sürdürülebilirlik bileşenlerini de kapsamalıdır. Bu kapsamda İSG uygulamaları, sürdürülebilir kurum kültürünün vazgeçilmez bir unsuru olarak ele alınmalı ve sadece yasal bir zorunluluk değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada temel bir stratejik araç olarak değerlendirilmelidir (Lozano, 2006; Öztürk Taşdemir ve Öztürk, 2019; Yalçin, 2021).

Kalawi (2021)'nin İstanbul Gelişim Üniversitesi'nde yürüttüğü çalışmada, bulanık çok kriterli karar verme yöntemleriyle sürdürülebilir kampüs tasarımı gerçekleştirilmiş; öğrenci sağlığına doğrudan etki eden çevre koşullarının belirleyici olduğu gösterilmiştir. Hergül (2021) ise sürdürülebilir kampüs tasarımında mobilyaların öğrencilerin güvenliği ve ergonomisi açısından yeniden düşünülmesi gerektiğini savunmuş; öğrenci refahını temel alan çevre düzenlemelerinin sürdürülebilirliğin ayrılmaz bir parçası olduğunu vurgulamıştır.

Çelik ve Öztürk (2022), Türkiye'deki üniversiteleri GreenMetric göstergeleri doğrultusunda değerlendirirken, öğrenci yaşamını etkileyen ulaşım, açık alan kullanımı ve fiziksel erişim gibi konulara dikkat çekmiştir. Aynı şekilde, Kayapınar Kaya ve ark. (2019), Türkiye'deki on üniversitenin sürdürülebilirlik performanslarını GreenMetric kriterlerine göre karşılaştırmış ve sosyal sürdürülebilirlik bileşenlerinin çoğu kurumda geri planda kaldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, Gedikkaya ve ark. (2022), sürdürülebilirlik kriterlerinin uluslararası üniversite sıralamalarındaki ağırlığını değerlendirirken, üniversitelerin öğrenci sağlığına yönelik altyapı yatırımlarında yetersiz kaldığını ifade etmişlerdir. Dolayısıyla sürdürülebilir kampüslerin, güvenli ve sağlıklı yaşam alanları sunması gerektiği vurgulanmaktadır.

Ağı Günerhan ve Günerhan (2016), Türkiye'deki üniversitelerin sürdürülebilirlik ekseninde yeniden yapılandırılması gerektiğini savunarak; çevresel, sosyal ve yönetsel boyutları içeren bir sürdürülebilir üniversite modeli önermiştir. Bu model kampüs altyapısından eğitim ve araştırmaya, enerji yönetiminden iş sağlığı ve güvenliğine kadar çok sayıda alan kapsamakta; yapısal dönüşümün yanı sıra kampüs kullanıcılarının deneyimlerini doğrudan etkileyen stratejilere vurgu yapmaktadır. Benzer şekilde, S. Güngör ve Demir (2018), sürdürülebilir kampüs tasarımında özellikle çevresel etkileri azaltmaya yönelik fiziksel düzenlemelere ve sosyal alan planlamasına odaklanarak, kampüs tasarımının kullanıcı sağlığı ve çevre duyarlılığı açısından yeniden kurgulanması gerektiğini belirtmiştir.

Yükseköğretim kurumları sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşma konusunda kritik bir rol üstlenmekte ve sürdürülebilirlik uygulamalarını kampüs operasyonları ile eğitim ve araştırma süreçlerine entegre etme konusunda önemli ilerlemeler kaydetmektedir (Lukman ve Glavič, 2007; Nejati ve Nejati, 2013; Amaral ve ark., 2015). Üniversitelerin sürdürülebilirlik konusundaki çabaları çoğunlukla yeşil kampüs uygulamaları, atık yönetimi, enerji verimliliği ve toplumsal katılım gibi alanlarda yoğunlaşmaktadır (Sribanasarn ve ark., 2024). Bununla birlikte, sürdürülebilir üniversite

kavramı, yalnızca çevresel uygulamalarla sınırlı olmayıp, sosyal ve ekonomik boyutları da kapsayan daha geniş bir çerçevede ele alınmalıdır.

Ancak sosyal sürdürülebilirlik bileşenleri arasında yer alan İSG konusu, üniversite uygulamalarında yeterince görünür hale gelmemektedir. Eğitim kurumlarında İSG, sürdürülebilirlik çabaları açısından genellikle ihmal edilen veya yeterince incelenmeyen bir alan olarak dikkat çekmektedir. Oysa, İSG uygulamaları kampüslerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir sosyal boyut olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin, Kavouras ve ark. (2022), sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada İSG uygulamalarının önemini vurgulayarak, üniversitelerde çalışanların ve öğrencilerin sağlık ve güvenliğinin sürdürülebilirlik açısından temel bir bileşen olduğunu ortaya koymuştur. Lozano (2006) ise üniversitelerin sürdürülebilirlik konusunda öncü olabilmesi için tüm paydaşlarının sürdürülebilirlik ilkelerini benimsemesi gerektiğine dikkat çekmektedir.

Öte yandan, eğitim kurumlarında yapılan mevcut İSG çalışmaları genellikle spesifik teknik alanlarla sınırlı kalmış, bütüncül bir kampüs perspektifinden yeterince ele alınmamıştır (Nejati ve Nejati, 2013; Sribanasarn ve ark., 2024). Özellikle meslek yüksekokulları düzeyinde yapılan kapsamlı çalışmaların azlığı, literatürde önemli bir eksiklik olarak göze çarpmaktadır. Ayrıca, Fine-Kinney yöntemi gibi sistematik risk değerlendirme araçlarının, üniversitelerde kapsamlı bir şekilde uygulanması halen yeterince yaygın değildir. Bu çalışmanın temel akademik katkısı, meslek yüksekokulu gibi "az tehlikeli" sınıflandırmasına sahip eğitim kurumlarında dahi önemli sosyal ve teknik risklerin bulunduğunu ortaya koymak ve İSG'nin sürdürülebilir kampüs yönetiminin vazgeçilmez bir parçası olduğunu vurgulamaktır. Bu sayede çalışma hem literatürdeki yöntem boşluğunu doldurmakta hem de üniversite düzeyinde sürdürülebilirlik uygulamalarına sosyal sürdürülebilirlik açısından özgün bir bakış açısı kazandırmaktadır.

Türkiye'de üniversite kampüslerinde İSG alanında gerçekleştirilen risk değerlendirme çalışmalarının büyük çoğunluğunun, belirli alanlara odaklanan dar kapsamlı yaklaşımlar içerdiği dikkat çekmektedir. Örneğin, çeşitli çalışmalarda risk analizleri yalnızca laboratuvar ortamlarıyla sınırlı tutulmuştur (Kurt, 2020). Bu doğrultuda, mikrobiyoloji laboratuvarları (Türk, 2012), mühendislik uygulama alanları ile mekanik laboratuvarlar (Deniz, 2019; Ersoy ve Kaya, 2019; Ulu ve Şahin, 2020) ve kimyasal araştırma laboratuvarları (Şeker, 2015; Usanmaz ve Köse, 2020) üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. Yine bazı çalışmalar iç ortam hava kalitesi (Yılmaz ve Bayın Sarıahmetoğlu, 2023), aydınlatma (Demir, 2018) veya uçucu organik bileşik maruziyeti (Dumanoglu ve Irmalı, 2025) gibi çevresel faktörleri değerlendirmeye odaklanmıştır. Diğer taraftan, risk değerlendirmeleri bazı kampüs bileşenleri özelinde gerçekleştirilmiş; örneğin atık yönetimi (Atasoy, 2018) veya acil durum senaryoları (Uysal, 2019) ele alınmıştır. Ancak bu çalışmalar çoğunlukla kampüs genelini kapsamayan, yalnızca belirli işlevsel alanlara yönelen analizlerle sınırlı kalmıştır.

Literatürdeki bulgular, eğitim kurumlarındaki İSG uygulamalarında risk temelli ve önleyici yaklaşımların yeterince içselleştirilmediğini ortaya koymaktadır (Dinçer ve Çubukçu, 2010; Baykal ve ark., 2022). Oysa sürdürülebilir bir öğrenim ortamının tesisi için kapsamlı bir risk değerlendirmesi süreci

temel bir adımdır. Bu noktada, tehlikelerin şiddeti, gerçekleşme olasılığı ve oluşma sıklığı kriterlerine dayanarak risk puanı oluşturan Fine-Kinney yöntemi gibi risk değerlendirme yöntemleri, risk düzeylerini nesnel biçimde belirlemenin yanı sıra müdahale önceliklerini saptamada da etkili bir araç sunmaktadır (Kinney ve Wiruth, 1976). Bu sistematik yapı yöneticilere güvenilir bir karar destek mekanizması sağlar.

1.2. Çalışmanın Kapsamı ve Amacı

Yükseköğretim kurumlarında İSG uygulamaları, yalnızca çalışanları değil; öğrenciler ve kampüste bulunan tüm bireyleri kapsayan bir anlayışla ele alınmalıdır. Literatürde yer alan çalışmalar, üniversitelerdeki fiziksel alanlarda karşılaşılan risklerin çok boyutlu olduğunu ve elektrik sistemlerinden yangın güvenliğine, ergonomik eksikliklerden kimyasal madde kullanımına kadar geniş bir yelpazeyi kapsadığını göstermektedir (Canverdi, 2021). Özellikle laboratuvar ve atölye gibi çalışma alanları, öğrenciler ve akademik personel açısından kimyasal ve biyolojik maruziyet riski taşımaktadır (Güngör, 2020).

Üniversite ortamlarında iş kazalarının meydana gelme olasılığı, eğitim verilen alanların tehlike sınıfına göre değişiklik göstermektedir. Ancak pek çok eğitim kurumu "az tehlikeli" sınıfında değerlendirildiği için, mevzuatsal olarak risk analizlerinin nispeten daha seyrek yapılması ve İSG profesyoneli istihdam edilmemesi gibi yasal boşluklar, koruyucu önlemlerin yetersiz kalmasına neden olmaktadır (Şener ve ark., 2023). Bu durum, iş kazaları ve meslek hastalıklarının geç tespitiyle sonuçlanmakta ve önleyici yaklaşımların uygulamaya yansıtılamamasına yol açmaktadır (Çabuk ve Onğulu, 2021). Bazı üniversiteler bünyesinde yürütülen risk değerlendirme çalışmaları hem fiziksel alanlardaki hem de organizasyonel yapıya ilişkin eksiklikleri ortaya koymuş; özellikle sınıflar, laboratuvarlar, ofisler ve ortak alanlarda ergonomik, mekanik ve yangınla ilgili risklerin ciddi seviyelerde olduğunu göstermiştir (Cumhur ve Ahıskalı, 2018; Uysal, 2019). Eğitim-öğretim faaliyetlerinin yürütüldüğü bu alanlarda alınması gereken tedbirlerin, yalnızca işverenlerin değil, aynı zamanda tüm akademik ve idari personelin ortak sorumluluğunda olduğu vurgulanmaktadır (Canverdi, 2021).

Bu nedenle kampüslerde yürütülecek sistematik risk analizlerinin sadece mevzuat uyumu gereği değil, sürdürülebilir ve güvenli bir eğitim ortamı inşa etme amacıyla yapılması gerektiği açıkça ortaya konmuştur. Üniversite kampüslerinin fiziksel altyapılarında yapılan değerlendirmeler, öğrencilerin ve personelin güvenliğini sağlamak adına risklerin tanımlanması, önceliklendirilmesi ve azaltılmasına yönelik düzenli analizlerin önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın amacı, bir üniversiteye bağlı meslek yüksekokuluna ait binalarda (sınıflar, laboratuvarlar, ofisler, tuvaletler ve koridorlar gibi) İSG açısından mevcut riskleri Fine-Kinney yöntemiyle sistematik biçimde değerlendirmek ve elde edilen bulgular doğrultusunda sürdürülebilir kampüs yönetimi anlayışına katkı sağlayacak iyileştirme önerileri sunmaktır. Çalışmada şu sorulara yanıt aranmıştır:

(i) Kampüs içerisinde hangi alanlar “kabul edilemez” düzeyde risk barındırmaktadır?

(ii) En sık karşılaşılan risk türleri nelerdir?

(iii) Elde edilen bulgular, sürdürülebilirlik bağlamında hangi yapısal veya yönetsel iyileştirme alanlarını işaret etmektedir?

Bu yönüyle çalışma, yalnızca saha temelli risk analizine dayanan özgün bir örnek sunmakla kalmamakta; aynı zamanda sürdürülebilir kampüs anlayışının İSG boyutuna ilişkin literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, bir üniversiteye bağlı meslek yüksekokulu kampüsünde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) risk değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Risk analizinde, tehlikenin oluşma olasılığı, şiddeti ve maruz kalma sıklığını dikkate alan Fine-Kinney yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, risklerin kantitatif olarak puanlanmasına olanak tanımakta ve önceliklendirme temelli müdahale kararlarını kolaylaştırmaktadır (Kinney ve Wiruth, 1976). Literatürde yaygın olarak kullanılan 5x5 L tipi matris yöntemi, olasılık ve şiddet bileşenlerine dayanarak pratik ve kabul görmüş bir çerçeve sunarken; Fine-Kinney yöntemi, bu iki unsura ek olarak maruz kalma sıklığını (frekans) da değerlendirerek, özellikle kullanıcı yoğunluğu yüksek alanlarda daha ayrıntılı ve önceliklendirme odaklı bir risk puanlaması yapılmasına olanak tanır. Bu üçlü parametre sistemi sayesinde, daha ayrıntılı ve karar destekleyici bir analiz sağlanmaktadır (Şimşek, 2020). Bu yönüyle, çalışmanın uygulamaya dönük bulgularının karar süreçlerine katkı potansiyelini artırmaktadır.

Yöntem, farklı sektörlerde (ör. inşaat, otelcilik, eğitim) başarıyla uygulanmakta olup (Gündüz ve Güner, 2021; Cündübeyoğlu ve Kayabaşı, 2022; Özmen, 2025, Türkiye'de 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun (2012) yürürlüğe girmesiyle birlikte kullanım alanı genişlemiştir. Fine-Kinney yöntemi, iş süreçlerinde hangi risklere ne düzeyde müdahale edilmesi gerektiğini belirlemeye yardımcı olurken, aynı zamanda alınacak önlemlerin planlanması ve kaynak tahsisi açısından da karar vericilere yol göstermektedir (Erzurumluoğlu ve ark., 2015). Risk puanı, olasılık (O), şiddet (S) ve frekans (F) değerlerinin çarpımı ile hesaplanmaktadır. Tablo 1, bu üç parametreye ait skalaları göstermektedir (Durmuş ve ark., 2021).

Bu puanlama sistemine göre, Olasılık (P), Şiddet (S) ve Frekans (F) değerlerinin çarpımı ile risk skoru (R) hesaplanmaktadır (Kinney ve Wiruth, 1976). Elde edilen risk puanları, aşağıdaki aralıklar doğrultusunda sınıflandırılarak gerekli aksiyonlar belirlenmektedir:

- **1 – 20**: Önemsiz risk – önlem öncelikli değil
- **21 – 70**: Olası risk – gözetim altında tutulmalı
- **71 – 200**: Önemli risk – uzun dönemde iyileştirilmeli
- **201 – 400**: Esaslı risk – kısa dönemde iyileştirilmeli
- **401 ve üzeri**: Kabul edilemez risk – derhal müdahale gerekli

Tablo 1. Fine – Kinney Skalası

İhtimal Skalası (O): Zarar ya da hasarın zaman içerisinde gerçekleşme olasılığıdır.		**Şiddet (S):** Tehlikenin gerçekleşmesi halinde oluşturacağı etkidir.	
Değer	**Kategori**	**Değer**	**Gerçekleşen Etki**
0,2	İmkânsız	1	Ramak Kala
0,5	Düşük İhtimal	3	Hafif Yaralanma
1	Oldukça düşük ihtimal	7	Ağır Yaralanma
3	Nadir ama mümkün	15	Kalıcı Hasar, Çevresel Zarar
6	Kuvvetle muhtemel	40	Ölümlü Kaza
10	Çok yüksek olasılıkla	100	Birden Fazla Ölümlü Kaza
Frekans (F): Tehlikeye maruz kalma sıklığıdır.			
Değer	**Açıklama**	**Kategori**	
0,5	Çok nadir	Yılda bir kez ya da daha az	
1	Oldukça nadir	Yılda bir ya da birden çok	
2	Nadir	Ayda bir ya da birden çok	
3	Ara sıra	Haftada bir ya da birden çok	
6	Sık sık	Günde bir ya da daha fazla	
10	Sürekli	Sürekli ya da saatte birden çok	

Bu doğrultuda Fine-Kinney yöntemi, üniversite ortamındaki fiziksel, kimyasal ve ergonomik tehlikelerin sistematik ve karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilmesine imkân tanımıştır. Yöntemin kantitatif yapısı, risklerin önem derecesine göre sınıflandırılmasına ve müdahale önceliklerinin somut biçimde belirlenmesine olanak sağlamıştır. Özellikle sınıflar, laboratuvarlar, ofisler ve ortak kullanım alanları gibi çok çeşitli mekânların yer aldığı kampüs yapılarında, bu yöntem hem kapsamlı bir analiz sunmakta hem de alınacak önlemlerin planlanması ve kaynakların etkin tahsisi konusunda karar vericilere rehberlik etmektedir.

2.1. Uygulama Alanı

Bu çalışmanın uygulama alanını, bir üniversiteye bağlı meslek yüksekokulunun fiziksel yapıları oluşturmaktadır. İncelenen yerleşke, yaklaşık 3500 öğrencinin eğitim aldığı ve 50 kişilik akademik-idari personelin görev yaptığı, dört katlı ana eğitim binası ile üç katlı atölye/laboratuvar binasından oluşmaktadır. Risk değerlendirmesi sürecinde, fiziksel yapıların kullanım yoğunluğu, işlevi ve kullanıcı profili dikkate alınarak çok yönlü bir inceleme gerçekleştirilmiştir.

Değerlendirmeye alınan alanlar; derslikler, bilgisayar laboratuvarları, teknik uygulama laboratuvarları, akademik ve idari ofisler, tuvaletler ve lavabolar, çay ocağı, koridorlar, merdivenler, acil çıkışları ve öğrencilere yönelik ortak kullanım alanlarıdır. Bu alanlarda maruz kalınabilecek risklerin nitelikleri ve yoğunlukları göz önünde bulundurulmuştur. Her alan, yerleşke planları, kullanıcı deneyimleri ve yerinde gözlemler aracılığıyla sistematik olarak analiz edilmiştir.

Risk değerlendirmesi sürecinde yapılan gözlemler akademik takvim dâhilindeki yoğun kullanım saatlerinde gerçekleştirilmiştir. Gözlemler, farklı gün ve zaman dilimlerinde tekrar edilerek veri güvenilirliği artırılmış; kullanıcı görüşleriyle desteklenen bulgular, tehlike önceliklendirmesinde referans olarak kullanılmıştır.

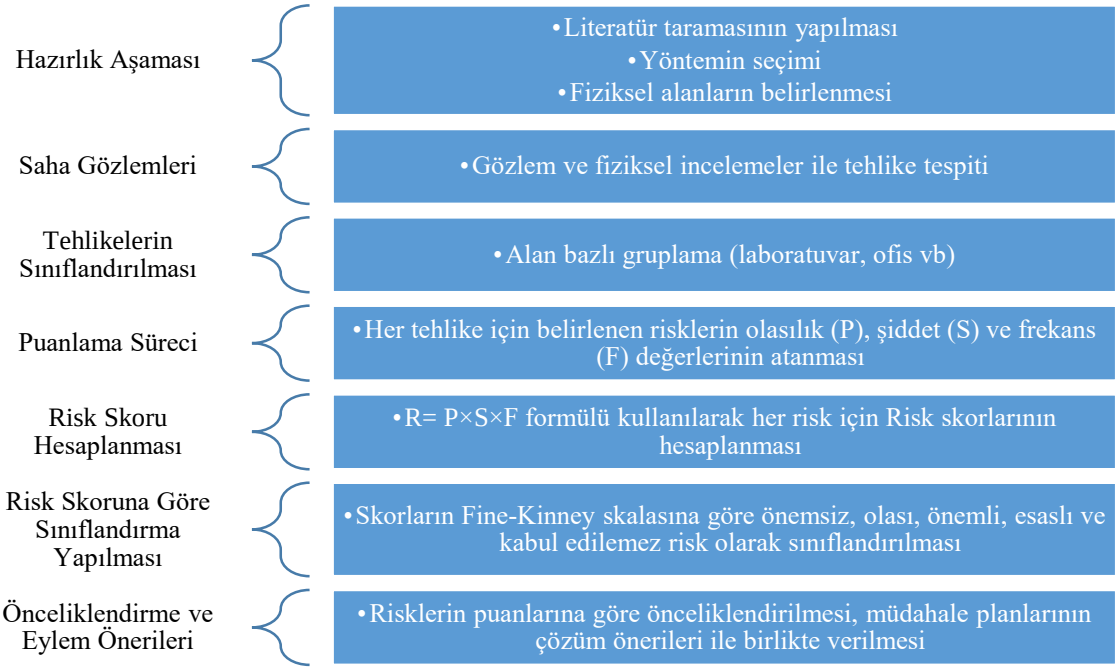
2.2. Veri Toplama Süreci

Çalışmanın veri toplama süreci, öncelikle uygulama alanlarına ilişkin olası tehlikelerin belirlenmesiyle başlamıştır. Değerlendirme hem ana eğitim binası hem de atölye/laboratuvar binası için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş, böylece her alanın kendine özgü riskleri belirlenmiştir. Tehlike tanımlamaları yapılırken yalnızca mevcut gözlemler değil, aynı zamanda çalışanların ve öğrencilerin görüşleri de alınmıştır. Bu kapsamda toplam 76 kişi (45 öğrenci, 26 akademik personel, 5 idari personel) ile yüz yüze görüşmeler gerçekleştirilmiş; katılımcıların gözlem ve deneyimlerine dayalı olarak, riskli alanlara ilişkin tespit ve önerileri alınmıştır. Elde edilen görüşler, saha bulgularını niteliksel olarak desteklemiş ve değerlendirme sürecine uygulamaya dönük katkı sağlamıştır.

Bu alanlardaki tehlikeler tanımlanmış ve bunlara ilişkin olasılık, şiddet ve frekans puanları, Fine-Kinney yönteminin kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Elde edilen sayısal veriler, Microsoft Excel programında tablolaştırılmış ve her bir tehlikenin risk puanı hesaplanarak sınıflandırılmıştır. Risk puanları, Fine-Kinney skalasına göre belirlenen eşik değerler doğrultusunda "önemsiz risk"ten "kabul edilemez risk"e kadar beş düzeyde kategorize edilmiştir. Görselleştirme amacıyla renk kodlaması (örneğin kırmızı: yüksek risk, sarı: orta risk, yeşil: düşük risk) ile bir risk haritası oluşturulmuş; böylece tehlikeli alanların görsel olarak tanımlanması ve önceliklendirilmesi sağlanmıştır.

Ayrıca, her bir yüksek riskli alan için spesifik düzeltici ve önleyici faaliyet önerileri yapılandırılmış, bu öneriler risk düzeyine göre kısa, orta ve uzun vadeli eylem planlarıyla ilişkilendirilmiştir. Veri toplama süreci, risklerin sadece mevcut durumunu değil, aynı zamanda müdahale gerekliliklerini de ortaya koyan kapsamlı bir değerlendirme zemini sunmuştur.

Sonuç olarak, yapılan çalışmanın genel akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



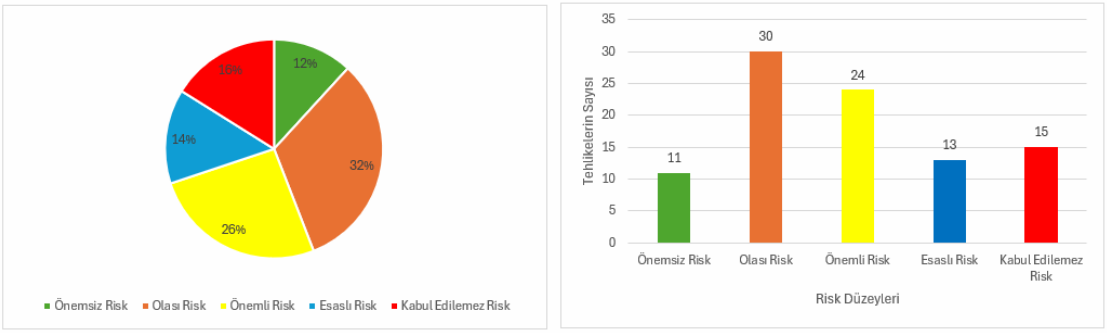
Şekil 1. Çalışmanın Akış Şeması

Şekil 1, risk değerlendirme sürecinde izlenen adımları sistematik biçimde özetlemektedir. Süreç, literatür taraması ve alan belirleme aşamasıyla başlamış; ardından saha gözlemleriyle tehlike tespiti yapılmış, riskler belirlenen parametrelere göre puanlandırılmıştır. Fine-Kinney yönteminin temelini oluşturan olasılık, şiddet ve frekans değerleri kullanılarak her bir tehlike için risk skoru hesaplanmıştır. Puanlama sürecinde saha gözlemleri, kullanıcı yoğunluğu, fiziksel koşullar dikkate alınmıştır. Bu skorlar, yöntemin sınıflamalarına göre derecelendirilmiştir. Son olarak, her risk düzeyi için önceliklendirme yapılmış ve müdahale planları önerilmiştir. Bu yaklaşım, kampüs genelinde risklerin hem sayısal hem de yönetsel açıdan ele alınmasına olanak sağlamıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan Fine-Kinney risk analizi sonucunda, meslek yüksekokulu binalarında toplam 93 adet risk belirlenmiş olup, sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre tehlikelerin risk düzeylerine göre dağılımı aşağıdaki gibi olup Şekil 2'de gösterilmiştir:

- **Kabul Edilemez Risk (≥ 401 puan):** 15 adet (%16)
- **Esaslı Risk (201–400 puan):** 13 adet (%14)
- **Önemli Risk (71–200 puan):** 24 adet (%26)
- **Olası Risk (21–70 puan):** 30 adet (%32)
- **Önemsiz Risk (< 21 puan):** 11 adet (%12)



Şekil 2. Risk Skorlarına Göre Risk Dağılımı ve Sayıları

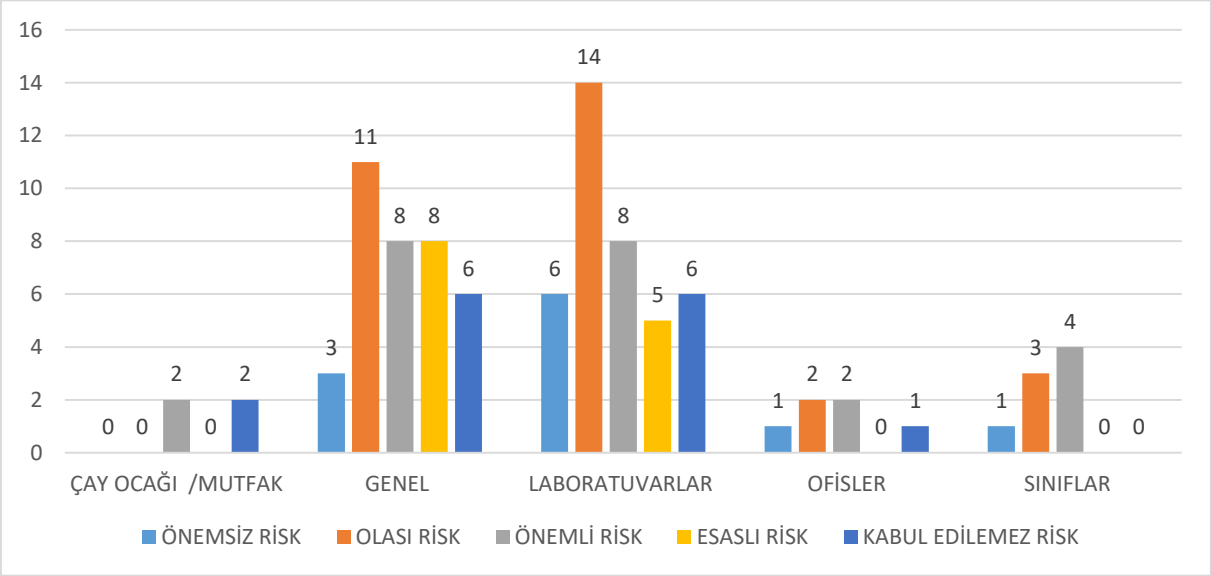
Şekil 2'ye göre, MYO genelinde en yüksek risk kategorisinde yer alan kabul edilemez riskler (%16) ve esaslı riskler (%14) dikkatle ele alınması gereken riskler arasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra, önemli riskli (%26) ve olası riskli (%32) riskler de mevcut olup, bu alanlarda iyileştirmeler yapılması gerektiği görülmektedir. Önemsiz riskler (%12) ise daha az öncelikli olmakla birlikte, yine düzenli izleme ve değerlendirme gerektiren durumları işaret etmektedir. Bu dağılım, acil müdahale edilmesi gereken alanların yanı sıra, uzun vadeli iyileştirmeler için bir temel oluşturmaktadır. Risklerin faaliyet alanlarına göre dağılımı da risk yönetimi açısından stratejik önem taşımaktadır. Yerleşkedeki tehlikelerin faaliyet alanlarına göre dağılımı Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Faaliyet Alanına Göre Risklerin Sayısı

Faaliyet Alanı	**Bulunan Risklerin Sayısı**	**Kabul Edilemez Risk Kategorisine Giren Tehlikelerin Sayısı**
Laboratuvarlar	39	6
Genel	36	6
Sınıflar	8	-
Ofisler	6	1
Çay Ocağı/Mutfak	4	2
Toplam	**93**	**15**

Genel kullanım alanları, laboratuvarlar, sınıflar, ofisler ve çay ocağı dışında kalan koridorlar, tuvaletler gibi ortak kullanım alanlarıdır. Bu kullanım alanlarında toplam 36 risk belirlenmiştir. Bunların 6'sı "kabul edilemez" ve 8'i "esaslı" risk düzeyindedir. Genel kullanım alanlarında tespit edilen "kabul edilemez" ve "esaslı" düzeydeki riskler arasında; yetersiz havalandırma ve klima sistemleri, acil durum çıkışlarının işlevselliği, özellikle yüksek katlardaki korkulukların yapısal güvenliği (örneğin sallanma problemi), elektrik tesisatı ve topraklama sistemlerine ilişkin periyodik kontrol eksiklikleri, yangın algılama ve söndürme sistemlerinin düzenli denetlenmemesi, yangın söndürücü tüplerin ilgili noktalarda bulunmaması veya kontrollerinin yapılmaması, tatbikat eksiklikleri, açıkta kablo bulunması ve elektrik çarpması riski gibi durumlar öne çıkmaktadır. Toplam 39 riskin değerlendirildiği laboratuvar ve atölye alanları, 6 adet "kabul edilemez" risk sayısı bakımından da en problemli alanlardan biridir. Elektrik tesisatlarının açıkta olması, yangın söndürme tüplerinin eksikliği veya kontrolsüzlüğü, ergonomik olmayan çalışma koşulları, kimyasal maruziyet riski, yeterli havalandırmanın bulunmaması, ilkyardım malzemelerinin yokluğu gibi çok çeşitli ve ciddi riskler mevcuttur. Ayrıca engelli erişimine uygun olmayan yapılar da sosyal sürdürülebilirlik açısından önemli bir eksikliktir. Örneğin, laboratuvar binasında yer alan engelli asansörü uzun süredir çalışmamakta ve bu durum için herhangi bir alternatif erişim imkânı sunulmamaktadır. Ayrıca bazı katlara ulaşımı sağlayan merdivenlerde rampa ya da tutunma aparatı gibi yardımcı erişim unsurlarının bulunmaması, erişilebilirliği daha da kısıtlamaktadır. Benzer şekilde, engelli tuvaletlerinin kullanım dışı bırakılması ve bina giriş kapılarında sensörlü otomatik sistemlerin yer almaması da erişim açısından önemli sorunlar yaratmaktadır. Tüm bu durumlar, fiziksel engeli bulunan bireyler için yapısal düzeyde ciddi kısıtlayıcılara neden olmaktadır. Ofis alanlarında toplam 6 risk tespit edilmiş, bunlardan biri "kabul edilemez" risk kategorisinde yer almıştır. Dolapların sabitlenmemesi, uygun olmayan termal konfor koşulları nedeniyle elektrikli ısıtıcı kullanımına yönelinmesi, ergonomik yetersizlikler ve açıkta kalan elektrik kabloları gibi riskler ön plana çıkmaktadır. Özellikle elektrik sistemine ilişkin güvenlik zafiyetleri acil önlem alınması gereken durumlardandır. Sınıflarda toplam 8 adet risk tanımlanmış, bunlardan 4'ü "önemli" ve 3'ü "olası" risk düzeyindedir. Platformlarda ve tahta önlerinde işaretleme eksiklikleri nedeniyle düşme ve takılma tehlikeleri mevcuttur. Ayrıca elektrik prizlerinin kırık olması ve acil çıkış levhalarının sabit olmaması sınıflarda acil durum güvenliğini tehdit eden unsurlar arasındadır. Çay ocağı/mutfak alanında az sayıda

tehlike (4 adet) tespit edilmesine rağmen, 2'si "kabul edilemez" risk düzeyindedir. Özellikle çay kazanlarının sıcak parçalarının kullanıcıların üzerine devrilme riski ve elektrikli ısıtıcı kaynaklı yangın tehlikesi ciddi müdahale gerektiren sorunlardır. Dolapların sabitlenmemiş olması da deprem veya çarpma anında ihtimalini doğurmaktadır. Tuvaletlerde doğrudan sağlık ve hijyenle ilişkili biyolojik tehlikeler öne çıkmaktadır. Temizlik eksiklikleri, açıkta duran kimyasal maddeler, düzgün monte edilmemiş aynalar ve engelli tuvaletlerinin kullanım dışı olması bu alanda belirlenen başlıca sorunlardır. Hijyen eksikliği, bulaşıcı hastalıklara açık risk yaratmakta; yapıların fiziksel durumları ise güvenlik sorunlarını beraberinde getirmektedir. Alanlara göre risk sayıları ve grupları Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Alanlara Göre Risk Dağılımı

Yapılan analiz sonucunda en fazla risklerin 39 adet ile laboratuvarlar ve 36 adet ile genel alanlarda yer aldığı görülmektedir. Tüm alanlarda toplamda 15 adet "kabul edilemez" risk belirlenmiş; bunların 6'sı laboratuvarlarda, 6'sı genel alanlarda, 2'si çay ocağında ve 1'i ofislerde yer almaktadır. Yalnızca kabul edilemez risk düzeyinde sınıflandırılan 15 tehlikeye ait özet bilgiler, temsili olarak Tablo 3'te sunulmuştur.

Ayrıca toplam 13 "esaslı risk", 24 "önemli risk", 30 "olası risk" ve 11 "önemsiz risk" tanımlanmıştır. Bu veriler, laboratuvar ve genel kullanım alanlarının İSG açısından en yoğun müdahale gerektiren bölgeler olduğunu göstermektedir. Özellikle laboratuvar ortamlarında kullanılan kimyasallar, cihazlar, elektrik sistemleri ve yangın riskleri nedeniyle yüksek risk potansiyeli dikkat çekmektedir. Genel alanlarda ise yangın çıkışlarının engellenmesi, kaygan zeminler ve acil durum yönlendirmeleri gibi konular öne çıkmaktadır.

Tablo 3. Kabul Edilemez Risklere İlişkin Fine-Kinney Değerlendirme Tablosu

FAALİYET ALANI	MEVCUT DURUM	TEHLİKE	OLASI SONUÇLAR/ RİSKLER	P	F	S	R	DÜZELTICI ÖNLEYİCİ FALIYET
ÇAY OCAĞI /MUTFAK	Elektrikli ısıtıcının konumu ve çevresinde bulunan yanıcı maddeler nedeniyle alev alma ihtimali bulunmaktadır.	Elektrikli ısıtıcı kaynaklı yangın	Uzuv Kaybı/Ölüm	1	10	40	400	Termal konfor şartlarının merkezi sistemlerle sağlanması, Elektrikli ısıtıcıların ortamdan tamamen kaldırılması, Bu mümkün değilse, cihazların duvara sabitlenmesi veya fanlı, otomatik kapanma özellikli güvenli bir modelle değiştirilmesi, Yanıcı maddelerin ısı kaynağından en az 1 metre uzağa yerleştirilmesi.
ÇAY OCAĞI /MUTFAK	Mutfakta bulunan dolap sabitlenmemiştir; deprem anında devrilerek tehlike oluşturabilir.	Dolabın devrilmesi veya düşmesi	Kalıcı Hasar/Yaralanma/İş Kaybı/Çevresel Engel	6	6	15	540	Dolapların duvara sabitlenmesi, Üst bölmelere ağır nesnelerin yerleştirilmemesi, Yüksekteki dolap kapaklarının mıknatıslı sistemle sabitlenmesi. Deprem sonrası tehlikeli eşyaların düşme riskine karşı düzenli kontrol yapılması.
GENEL	Binanın alt girişinde bulunan camlı dolapların sabitlenmemesi, özellikle deprem gibi acil durumlar sırasında çıkış yollarının kapanmasına neden olabilir.	Acil durumlarda çıkışların engellenmesi	Birden Fazla Ölüm/Çevresel felaket	10	1	100	1000	Camlı dolabın duvara sabitlenmesi veya bulunduğu yerden tamamen kaldırılması, Acil çıkış yollarının periyodik olarak kontrol edilmesi ve engel oluşturabilecek her türlü nesnenin kaldırılması, Çalışanların acil tahliye yolları konusunda bilgilendirilmesi ve tatbikat yapılması.
GENEL	Binada bulunan yangın söndürücü tüplerin büyük kısmının periyodik kontrolleri yapılmıştır; ancak bazı tüplerin kontrol dışı kaldığı tespit edilmiştir.	Acil durumda yangın tüplerinin işlevsiz olması / yangına etkin müdahale edilememesi.	Uzuv Kaybı/Ölüm	3	10	40	1200	Tüm yangın söndürme tüplerinin yönetmeliklere uygun şekilde periyodik kontrol ve dolumlarının yapılması, Etiketleme sistemiyle kontrol tarihi geçmiş olanların kolayca tespiti, Sorumlu kişilere yangın güvenliği eğitimlerinin düzenli olarak verilmesi, Periyodik kontrol eksikliklerinin iç denetimlerde raporlanması ve takibinin yapılması.
GENEL	3. katta yangın söndürme cihazı işaretinin bulunduğu yerde yangın tüpü bulunmamaktadır. Aynı koridorda ve farklı katlarda da yangın tüpleri işaretlenmemiş ve sabitlenmemiş şekilde yer almaktadır.	Acil durumda yangın tüplerine ulaşılamaması veya yerlerinin tespit edilememesi nedeniyle yangına müdahalede gecikme yaşanması.	Uzuv Kaybı/Ölüm	3	10	40	1200	Yangın söndürücülerin ilgili yönetmeliğe uygun şekilde sabitlenmesi, Her cihazın yerinin açıkça görülebilecek işaretlemelerle belirtilmesi, Eksik veya yanlış konumlandırılmış işaretlerin kontrol edilerek güncellenmesi, Kat bazında düzenli yangın güvenliği denetimlerinin yapılması.
GENEL	Havalandırma ve klima tesisatlarının periyodik kontrollerinin yapılıp yapılmadığına dair kayıt veya bilgi bulunmamaktadır.	Tesisat arızası veya işlev kaybı sonucu ortam hava kalitesinin bozulması	Hasar/Yaralanma/ Dış İlkyardım ihtiyacı	3	10	15	450	Havalandırma ve klima sistemlerinin periyodik kontrollerinin, üretici talimatları ve yönetmelik hükümlerine göre yapılması, Tüm kontrollerin kayıt altına alınması ve denetim sırasında ibraz edilebilir hâlde tutulması, Ortam havası kalitesine ilişkin ölçüm ve değerlendirmelerin periyodik olarak yapılması,

GENEL	Zemin kattaki kadın ve erkek personel tuvaletlerinde temizlik sıklığı yetersizdir. Ayrıca erkek tuvaletinde sifon bozuk, her iki tuvalette de klozet örtüsü devre dışıdır.	Biyolojik etkenlere maruz kalma sonucu hastalık bulaşma	Hasar/Yaralanma/ Dış İlkyardım ihtiyacı	6	10	7	420	Temizlik hizmetleri için periyodik çizelge oluşturulması ve imzalı kayıt tutulması, Sifon ve klozet örtüsü sensörlerinin acilen onarılması, Tuvaletlerde hijyen eğitiminin görsellerle desteklenerek yaygınlaştırılması, Tuvalet kullanımının sürekli izlenerek eksikliklerin günlük olarak raporlanması.
GENEL	Engelli bireylerin kullanımı için ayrılmış tuvalet kullanım dışıdır. Bu durum erişim kısıtı yaratmakta, acil durum tahliyeleri dâhil olmak üzere ciddi güvenlik zafiyetlerine neden olabilmektedir.	Engelli bireylerin tuvalet ihtiyaçlarını hijyenik ve güvenli şekilde karşılayamaması, tahliye sırasında erişim engeli oluşması.	Hasar/Yaralanma/ Dış İlkyardım ihtiyacı	6	10	7	420	Engelli tuvaletinin uygun şekilde işler hale getirilmesi, Giriş çıkış kolaylığının sağlanması ve tüm donanımların (ayna, lavabo, tutunma barları vb.) ergonomik düzene getirilmesi, Bakım süresince tuvaletin kilitlenerek dışarıdan görünür uyarı işaretiyle geçici süreyle kullanım dışı bırakılması, Erişilebilirlik denetiminin periyodik olarak yapılması.
LABORATUVAR	Laboratuvar ve atölyelerin bulunduğu binanın alt girişinde yer alan camlı dolap sabitlenmemiştir. Deprem gibi acil durumlarda devrilerek çıkış yollarını kapatma riski taşımaktadır.	Acil durumlarda tahliye yollarının kapanması ve çıkışların engellenmesi.	Birden Fazla Ölüm/Çevresel felaket	10	1	100	1000	Cam dolabın duvara sabitlenmesi veya giriş alanından tamamen kaldırılması, Acil çıkış yollarında hiçbir sabit veya taşınabilir engel bırakılmaması, Giriş-çıkış alanlarının düzenli olarak kontrol edilmesi, Tüm çalışanların ve öğrencilerin acil tahliye güzergâhları hakkında bilgilendirilmesi.
LABORATUVAR	Laboratuvar/atölye binasında bulunan tüm yangın söndürme tüplerinin periyodik kontrollerinin yapılmadığı tespit edilmiştir.	Acil durumda yangın tüplerinin işlevsiz olması nedeniyle yangına etkili müdahale edilememesi.	Uzuv Kaybı/Ölüm	3	10	40	1200	Tüm yangın tüplerinin periyodik kontrollerinin ve dolumlarının yönetmelik hükümlerine uygun şekilde yapılması, Her bir yangın tüpü için kontrol tarihi ve durumu gösteren etiket sisteminin uygulanması,
LABORATUVAR	Laboratuvar/atölye binasında bulunan tüm acil çıkış kapılarının kilitli olduğu tespit edilmiştir.	Acil durumlarda tahliyenin sağlanamaması.	Birden Fazla Ölüm/Çevresel felaket	10	1	100	1000	Tüm acil çıkış kapılarının kilitlerinin sürekli açık ve erişilebilir olacak şekilde düzenlenmesi (örneğin panik bar sistemleriyle), Kapı önlerinde hiçbir şekilde malzeme bulundurulmaması, Acil çıkış yollarının sürekli açık, engelsiz ve görünür olması için düzenli denetim yapılması
LABORATUVAR	Laboratuvar/atölye binasındaki lavabolarda bazı kimyasallar ağzı açık şekilde bırakılmıştır. Bu durum, kimyasalların dökülerek kaygan zemin oluşturmasına neden olabilir.	Kimyasalların dökülmesi sonucu kayma, zehirlenme veya temasla yaralanma	Kalıcı Hasar/Yaralanma/İş Kaybı/Çevresel Engel	6	6	15	540	Tüm kimyasalların ağzı kapalı şekilde ve uygun etiketlemeyle depolanması, Mümkünse kilitli kimyasal dolaplarda saklanması, Kimyasal hijyen ve güvenli depolama konularında personelin bilgilendirilmesi, Dökülmelere karşı ikincil bir tepsi veya absorban malzeme kullanımı.

LABORATUVAR	Laboratuvar/atölye binasının zemin katında bulunan yangın dolabında gereksiz malzemeler yer almaktadır. Bu durum, acil bir durumda yangına müdahaleyi zorlaştırabilir.	Yangına müdahalenin gecikmesi veya mümkün olmaması.	Birden Fazla Ölüm/Çevresel felaket	10	1	100	1000	Tüm yangın dolaplarının kontrol edilmesi, içerisinde yalnızca yangınla mücadele ekipmanlarının bulunmasının sağlanması, Gereksiz malzemelerin tamamen kaldırılması ve dolapların periyodik olarak denetlenmesi, Yangın dolaplarının önünün daima açık tutulması.
LABORATUVAR	Matbaa laboratuvarının bazı noktalarında zemin delinmiş ve elektrik bağlantıları açıkta kalmıştır. Bu bağlantıların uygun şekilde izole edilmediği ve topraklama yapılmadığı gözlemlenmiştir.	Açıkta bulunan iletken parçalar nedeniyle elektrik çarpması	Kalıcı Hasar/Yaralanma/İş Kaybı/Çevresel Engel	6	6	15	540	Tüm açıkta kalan kabloların yalıtılarak güvenli hale getirilmesi, Elektrik tesisatının yetkili personelce kontrol edilerek topraklama sistemine entegre edilmesi, Açıklıkların kapatılarak zeminin yeniden betonlanması, Uygulama sonrası elektrik mühendisi tarafından güvenlik onay raporu alınması.
OFİSLER	Ofislerde termal konfor şartları sağlanamadığı için personel bireysel olarak elektrikli ısıtıcılar kullanmaktadır.	Elektrikli ısıtıcıdan kaynaklı yangın	Uzuv Kaybı/Ölüm	1	10	40	400	Termal konforun (sıcaklık, nem, hava akımı) merkezi sistemle sağlanması, Elektrikli ısıtıcıların ortamdan tamamen kaldırılması, Geçici çözümler gerekiyorsa fanlı, otomatik kapanma özellikli güvenli modellerin kullanılması,

Gerçekleştirilen risk analizi neticesinde, meslek yüksekokulu yerleşkesinde tespit edilen fiziksel, kimyasal, ergonomik ve biyolojik tehlikelerin giderilmesine yönelik kapsamlı düzeltici ve önleyici faaliyet önerileri geliştirilmiştir. Bu kapsamda; zeminlerdeki bozulmaların onarılması, seviye farklarının görünür biçimde işaretlenmesi, dolap ve raf sistemlerinin duvara sabitlenmesi gibi yapısal güvenlik önlemleri öncelikli müdahale alanlarını oluşturmaktadır. Elektrik sistemlerine ilişkin olarak; açıkta kalan iletken parçaların izole edilmesi, kablo hatlarının uygun biçimde düzenlenmesi, sigorta kutularının koruma altına alınması ve yalıtkan paspasların temin edilmesi önerilmektedir. Yangın güvenliği açısından ise tüm yangın söndürme ekipmanlarının mevzuata uygun şekilde periyodik kontrolünün sağlanması, eksik veya uygun olmayan tüplerin yenilenmesi ve yönlendirme işaretlerinin görünür biçimde yerleştirilmesi gerekmektedir. Kimyasal maddelerin kapalı, kilitli ve uygun dolaplarda depolanması, ilkyardım setlerinin erişilebilir noktalara yerleştirilmesi, acil çıkış kapılarının daima erişime açık tutulması diğer kritik önlemler arasındadır.

Tüm bu düzeltici faaliyetlerin etkili bir biçimde uygulanması, yalnızca teknik bir gereklilik değil; aynı zamanda işverenin yasal yükümlülüğü ve kurumsal yönetimin asli sorumluluğudur. 6331 sayılı İSG Kanunu çerçevesinde, eğitim kurumlarında işveren sıfatıyla hareket eden üniversite yönetimi, çalışanların ve öğrencilerin sağlıklı ve güvenli bir ortamda bulunmalarını sağlamakla yükümlüdür (6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012). Bu doğrultuda, periyodik bakım-onarım faaliyetlerinin sistematik olarak yürütülmesi, İSG eğitimlerinin tüm personele düzenli aralıklarla verilmesi, acil durum tatbikatlarının gerçekleştirilmesi ve termal konfor ile hijyen koşullarının iyileştirilmesi, sürdürülebilir kampüs vizyonunun temel bileşenleri arasında yer almalıdır. Ayrıca, ergonomik iyileştirmeler, uygun çalışma ekipmanlarının sağlanması ve işaretleme sistemlerinin güncellenmesi gibi uygulamalar da yalnızca bireysel sağlık açısından değil; kurumsal verimlilik, yasal uyum ve sosyal sorumluluk açısından da kritik önem taşımaktadır. Hijyen eksiklikleri, engelli erişimine dair fiziksel engeller ve ergonomik sorunlar, İSG'nin yalnızca fiziksel kazalarla sınırlı olmadığını; aynı zamanda sosyal dışlanma, bulaşıcı hastalık riski gibi daha görünmez ancak bir o kadar kritik tehlikeleri de içerdiğini göstermektedir. Bu bulgular, Kayapınar Kaya ve ark. (2019) gibi sosyal sürdürülebilirlik bileşenlerinin üniversite yönetimlerinde geri planda kaldığını belirten çalışmalarla örtüşmektedir.

Risk derecelerinin bu şekilde dağılması, meslek yüksekokullarında fiziksel mekânların iş sağlığı ve güvenliği açısından bütüncül olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle "kabul edilemez" ve "esaslı" risk içeren alanlara yönelik düzeltici ve önleyici faaliyetlerin hızla uygulanması hem çalışanlar hem de öğrenciler için sürdürülebilir, güvenli ve sağlıklı bir eğitim ortamı oluşturmanın ön koşuludur. Bu genel tablo, yalnızca mevcut risklerin tanımlanmasıyla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda yükseköğretim kurumlarında İSG uygulamalarının sürdürülebilirlik perspektifiyle ele alınması gerekliliğini de ortaya koymaktadır.

Yapılan çalışma eğitim ortamlarının İSG açısından sahip olduğu çok boyutlu riskleri açıkça ortaya koymuştur. Özellikle laboratuvarlar ve genel kullanım alanlarında yoğunlaşan "kabul edilemez" ve "esaslı" düzeydeki riskler, tüm paydaşları kapsayıcı bir şekilde ve kurumsal sürdürülebilirlik ile sosyal

sorumluluk açısından da ele alınmalıdır. Bu bağlamda, yükseköğretim kurumlarının 'az tehlikeli işyeri' sınıfında yer almasına karşın, barındırdıkları yapısal ve sosyal risklerin ciddi sonuçlara yol açabileceği gözlemlenmiştir. Bu durum, kurumların, kapsamlı sürdürülebilirlik çerçevesinde stratejik İSG planlamasına ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Benzer çalışmalar, yükseköğretim kurumlarının İSG uygulamalarında sistematik yaklaşım eksikliğine işaret etmektedir. Bu bağlamda, elde edilen bulgular Fine-Kinney yönteminin yerleşke temelli risk yönetimi için etkin bir araç olduğunu desteklemektedir. Ayrıca bu yöntem hem risk derecelendirmesi hem de düzeltici faaliyet önerileri açısından yönetici ve iş güvenliği uzmanlarına karar desteği sağlamaktadır. Bu doğrultuda, risk analizine dayalı olarak geliştirilen düzeltici ve önleyici faaliyetler zaman önceliğine göre aşağıda yapılandırılmıştır. Eylemler; hızlı müdahale gerektiren teknik önlemlerden, orta vadeli yapısal iyileştirmelere ve uzun vadeli stratejik dönüşüm hedeflerine kadar uzanmaktadır. Bu yapı, üniversite yönetimi için eylem önceliği ve kaynak planlaması açısından stratejik bir yol haritası sunmaktadır.

- Kısa Vadeli (0–6 ay) Öneriler
    - Yangın söndürücü tüplerin periyodik kontrolü
    - Elektrik prizleri ve açıkta kalan kabloların izole edilmesi
    - Hijyen ve temizlik planlarının düzenlenmesi
    - Kaygan zeminlerin geçici işaretlenmesi
    - Acil çıkışların erişilebilirliğinin sağlanması
    - Acil çıkış levhalarının eksiksiz yerleştirilmesi
    - Küçük çaplı zemin bozulmalarının tamiri
    - Tatbikat ve yangın eğitimlerinin yıllık plana dahil edilmesi
- Orta Vadeli (6-12 ay) Öneriler
    - Dolap ve raf sistemleri gibi yapısal olmayan elemanların duvara sabitlenmesi
    - Tesisat (elektrik, su, havalandırma) ve yapı elemanlarının onarımı
    - Ergonomik eksikliklerin (çalışma koltuğu, masa vb.) giderilmesi
    - Kimyasal maddeler için uygun dolap sistemlerinin kurulması
    - Yıllık plana dahil edilen tatbikat ve yangın eğitimlerinin periyodik olarak uygulanması
    - Havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin bakım ve filtre kontrolleri
- Uzun Vadeli (12-24 ay) Öneriler
    - Engelli erişimi için asansör, rampa ve tuvalet düzenlemeleri
    - İSG eğitimlerinin tüm personele yönelik sürdürülebilir olarak sistemleştirilmesi
    - Dijital izleme ve denetim sistemlerinin entegre edilmesi
    - Periyodik değerlendirmeleri izleyen izleme–geri bildirim mekanizmalarının kurulması

Bu çalışmada elde edilen bulgular, üniversite kampüslerinde sürdürülebilirlik uygulamalarının yalnızca çevresel boyuta odaklanmakla sınırlı kalmaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle laboratuvarlarda tespit edilen yüksek risk düzeyleri ve ortak alanlara ilişkin erişim/güvenlik sorunları, İSG'nin sosyal sürdürülebilirliğin temel bileşenlerinden biri olduğunu göstermektedir. Bu durum,

Kalawi (2021)'nin sürdürülebilir kampüs tasarımında öğrenci sağlığına etki eden çevresel faktörlerin belirleyici rol oynadığı yönündeki bulgusuyla örtüşmektedir. Aynı şekilde, Hergül (2021) tarafından vurgulanan fiziksel düzenlemelerin ergonomi ve güvenlik temelli yeniden ele alınması gerekliliği de çalışmamızdaki dolap sabitleme ve zemin iyileştirme gibi önerilerle doğrudan ilişkilidir. Çalışma, ayrıca Kayapınar Kaya ve ark. (2019) ile Gedikkaya ve ark. (2022)'nin sosyal sürdürülebilirlik bileşenlerinin üniversitelerde geri planda kaldığı yönündeki değerlendirmelerini desteklemektedir. Özellikle engelli erişimi, acil çıkış güvenliği ve ergonomik düzenlemeler gibi unsurların yeterince sistematik biçimde ele alınmadığı gözlemlenmiştir. Bu açıdan, çalışmanın İSG odaklı yaklaşımı, Ağı Günerhan ve Günerhan (2016)'nın öne sürdüğü sosyal, çevresel ve yönetsel boyutları kapsayan sürdürülebilir üniversite modeline yönelik bir uygulama örneği sunmaktadır. Ayrıca, bu kapsamlı yaklaşım, Lozano (2006)'nın üniversitelerin sürdürülebilirlikte öncü olabilmesi için tüm paydaşları kapsayan bütüncül sistem ihtiyacına da karşılık gelmektedir.

Aynı zamanda, literatürde sıklıkla dar kapsamlı laboratuvar değerlendirmelerine odaklanan çalışmalardan (örn. Şeker, 2015; Kurt, 2020; Ulu ve Şahin, 2020) farklı olarak, kampüs bütününde çoklu mekânsal alanları kapsayan bütüncül bir İSG risk değerlendirmesi modeli sunarak özgün bir katkı sağlamaktadır. Ancak yapılan kapsamlı literatür taramasına rağmen, Türkiye'de meslek yüksekokulu düzeyinde kampüs bütününü ele alan ve Fine-Kinney yöntemiyle gerçekleştirilen bir İSG risk değerlendirmesi çalışmasına rastlanmamıştır. Mevcut yayınların genellikle laboratuvarlar, atık yönetimi, aydınlatma ya da iç ortam hava kalitesi gibi sınırlı alanlara odaklanması, alanda karşılaştırmalı değerlendirmeleri zorlaştırmakta; ancak aynı zamanda bu çalışmanın literatürdeki önemli bir boşluğu doldurduğunu da göstermektedir. Bu yönüyle, çalışmamız kampüs genelinde çoklu mekânsal alanları kapsayan ve sosyal sürdürülebilirlik bileşenlerini önceliklendiren bütüncül bir İSG risk analizi sunarak hem kuramsal hem de uygulamalı düzeyde önemli bir katkı sağlamaktadır.

Çalışmanın bir diğer katkısı ise İSG ile sürdürülebilirlik kavramı arasındaki doğrudan ilişkiyi görünür kılmasıdır. Sürdürülebilirlik çoğu zaman çevre dostu uygulamalarla sınırlı bir anlayışla ele alınırken, aslında bireylerin sağlıklı, güvenli ve erişilebilir ortamlarda öğrenim ve çalışma hakkı da bu kavramın temel bileşenlerinden biridir. Bu açıdan, risklerin kontrol altına alınması sadece bireysel sağlık değil; aynı zamanda kurumsal süreklilik, verimlilik ve sosyal sorumluluk bağlamında da değerlendirilmelidir.

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, bir devlet üniversitesine bağlı meslek yüksekokulunun çeşitli fiziksel alanlarında yürütülen Fine-Kinney temelli risk değerlendirmesi sonucunda, toplam 93 tehlike sistematik biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, yerleşke genelinde özellikle laboratuvarlar ve genel kullanım alanlarında "kabul edilemez" ve "esaslı" düzeyde risklerin yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Söz konusu risklerin sadece iş kazaları açısından değil; aynı zamanda sürdürülebilir, güvenli ve erişilebilir bir eğitim ortamının inşası bakımından da ele alınması gerekmektedir.

Analiz sonuçlarına göre tehlikelerin %30'u esaslı veya kabul edilemez düzeydedir. Bu oran, yükseköğretim kurumlarının "az tehlikeli işyeri" sınıfında yer almasına rağmen ciddi yapısal, yönetsel ve ergonomik riskler barındırabileceğini göstermektedir. Özellikle laboratuvarlar ve genel kullanım alanlarında bu tür risklerin yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. En sık karşılaşılan risk başlıkları şunlardır:

- Yangın güvenliği önlemlerinin yetersizliği
- Elektrik tesisatı ve açıkta kalan kablolar
- Yetersiz havalandırma ve iklimlendirme
- Ergonomik eksiklikler ve fiziksel engeller
- Acil çıkış yollarının ve kapılarının işlevselliği
- Engelli erişimine uygun olmayan yapı unsurları

Bu noktada, işveren sıfatıyla üniversite yönetiminin 6331 sayılı İSG Kanunu doğrultusunda tüm bu riskleri önleme, kontrol altına alma ve sürdürülebilir biçimde izleme sorumluluğu bulunmaktadır (6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012).

Bu çalışmanın bulguları, sadece teknik risklerin belirlenmesini değil, aynı zamanda farklı kampüs paydaşları açısından sürdürülebilirlik hedeflerinin daha bütüncül değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Üniversite yönetimi için bu analiz, önleyici bakım ve bütçe planlamasında stratejik bir karar destek aracıdır. Öğrenciler açısından ise daha güvenli, erişilebilir ve sağlıklı bir öğrenim ortamının tesisi anlamına gelir. Akademik ve idari personel için ergonomik iyileştirmeler, yangın güvenliği ve termal konfor gibi konular doğrudan iş verimliliği ile ilişkilidir. Yerel sanayi ve toplum ise güvenli kampüs altyapısı ve iş birlikleri yoluyla daha dirençli bir üniversite-toplum ilişkisi kurabilir. Bu bağlamda, çalışmanın çıktıları yalnızca içsel gelişimi değil, toplumsal sürdürülebilirlik açısından da önemli faydalar sunmaktadır.

Çalışmanın sınırlılıkları arasında, risk değerlendirmesinin yalnızca üniversiteye bağlı bir meslek yüksekokulunun iç mekanlarında gerçekleştirilmiş olması ve kampüsün açık alanları ve diğer fakültelerini kapsamaması sayılabilir. Bu durum, elde edilen bulguların tüm üniversite kampüsü için genellenebilirliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, gözlemler akademik takvim doğrultusunda yüksek kullanıcı yoğunluğunun yaşandığı dönemlerde gerçekleştirilmiştir. Bu tercih, bu alanlarının en aktif şekilde kullanıldığı zamanlarda ortaya çıkan risklerin daha doğru ve temsil edici biçimde belirlenmesini hedeflemektedir. Ancak bu yaklaşımın doğal bir sonucu olarak, yılın farklı dönemlerinde ya da düşük yoğunluklu zaman dilimlerinde ortaya çıkabilecek bazı risk türleri analiz dışında kalmış olabilir. Kullanıcı görüşlerinin değerlendirme sürecine dâhil edilmesi önemli bir katkı sağlamış olmakla birlikte, görüşme yapılan kişi sayısının sınırlı oluşu, bazı tehlike türlerinin yeterince temsil edilememesine neden olabilir. Bununla birlikte, çalışmada psikososyal risk faktörleri değerlendirme dışında bırakılmıştır. Bu tür risklerin nesnel biçimde değerlendirilebilmesi için kapsamlı anket çalışmaları, psikometrik ölçekler ve tüm çalışan gruplarının katılımını gerektiren etik onaylı veri toplama süreçlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut çalışmanın kapsamı bu tür nitel ve nicel verilerin toplanmasına uygun olmayıp, araştırmanın temel odağı diğer risklerin tespiti üzerine kurulmuştur. Bu nedenle psikososyal risklerin

sistematik değerlendirmesi, izleyen araştırmalarda ele alınması gereken önemli bir alan olarak görülmektedir. Son olarak, önerilen düzeltici ve önleyici faaliyetlerin uygulanma süreci henüz başlatılmadığından, bu önlemlerin etkinliği ve risk düzeylerine etkisi değerlendirilememiştir. Bu bağlamda, izleme-geri bildirim döngüsünün dahil edildiği uzunlamasına çalışmaların, gelecekte sürdürülebilir kampüs yönetimi açısından önemli katkılar sunabileceği düşünülmektedir

Gelecek çalışmalarda sürdürülebilir kampüs yönetimi, yalnızca bina içi risklerle sınırlı kalmadan; trafik güvenliği, açık alan kullanımı ve yaya yolları gibi dış mekân unsurlarını da kapsayacak şekilde ele alınmalıdır. Risklerin farklı dönemlerde, özellikle düşük kullanıcı yoğunluğuna sahip zaman dilimlerinde de değerlendirilmesi, kapsamlı senaryoların oluşturulmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, psikososyal risklerin değerlendirilmesi ise, daha geniş katılımlı ve etik onay gerektiren çalışmalarda ayrı bir odak olarak ele alınmalıdır. Son olarak, risk analizlerinin düzenli ve mevzuata uygun aralıklarla tekrarlanması ile müdahale etkilerinin izlenmesi, İSG uygulamalarının sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda yürütülecek çalışmalar, kampüsleri yalnızca güvenli değil; aynı zamanda erişilebilir, dirençli ve kapsayıcı yaşam alanları hâline getirecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar eşit oranda makaleye katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Ağı Günerhan S., Günerhan H. Türkiye için sürdürülebilir üniversite modeli. Mühendis ve Makina 2016; 657(682): 54-62.

Akandere G. Sosyal sürdürülebilirlik açısından tedarik zinciri yönetiminde iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2020; 44: 63-72.

Akbıyıklı R., Dikmen SÜ. İnşaat şantiyelerinde iş sağlığı ve iş güvenliği (İSG) yönetiminin ana belirteçleri. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2018; 6(4): 1391-1409.

Aksoy S., Çevik B., Çakıcıer N. Gümüşova Meslek Yüksekokulu'nda iş güvenliği bilincinin belirlenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2013; 1: 69-76.

Amaral LP., Martins N., Gouveia JB. Quest for a sustainable university: A review. International Journal of Sustainability in Higher Education 2015; 16(2): 155-172.

Atasoy H. Çevresel boyut analizi temelinde atık yönetimi ve bir üniversite uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2018.

Bağcı A., Uluçay H., Azimli P., Keskin A. Eğitim öğretim kurumlarında iş sağlığı ve güvenliği bilincinin incelenmesi. Uluslararası Sosyal ve Beşerî Bilimler Araştırma Dergisi 2024; 11(104): 545-555.

Baykal S., Sarı F., Arslan G. Eğitim kurumlarında iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinin incelenmesi. Journal of Social Research and Behavioral Sciences 2022; 8(16): 458-469.

Bayram H., Çelenk Kaya E. Fine-Kinney metodu ile risk analizi: Trabzon liman örneği. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2022; 11(2): 760-783.

Bekleviç H., Gedik T. Ofis ergonomisi üzerine bir araştırma: Düzce Üniversitesi örneği. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2018; 6: 1283-1294.

Birleşmiş Milletler. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. https://undocs.org/en/A/RES/70/1

Canverdi Y. Üniversitelerde iş sağlığı ve güvenliği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Rumeli Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2021.

Cumhur A., Ahıskalı H. İş sağlığı ve güvenliği uygulamaları: Hitit Üniversitesi örneği. 2. Uluslararası Mesleki Bilimler Sempozyumu, IVSS 2018, 2018, sayfa no: 310-319, Türkiye.

Cündübeyoğlu İ., Kayabaşı R. Seramik fabrikasında Fine-Kinney yöntemi ile risk değerlendirmesi. European Journal of Science and Technology 2022; 35: 633-942.

Çabuk A., Onğulu D. Yükseköğretim kurumlarında iş sağlığı ve güvenliğine yaklaşım, İstanbul örneği. OHS Academy 2021; 4(1): 74-82.

Çağri GB., Sabir EC. İş güvenliğinde fiziksel risk etmenlerinin tespitinde iş etüdü tekniğinin kullanımı-bir tekstil işletmesi örneği. OKU Journal of The Institute of Science and Technology 2023; 6(1): 369-382.

Çelik Z., Öztürk M. Sürdürülebilir ve yeşil kampüsler: Türkiye'deki üniversitelerin yeşil vizyonu. İdealkent 2022; 14(Özel Sayı): 315-346.

Dalkıran S., Olcay FZ. Ulusal tez merkezinde yer alan meslek hastalıkları alanında yazılan tezlerin bibliyografik analizi. OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(1): 958-969.

Delice RH., Koçbulut F. Bir çimento fabrikasında aydınlatma, termal konfor ve titreşim maruziyetinin değerlendirilmesi. OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(3): 1046-1060.

Demir Z. İş sağlığı ve güvenliği aydınlatma yönetmeliği bakımından eğitim-öğretim kurumlarındaki gece öğretiminin bir durum çalışmasıyla değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, Türkiye, 2018.

Deniz E. İzmir Ekonomi Üniversitesi mekanik laboratuvarı'nın iş sağlığı ve güvenliği açısından risk analizi ve değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Ekonomi Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2019.

Dinçer Ö., Çubukçu N. Mesleki ve Teknik Eğitim Kurumları İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberi. 2010. https://belen.meb.gov.tr

Doğan O. Çok kriterli karar verme yöntemi ile kapalı alan çalışmalarında tehlikelerin değerlendirilmesi: Örnek bir uygulama. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2023; 13(1): 15-32.

Dumanoglu Y., Irmalı A. Üniversite kampüs girişi uçucu organik bileşik seviyeleri ve mesleki maruziyetin tahmin edilmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2025; 14(2): 551-562.

Durmuş H., Yurtsever Ö., Yalcin B. Bir çay fabrikasında Fine-Kinney ve FMEA yöntemleri ile risk değerlendirmesi. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences 2021; 33(2): 287-298.

Erin E., Caner Akin G., Alkan Ü. Ana metal sektöründe iş sağlığı ve güvenliğine ilişkin değerlendirmeler ve çözüm önerileri. OKU Journal of The Institute of Science and Technology 2023; 6(1): 749-775.

Ersoy S., Kaya EÇ. Bir kamu üniversitesi gıda mühendisliği laboratuvarları risk analizi uygulaması. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2019; 8(4): 411-423.

Erzurumluoğlu, K., Köksal, K., Gerek, İ.H. İnşaat sektöründe Fine-Kinney metodu kullanılarak risk analizi yapılması. 5. İş Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, 2015, sayfa no:137–146. İzmir.

Gedik T., Batu C., Yildirim F., Görgün H., Çeribaş L. Ofis çalışanlarında işe bağlı rahatsızlıkların analizi: Düzce Üniversitesi örneği. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2017; 5: 370-381.

Gedikkaya P., Ayas MÖ., Bozaykut T., Yavuz B., Afacan M. Sürdürülebilir kalkınma bağlamında uluslararası üniversite sıralama indeksleri ve Türkiye'deki üniversiteler. Doğuş Üniversitesi Dergisi 2022; 23(1): 331-349.

Gökcan A., Erol İ., Akyüz B., Demir G. Bir enerji dönüşüm santralinde kişisel koruyucu donanım ve risk analizi ilişkisinin incelenmesi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2025; 15(1): 341-361.

Göymen Y. Atık su arıtma tesislerinin iş sağlığı ve güvenliği yönünden değerlendirilmesi. OKU Journal of Natural and Applied Sciences 2021; 4(2): 204-210.

Gündüz B., Güner H. Otel işletmelerinde iş sağlığı ve güvenliği risklerinin Fine-Kinney yöntemi ile değerlendirilmesi. Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi 2021; 5(1): 55-65.

Güngör Ö. Kimya araştırma laboratuvarlarında iş sağlığı ve güvenliği. International Journal of Social Humanities Sciences Research (JSHSR) 2020; 7(63): 3774-3777.

Güngör S., Demir M. Studying of sustainable design process in university campuses and suggestion for sustainable campus design in Selçuk University. 2018.

Hergül ÖC. Sürdürülebilir kampüs için kent mobilyası tasarımı: Bir stüdyo deneyimi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 22: 374-380.

İnanlı A., Özbakır O. Comparative analysis of hazard identification and risk assessment methods in Ağrı Cement Factory: Fine-Kinney vs. 3T approach. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2024; 14(2): 448-467.

Kalawi D. İstanbul Gelişim Üniversitesinde bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri kullanarak sürdürülebilir kampüs modeli tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2021.

Kavouras S., Vardopoulos I., Mitoula R., Zorpas AA., Kaldis P. Occupational health and safety scope significance in achieving sustainability. Sustainability (Switzerland) 2022; 14(4): 2424.

Kayapınar Kaya S., Dal M., Aşkın A. Türkiye'deki devlet ve vakıf üniversite kampüslerinin sürdürülebilir-ekolojik parametreleri açısından karşılaştırılması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2019; 21(1): 106-125.

Kinney GF., Wiruth AD. Practical risk analysis for safety management. CA: Naval Weapons Center; 1976.

Korkmaz AV. Metal sektöründe iş kazaları ve işçiler üzerindeki etkileri: Magnezyum metal üretim tesisi örnek çalışması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 9(4): 1570-1591.

Kurt G. Avrasya Üniversitesi öğrenci laboratuvarlarının risk değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Avrasya Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 2020.

Lozano R. Incorporation and institutionalization of SD into universities: Breaking through barriers to change. Journal of Cleaner Production 2006; 14(9-11): 787-796.

Lukman R., Glavič P. What are the key elements of a sustainable university? Clean Technologies and Environmental Policy 2007; 9(2): 103-114.

Nejati M., Nejati M. Assessment of sustainable university factors from the perspective of university students. Journal of Cleaner Production 2013; 48: 101-107.

Ordu, M. Evaluating occupational accidents and diseases-based sustainable performances of the Turkish development regions using a hybrid MCDM approach. Mishra, B. K. (Ed.), Intelligent Engineering Applications and Applied Sciences for Sustainability (ss. 190-207). IGI Global. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0044-2.ch011

Özmen Z. Makine ve teçhizatı hariç fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektöründe Fine-Kinney ile risk analizi: Bir alüminyum cephe giydirme firması örneği araştırma. OKU Journal of The Institute of Science and Technology 2025; 8(1): 445-462.

Öztürk A. Günlük yaşamda kimyasal madde maruziyeti ve insan sağlığına etkileri. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 9(4): 1547-1562.

Öztürk Taşdemir D., Öztürk B. Sürdürülebilir iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında koordinasyon ve kurum kültürü. Milli Kültür Araştırmaları Dergisi 2019; 3(1): 23-31.

Sağir M., Sağir R., Genç O. İnşaat sektöründe meydana gelen kazalardaki kazazedelerin son durumlarına etki eden faktörlerin YSA ile incelenmesi. OKU Journal of The Institute of Science and Technology 2022; 5(1): 154-175.

Sribanasarn W., Techarungruengsakul R., Khotdee M., Thuangchon S., Ngamsert R., Phumiphan A., Sivanpheng O., Kangrang A. The sustainable development goals for education and research in the ranking of green universities of Mahasarakham University. Sustainability (Switzerland) 2024; 16(9).

Şeker E. Bir kamu üniversitesi kimya laboratuvarlarının iş güvenliği açısından incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Okan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015.

Şener S., Fandaklı S., Yağımlı M., Aslan T. Eğitim sektöründe iş sağlığı ve güvenliği. The Journal of International Scientific Researches 2023; 8(1): 83-94.

Şimşek S. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında risk değerlendirme metotlarından f metodunun bir örnekle değerlendirilmesi. İSG Akademik – OHS Academic 2020; 2(2): 91-99.

Türk M. Bir üniversite hastanesi mikrobiyoloji laboratuvarlarında risk değerlendirmesi. Türk Tabipleri Birliği Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi 2012; 43(12): 27-43.

6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. Resmi Gazete No: 28339, 2012. https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=6331&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5

Ulu M., Şahin H. Risk assessment in an engineering faculty with error type and effects analysis technique. Electronic Letters on Science and Engineering 2020; 2(16): 63-76.

Usanmaz D., Köse E. Comparative statistical analysis of two different methods for risk assessment in chemical research laboratory. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi 2020; 12(2): 337-347.

Uysal H. Kamu kurumlarının güvenliği ve acil durumlarda risk yönetimi: Ankara Üniversitesi Beypazarı Meslek Yüksekokulu örneği. Ankara Üniversitesi, Türkiye, 2019.

Üner MH., Ayberk HS. Düzce ilindeki mutfak çalışanlarının genel bilgileri ile kaza geçirme oranlarının incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; 7: 849-860.

Velazquez L., Munguia N., Platt A., Taddei J. Sustainable university: What can be the matter? Journal of Cleaner Production 2006; 14(9-11): 810-819.

Velazquez L., Munguia N., Sanchez M. Deterring sustainability in higher education institutions: An appraisal of the factors which influence sustainability in higher education institutions. International Journal of Sustainability in Higher Education 2005; 6(4): 383-391.

Yalçin E. Sürdürülebilirlik ve işletmelerin sürdürülebilirlik raporlarında iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları. Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi 2021; 8(4): 30-45.

Yılmaz Y., Bayın Sarıahmetoğlu A. Üniversite toplu kullanım alanlarında iç ortam hava kalitesinin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 4(12): 1392-1402.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2391-2404, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2391-2404, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Unveiling the Corrosion Inhibition Potential of *Orbea variegata* Extract: A Sustainable, Bio-Based Novel Inhibitor for Mild Steel in HCl

Demet ÖZKIR[1*]

[1]Nigde Ömer Halisdemir University, Faculty of Science, Department of Chemistry, 51240, Campus, Nigde, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-8096-5755
*Corresponding author: dozkir@ohu.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 06.07.2025
Accepted: 30.07.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Orbea variegata
Corrosion inhibition
Green extract
FE-SEM
Aggressive solution
Bio-based inhibitor

ABSTRACT

This study explores the corrosion inhibition performance of an aqueous extract derived from *Orbea variegata*, a succulent plant commonly known as "Carrion cactus" used as a green, bio-based inhibitor for mild steel electrode in 1.0 M hydrochloric acid. The corrosion behaviour was evaluated using potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) following a 1-hour immersion period in acidic medium. Four different extract concentrations (0.005%, 0.010%, 0.050%, and 0.200% *w/v*) were tested to assess dose-dependent inhibition efficiency. Surface morphological changes of the mild steel samples were also surveyed via field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM). Electrochemical results revealed a marked improvement in corrosion resistance with increasing extract concentration, demonstrating that *Orbea variegata* extract effectively suppresses corrosion processes owing to adsorption on the metallic surface. At all tested concentrations, the inhibition efficiency exceeded 90%, highlighting the potential of this plant as a sustainable alternative to conventional inhibitors. The findings suggest that *Orbea variegata* extract could serve as an eco-friendly, efficient and sustainable corrosion inhibitor for industrial applications where acidic environments are prevalent.

Orbea variegata Ekstraktının Korozyon İnhibisyon Potansiyelinin Ortaya Konulması: HCl Çözeltisindeki Yumuşak Çelik İçin Sürdürülebilir ve Biyo-Kaynaklı Yeni Bir Yeşil İnhibitör

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 06.07.2025
Kabul tarihi:30.07.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Orbea variegata
Korozyon inhibisyonu
Yeşil ekstrakt
FE-SEM
Agresif çözelti
Biyo-kaynaklı inhibitör

ÖZ

Bu çalışma, halk arasında "leş kaktüsü" olarak bilinen bir sukulent türü olan *Orbea variegata* bitkisinden elde edilen sulu ekstraktın, 1,0 M hidroklorik asit ortamında yumuşak çelik üzerindeki yeşil, biyo-kaynaklı korozyon inhibitörü olarak etkinliğini araştırmaktadır. Korozyon davranışı, asidik ortamda 1 saatlik daldırma sonrası potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) kullanılarak değerlendirilmiştir. Derişimlere bağlı inhibisyon etkinliğini belirlemek amacıyla dört farklı ekstrakt derişimi (% 0,005; % 0,010; % 0,050 ve % 0,200 *w/v*) incelenmiştir. Ayrıca, yumuşak çelik örneklerinin yüzey morfolojisindeki değişiklikler alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile değerlendirilmiştir. Elektrokimyasal sonuçlar, artan ekstrakt derişimi ile birlikte korozyon direncinde belirgin bir iyileşme olduğunu ortaya koymuş ve *Orbea variegata* ekstraktının metal yüzeyine adsorplanarak korozyon süreçlerini etkili bir şekilde baskıladığını göstermiştir. Tüm çalışılan derişimlerde inhibisyon etkinliği % 90'ın üzerinde bulunmuş olup, bu bitkinin geleneksel bilinen inhibitörlere sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Bulgular, *Orbea variegata* ekstraktının asidik ortamların yaygın olduğu endüstriyel uygulamalarda çevre dostu, etkili ve sürdürülebilir bir korozyon inhibitörü olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

1. Introduction

Metals are indispensable materials in modern industries due to their remarkable mechanical strength, durability, and relatively low production cost. Among them, mild steel stands out as one of the most widely employed materials, on account of its favourable balance between mechanical properties and economic efficiency. It is extensively utilized in construction, automotive components, chemical processing equipment, pipelines, and various other structural applications (Hari Kumar et al., 2021). Despite its versatility, mild steel exhibits considerable vulnerability to corrosive attack, especially when exposed to acidic environments in various industrial operations involving acidic media, including metal surface activation, scale removal, and stimulation of oil-bearing formations (Raja and Sethuraman, 2008).

Acidic media, particularly hydrochloric acid, are frequently employed in industries to remove oxide layers or impurities from metal surfaces. However, these acid treatments inadvertently accelerate corrosion, resulting in material degradation, structural failure, elevated maintenance costs, and safety concerns. Corrosion in such environments is not only inevitable but also highly aggressive, often leading to severe economic and environmental consequences (Mahalakshmi et al., 2019). To mitigate these challenges, the utilization of corrosion inhibitors has become a crucial strategy. Corrosion inhibitors are chemically molecular compounds that, when added in little concentrations to a corrosive solution, significantly reduce the corrosion rate of metals by forming protective barriers at the interface of metal-solution (Gostin et al., 2012; Singh et al., 2012). Traditionally, many effective inhibitors have been inorganic compounds or synthetic organic compounds embodying hetero-atoms such as phosphorus, oxygen, sulphur, or nitrogen. While efficient, the long-term application of these inhibitors has raised serious environmental and toxicological concerns due to their persistence and potential bioaccumulation (Li et al., 2012).

In response to growing environmental awareness and sustainability goals, the focus has increasingly shifted to the progress of environmentally friendly and sustainable corrosion bio-inhibitors arise from natural sources, particularly plant extracts. These eco-friendly alternatives are biodegradable, renewable, and non-toxic, offering significant advantages over conventional inhibitors (Prabakaran et al., 2017; Haldhar et al., 2018; Casanova et al., 2023; Korniy et al., 2023). Plant extracts are rich in phytochemical constituents, including alkaloids, flavonoids, tannins, saponins, and other secondary metabolites. These compounds typically possess functional groups such as aromatic rings with π-electron systems, hydroxyl (-OH), and carbonyl (C=O), which facilitate their adsorption on the surfaces of metal (Hossain et al., 2022; Zakeri et al., 2022; Pahuja et al., 2023).

As highlighted in recent studies, increasing attention has been devoted to the development of eco-friendly corrosion inhibitors, particularly those derived from botanical sources. This growing interest is largely driven by environmental regulations and the urgent need for sustainable solutions. Numerous

plant-based substances, such as essential oils, alkaloid-rich extracts, and polyphenolic compounds, have shown remarkable effectiveness in protecting mild steel from aggressive acidic environments (Dehghani et al., 2019; Zouarhi et al., 2019). These natural inhibitors not only act through efficient surface adsorption but also offer significant advantages in terms of biodegradability and low toxicity, compared to their synthetic counterparts (Djenane et al., 2019; Hsissou et al., 2020). Several recent investigations further confirm the inhibitory potential of plant-derived compounds in HCl media, emphasizing their growing role in industrial corrosion management (Mungwari et al., 2025). Thus, integrating green inhibitors into corrosion protection strategies has become a central focus in advancing sustainable materials science.

The inhibition of corrosion mechanism by plant extracts is primarily ascribed to the constitution of an adsorbed presentative inhibitor film onto the surface. This layer acts as a barrier that limits the interaction between the corrosive species in the electrolyte and the metal. Adsorption can occur through physical forces (physisorption), chemical bonding (chemisorption), or a combination of both, relying on the nature of the extract components and the metallic surface (Obot et al., 2015; Solmaz et al., 2023). The effectiveness of inhibition generally increases with the concentration of active constituents in the extract, as more molecules become available to occupy and passivate active corrosion sites (Akalezi et al., 2020). The current study investigates the potential of *Orbea variegata*, a succulent species commonly referred to as "carrion cactus" and a novel, sustainable corrosion bio-inhibitor for mild steel in aggressive HCl solution. The aqueous extract of this plant, known for its unique morphology and metabolic profile, was conducted at four concentrations to evaluate its inhibition efficiency. The present study aims to contribute to the expanding field of bio-inhibition by providing evidence for the effectiveness of *O. variegata* extract, thereby supporting greener industrial practices and promoting the use of renewable natural resources in corrosion protection.

2. Materials and Methods

2.1. Plant material

Fresh aerial parts of *Orbea variegata*, a succulent plant widely known as "carrion flower or cactus" were collected from a cultivated pot in Niğde, Türkiye, during May 2025 (Figure 1). Fig. 1 displays different morphological views of the succulent, including stem texture and flower structure observed during the blooming stage. The plant was cultivated under controlled indoor conditions and utilized for aqueous extract preparation. The plant material was cleaned with distilled water to eliminate surface impurities. Afterwards, it was cut into small pieces with the help of scissors to obtain the aqueous extract.



Figure 1. *Orbea variegata* plant images used in this study

2.2. Preparation of Orbea variegata extract

Approximately 20 g of specimen were placed into a 500 mL round-bottom flask including 300 mL of distilled water. The mixture was subjected to gentle reflux heating for 16 hours. After cooling, the aqueous extract was filtered through filter (Whatman) paper to eliminate plant residues. The resulting solution, which had a dark brownish hue, was considered the stock extract (Fig. 2).

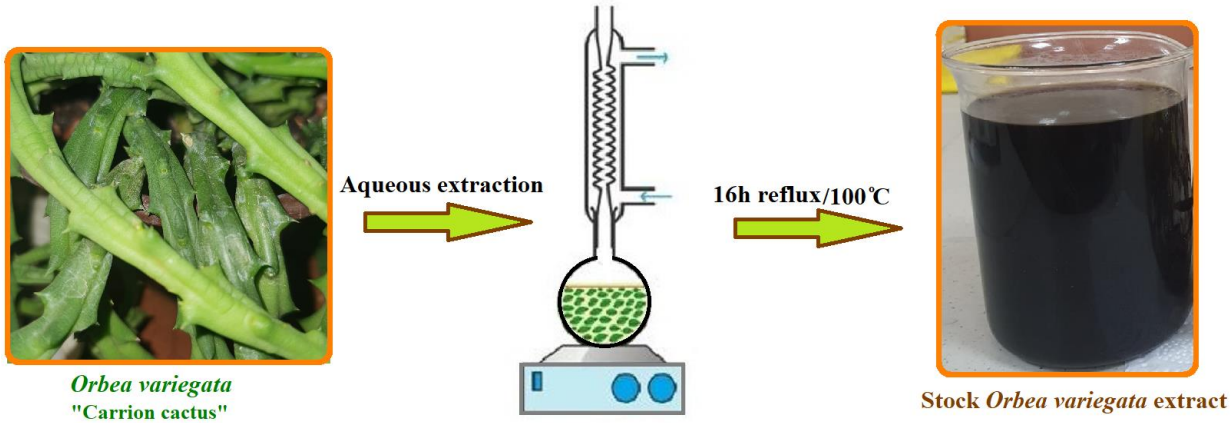


Figure 2. Schematic of *Orbea variegata* extraction procedure

The actual concentration of the stock solution was determined to be 1.974% (*w/v*) after 10 mL of the *Orbea variegata* extract was evaporated. This extract was further diluted with distilled water to prepare four working concentrations: 0.005%, 0.010%, 0.050%, and 0.200% (*w/v*), which were used as corrosion inhibitor solutions.

2.3. Electrochemical procedures

All electrochemical tests were implemented at room temperature using a conventional three-electrode electrochemical cell setup connected to a CHI660E electrochemical workstation (Fig. 3). A mild steel rod with a subjected surface area of 0.5024 cm^2 served as the working electrode. The working electrode was mild steel, with a chemical composition by weight of 98.977% Fe, 0.40900% Mn, 0.10200% Si, 0.08400% C, 0.07890% Ni, 0.06030% Cr, 0.21700% Cu, 0.01900% S, 0.01100% V, 0.01040% Mo,

0.01100% P, 0.01620% Sn, 0.00198% Co, and 0.00222% Nb. A platinum plate with a surface area of 2.0 cm² was used as a counter electrode, and an Ag/AgCl (3.0 M saturated KCl) electrode was used as a reference electrode.

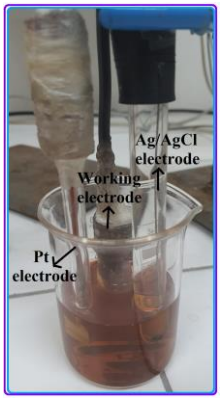


Figure 3. Conventional three-electrode immersion experimental setup in 0.200% (*w/v*) *Orbea variegata* +1.0 M HCl

Prior to each measurement, the Fe electrode was brightened using emery papers of varying grades (from 600 to 1000), rinsed with distilled water, degreased with acetone, and dried. The electrode was then immersed for 1 hour in 1.0 M HCl solution either with or without the extract before the electrochemical tests were carried out.

EIS was implemented over a frequency range of 10^5 Hz to $5x10^{-3}$ Hz with an amplitude of 5 mV. Data were collected in text file format and subsequently analysed via Zview2 software using appropriate equivalent circuit models. Potentiodynamic polarization tests were enrolled by sweeping the potential from ±350 mV versus open circuit potential (E_{corr}) at a scan rate of 1.0 $mV\,s^{-1}$. Corrosion current densities (i_{corr}) and inhibition efficiencies were derived using the Tafel extrapolation method.

2.4. Surface Morphology Analysis by FE-SEM

Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) analysis was performed to examine the surface morphology of mild steel after exposure to corrosive and inhibited environments. Mild steel samples were immersed for 1 hour in 1.0 M HCl solution in the absence and presence of the highest extract concentration (0.200% *w/v*). After immersion, the specimens were carefully degreased and rinsed with acetone and distilled water, dried in air, and examined using a Zeiss GeminiSEM 500 instrument. The resulting micrographs were used to visually assess the preservative effect of the plant extract on the metal surface.

3. Results and Discussion

3.1. Electrochemical Evaluation of Corrosion Inhibition

EIS is widely preferred in corrosion studies due to its high sensitivity to interfacial changes and its ability to provide detailed information on charge transfer and film resistance mechanisms without significantly disturbing the system under investigation (Sanni et al., 2024). In order to evaluate the corrosion inhibition performance of *Orbea variegata* extract, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization techniques were realized following 1-hour immersion in 1.0 M HCl solution. The tests were conducted in the presence and absence of the extract at four concentrations (0.005%, 0.010%, 0.050%, and 0.200% *w/v*), and the corresponding inhibition efficiencies ($\eta\%$) were calculated based on the obtained electrochemical parameters. Zview2 software was used to create electrical equivalent circuit models based on the gathered EIS data in order to interpret the corrosion behaviour. Figure 4 indicates the impedance diagrams along with the different equivalent circuit models used for the blank (1.0 M HCl) and *Orbea variegata* extract-containing solutions after one hour of exposure to the aggressive solution.

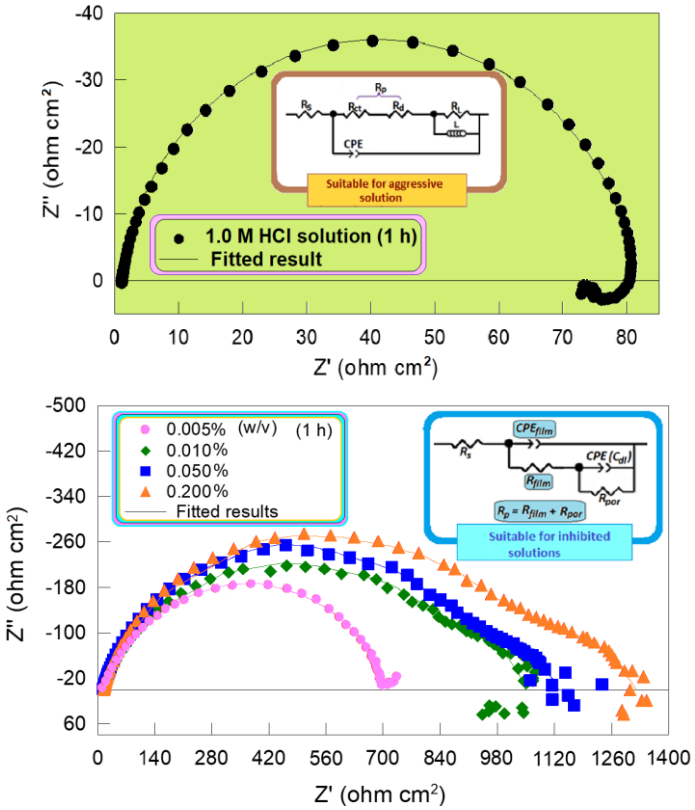


Figure 4. Electrical equivalent circuits and impedance diagrams used to model the EIS findings of mild steel electrodes in aggressive solution and containing *Orbea variegata* extract

The existence of *Orbea variegata* film-related characteristics is a crucial difference between these two models in Figure 4. Film resistance (R_f) and pore resistance (R_{por}), which are signs of adsorption by the *Orbea variegata* molecules, were introduced into the inhibited systems by the development of a preservative layer on the mild steel surface. On the other hand, when the inhibitor was not present, inductive components like inductive resistance (R_L) and inductance (L) were seen, although the diffuse

layer (R_d) and charge transfer resistances (R_{ct}) were mostly responsible for the polarisation resistance (R_p).

The EIS spectra displayed depressed capacitive semicircles in the Nyquist plots, indicating a non-ideal capacitive behaviour likely attributed to surface heterogeneity and adsorption of inhibitor molecules. A gradual increase in the diameter of the semicircles was observed with increasing extract concentration, reflecting enhanced charge transfer resistance (R_{ct}) (Figure 4). This suggests the formation of a more robust and adherent protective film on the mild steel surface (Aldahiri et al., 2025). All test solutions exhibit distinctive semi-circular profiles in the Nyquist diagrams, which is in line with a charge-transfer-controlled corrosion mechanism. As the concentration of *Orbea variegata* extract increased, a progressive increase in the semicircle's width was seen, suggesting that the *Orbea variegata* extract molecules were more strongly adsorbed on the iron surface. By forming a barrier layer, this adsorption prevents aggressive ionic species in the acidic media from transferring electrons to the metal substrate. The lack of inductive loops in the solutions containing *Orbea variegata* extract suggests that surface film resistance, rather than adsorbed intermediate species, is the primary governing factor in the main corrosion mechanism. Table 1 displays the EIS and Tafel extrapolation data obtained following Figures 4 and 5.

The highest polarization resistance (R_p) value was recorded as 1350 $\Omega\ cm^2$ at 0.200% concentration, with an inhibition efficiency of 94.7%, compared to 90.1% at 0.005%. This trend clearly demonstrates that the extract constituents interact with the metallic surface, bringing about an efficient suppression of charge transfer processes responsible for corrosion. The reduction in double-layer capacitance (C_{dl}) also confirms the adsorption of *Orbea variegata* molecules in the extract, which displace water and aggressive ions from the interface (Raja and Sethuraman, 2008). These findings align with previous studies on plant-based green inhibitors, where increasing concentration led to more durable and uniform adsorbed layers on metal surfaces (Umoren and Solomon, 2017; Miralrio and Espinoza Vázquez, 2020). Table 1 shows that the R_p values gradually increased as the concentration of *Orbea variegata* extract grew, while the values known as *CPE*, which represent the double layer between the metal and the substrate, decreased in tandem. As the concentration of the *Orbea variegata* extract increased, it was observed that the values denoted by "*n*" and known as the constant phase coefficient (surface inhomogeneity coefficient) likewise reduced.

Equations (1) and (2) express the calculation of $\eta\%$ and ${}^{*}\eta\%$ values from EIS and potentiodynamic polarization (Tafel extrapolation) methods, respectively (Özkır, 2024a; Özkır, 2024b).

$$\eta\% = \left(\frac{R'_p - R_p}{R'_p}\right) x100 \quad (1)$$

$${}^{*}\eta(\%) = \left(\frac{i_{corr} - i'_{corr}}{i_{corr}}\right) \times 100 \quad (2)$$

Table 1. EIS parameters in 1.0 M HCl solutions with and without *Orbea variegata* aqueous extract

***C* (*w/v* %)**	***EIS***							
Orbea variegata	E_{ocp} (*V*/Ag/AgCl)	R_s (Ω cm^2)	*CPE* (μF cm^{-2})	*n*	R_L (Ω cm^2)	*L* (*H*)	R_p (Ω cm^2)	η (%)
1.0 M HCl	-0.474	1.2	110	0.94	8	4	72	-
0.005	-0.511	1.3	95	0.74	-	-	726	**90.1**
0.010	-0.508	1.1	84	0.72	-	-	1035	**93.0**
0.050	-0.517	1.4	72	0.70	-	-	1130	**93.6**
0.200	-0.520	1.2	57	0.62	-	-	1350	**94.7**
Orbea variegata	**Potentiodynamic polarization (Tafel extrapolation method)*							
	E_{corr} (*V*/Ag/AgCl)	$-\beta_c$ (*mV* dec^{-1})	i_{corr} (μA cm^{-2})	$^*\eta$ (%)				
1.0 M HCl	-0.475	108	265	-				
0.005	-0.515	98	27	**89.8**				
0.010	-0.511	100	19	**92.8**				
0.050	-0.522	99	17	**93.6**				
0.200	-0.526	101	15	**94.3**				

The electrochemical behaviour of mild steel in 1.0 M HCl solution in the absence and presence of *Orbea variegata* extract was also examined by the potentiodynamic polarization technique, and the key electrochemical parameters are summarized in *Table 1. In the absence of the inhibitor, the corrosion potential (E_{corr}) was observed at –0.475 V (*vs. Ag/AgCl*), and the corrosion current density (i_{corr}) reached 265 $\mu A\ cm^{-2}$, reflecting intense corrosion activity in the acidic medium. The Tafel polarization curves in Figure 5 revealed that the addition of *O. variegata* extract significantly reduced i_{corr}, with a consistent decrease across all concentrations.

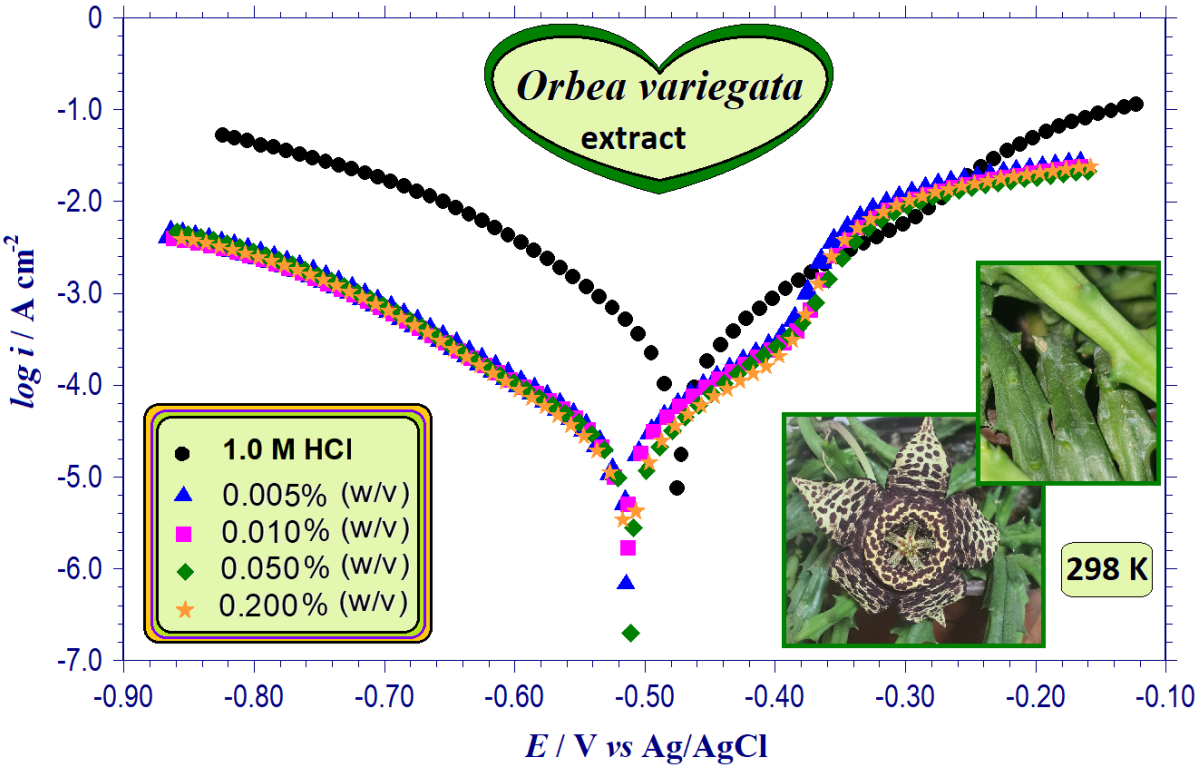


Figure 5. Overlapping Tafel polarization curves of mild steel electrodes in 1.0 M HCl as a function of *Orbea variegata* extract concentration

With the addition of the plant extract, there was a substantial and concentration-dependent decline in i_{corr} values. At the lowest concentration (0.005% *w/v*), i_{corr} decreased sharply to 27 $\mu A\ cm^{-2}$, corresponding to an inhibition efficiency of 89.8%. This trend continued with increasing extract concentrations, reaching a minimum value of 15 $\mu A\ cm^{-2}$ at 0.200%, with a corresponding maximum efficiency of 94.3%. These results indicate that the *Orbea variegata* extract effectively retards the electrochemical dissolution of mild steel in hydrochloric acid. A closer examination of the E_{corr} values reveals a shift from –0.475 V to –0.526 V with increasing inhibitor concentration, indicating a cathodic displacement. Despite this shift, suggesting that *Orbea variegata* extract acts primarily as a cathodic-type inhibitor, suppressing the hydrogen evolution reaction on the steel surface (Kumar et al., 2022). The cathodic Tafel slope ($-\beta_c$) values remained relatively stable, ranging between 98–101 $mV\ dec^{-1}$ in the presence of the *O. variegata* extract, compared to 108 $mV\ dec^{-1}$ in the uninhibited solution. This minor variation implies that the mechanism of the cathodic reaction remains unaltered, and the observed inhibition effect is mainly due to surface coverage by the extract molecules rather than a change in reaction pathway. The active phytochemical constituents likely adsorb preferentially at cathodic sites, blocking H^+ reduction reactions and reducing hydrogen gas evolution (Mashooque et al., 2022; Royani et al., 2024). Taken together, these polarization findings provide strong evidence that *Orbea variegata* extract functions as a predominantly cathodic corrosion inhibitor, with its efficiency being concentration-dependent. The enhanced inhibition at higher extract concentrations can be attributed to increased adsorption of phytochemical compounds containing functional groups such as hydroxyls, carbonyls, and aromatic rings capable of forming a protective barrier on the steel surface (Carmona-Hernandez et al., 2024).

3.2. FE-SEM Surface Analysis

To further support the electrochemical findings and provide insight into the physical alterations on the metal surface, FE-SEM analysis was performed on mild steel specimens immersed in 1.0 M HCl for 1 hour, both in the absence and presence of *Orbea variegata* extract at the highest tested concentration (0.200% *w/v*). The mentioned 200 times magnified surface morphologies are indicated to make a clearer comparison in Figure 6.

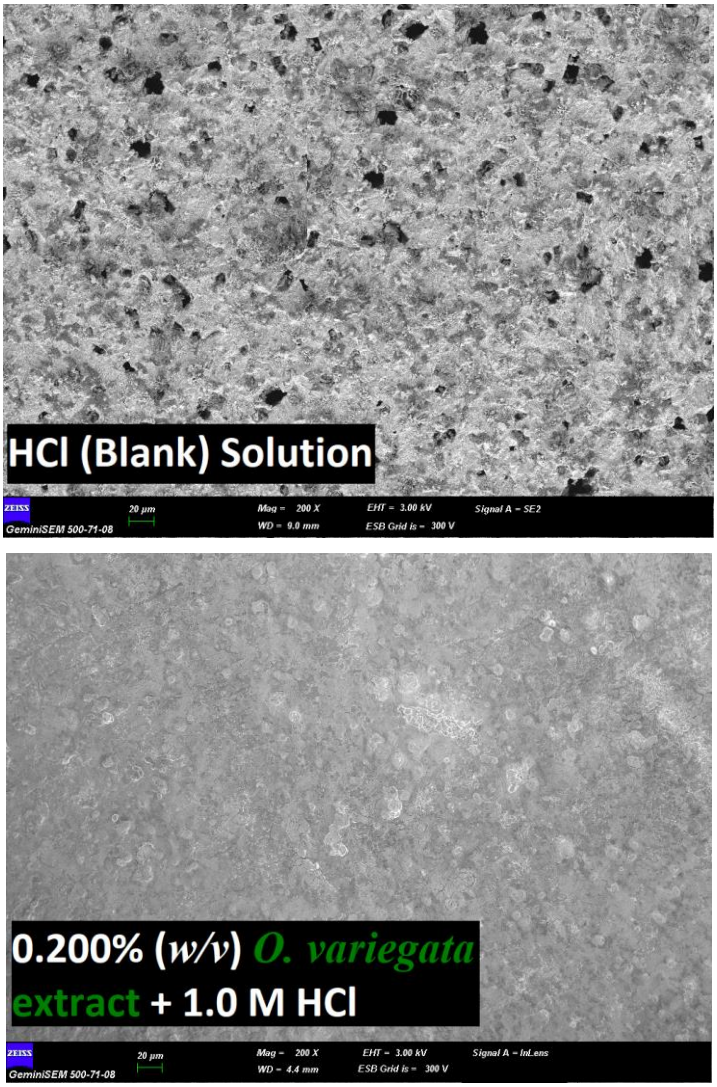


Figure 6. Surface analyses by FE-SEM in the absence and presence of *Orbea variegata* bio-inhibitor in HCl solution

The surface of the sample exposed to the uninhibited acidic solution exhibited clear signs of corrosion damage. As shown in the FE-SEM micrograph (Figure 6), the mild steel surface (blank solution) was severely roughened and covered with irregular pits and localized etching zones, characteristic of acid-induced corrosion in chloride media. The morphology confirmed that aggressive dissolution had taken place, resulting in a highly degraded topography with widespread surface disruption. In contrast, the surface of the mild steel specimen treated with the *O. variegata* extract (Figure 6) appeared significantly smoother and more uniform. The number and depth of corrosion pits were greatly reduced, and the metal surface exhibited a relatively continuous structure with fewer defects. This smoother morphology suggests that the extract formed a protective film over the steel surface, effectively mitigating direct acid attack. The protective layer likely originates from the adsorption of phytochemical constituents in the *O. variegata* extract, such as flavonoids and phenolics, which contain π-electrons and active functional groups capable of forming strong interactions with the metal surface (Hafazeh et al., 2025).

These observations align with the electrochemical data and confirm that *Orbea variegata* extract acts as a surface-active corrosion inhibitor. The constitution of a passive bio-inhibitor layer obstructs the access of corrosive species to the metal, thereby reducing localized attack and preserving the surface integrity.

4. Conclusion

This research represented that the aqueous extract of *Orbea variegata*, a succulent plant known locally as “carrion flower/cactus”, serves as a highly effective and sustainable corrosion bio-inhibitor for mild steel in 1.0 M HCl solution. Through a comprehensive electrochemical assessment including EIS and potentiodynamic polarization experiments, it was confirmed that the extract significantly reduced corrosion activity even at low concentrations. In particular, a 1-hour immersion period in the most concentrated extract solution (0.200% *w/v*) yielded inhibition efficiencies exceeding 94%, underscoring the rapid and potent protective action of the plant-derived compounds. Although the detailed chemical composition of *Orbea variegata* was not examined in this study, it is thought that its structure contains compounds rich in bioactive secondary metabolites such as flavonoids, phenolic acids, alkaloids and sterols, which are known to be abundant in all plants. These compounds typically contain hydroxyl, carbonyl, ether, and aromatic moieties and contain delocalized π-electron systems and heteroatoms such as P, O, S, and N, and they readily interact with the metal surface via physical adsorption or chemisorption. These interactions promote the formation of a protective molecular inhibitor film that inhibits the charge transfer processes essential for both anodic metal dissolution and cathodic hydrogen evolution. The FE-SEM surface analyses further supported the electrochemical results, clearly showing a marked difference in surface morphology between the uninhibited and inhibited specimens. The steel surface exposed to the blank HCl solution exhibited deep pits and irregular corrosion patterns, while the surface treated with *Orbea variegata* extract appeared smoother, indicating the presence of a coherent barrier layer that effectively prevented localized corrosion.

From a broader perspective, the utilization of *Orbea variegata* extract as a corrosion inhibitor is not only technically efficient but also environmentally meaningful. Derived from a renewable plant source, the extract is biodegradable, non-toxic, and water-soluble, offering a low-carbon-footprint alternative to conventional synthetic inhibitors. Its application aligns with the basis of “green chemistry and circular economy”, providing a dual benefit: preventing metallic degradation in aggressive environments and reducing the ecological burden associated with hazardous corrosion inhibitors.

In summary, the findings of this study highlight the untapped potential of *Orbea variegata* as a novel bio-inhibitor. Its high inhibition performance, rapid film formation, eco-compatibility, and cost-effectiveness position it as a promising candidate for sustainable corrosion protection strategies in industrial applications where hydrochloric acid is routinely used.

Compliance with ethical standards

The author declares that there is no conflict of interest.

Summary of researchers' contribution declaration

The author confirms sole responsibility for the entire content of the manuscript.

References

Akalezi CO., Maduabuchi AC., Enenebeaku CK., Oguzie EE. Experimental and DFT evaluation of adsorption and inhibitive properties of *Moringa oliefera* extract on mild steel corrosion in acidic media. Arabian Journal of Chemistry 2020; 13: 9270-9282.

Aldahiri RH., Hussein MA., Al-Bukhari SMA., Alamry KA., Khan A., Aslam R. Synergistic effect of *Canarium strictum* leaves extract and KI on the corrosion protection of mild steel in 15% HCl solution. Scientific Reports 2025; 15: 3576.

Carmona-Hernandez A., Barreda-Serrano MC., Saldarriaga-Noreña HA., López-Sesenes R., González-Rodríguez JG., Mejía-Sánchez E., Ramírez-Cano JA., Orozco-Cruz R., Galván-Martínez R. Insight into the corrosion inhibition performance of *Pistia stratiotes* leaf extract as a novel eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl solution. Molecules 2024; 29(22): 5243.

Casanova L., Ceriani F., Messinese E., Paterlini L., Beretta S., Bolzoni FM., Brenna A., Diamanti MV., Ormellese M., Pedeferri M. Recent advances in the use of green corrosion inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete. Materials 2023; 16(23): 7462.

Dehghani A., Bahlakeh G., Ramezanzadeh B., Ramezanzadeh M. Potential of borage flower aqueous extract as an environmentally sustainable corrosion inhibitor for acid corrosion of mild steel: electrochemical and theoretical studies. Journal of Molecular Liquids 2019; 277: 895-911.

Djenane M., Chafaa S., Chafai N., Kerkour R., Hellal A. Synthesis, spectral properties and corrosion inhibition efficiency of new ethyl hydrogen [(methoxyphenyl) (methylamino) methyl] phosphonate derivatives: Experimental and theoretical investigation. Journal of Molecular Structure 2019; 1175: 398-413.

Gostin PF., Oswald S., Schultz L., Gebert A. Acid corrosion process of Fe-based bulk metallic glass. Corrosion Science 2012; 62: 112-121.

Hafazeh A., Balooch A., Shanbaraki ZD., Azadi M. Corrosion inhibition of steel in sulphuric acid using *Ferula Assa foetida* L. extract as an eco-friendly inhibitor: Experimental and computational study. Results in Engineering 2025; 25: 103736.

Haldhar R., Prasad D., Saxena A., Kumar R. Experimental and theoretical studies of *Ficus religiosa* as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H_2SO_4 solution. Sustainable Chemistry and Pharmacy 2018; 9: 95-105.

Hari Kumar S., Karthikeyan S., Vivekanand PA., Kamaraj P. The inhibitive effect of cloxacillin on mild steel corrosion in 2 N Sulphuric acid medium. Materials Today: Proceedings 2021; 36: 898–902.

Hsissou R., About S., Seghiri R., Rehioui M., Berisha A., Erramli H., Assouag M., Elharfi A. Evaluation of corrosion inhibition performance of phosphorus polymer for carbon steel in [1 M] HCl:

computational studies (DFT, MC and MD simulations). Journal of Materials Research and Technology 2020; 9: 2691–2703.

Hossain N., Chowdhury MA., Rana M., Hassan M., Islam S. *Terminalia arjuna* leaves extract as green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. Results in Engineering 2022; 14: 100438.

Korniy SA., Zin IM., Danyliak MOM., Rizun YY. Eco-friendly metal corrosion inhibitors based on natural polymers (A Review). Materials Science 2023; 58: 567–578.

Kumar P., Soni I., Jayaprakash GK., Kumar S., Rao S., Flores-Moreno R., Sowmyashree AS. Experimental and theoretical studies of hexylmeythylimidazolium tetrafluoroborate ionic liquid as cathodic corrosion inhibitor for mild steel. Inorganic Chemistry Communications 2022; 146: 110110.

Li X., Deng S., Fu H. Inhibition of the corrosion of steel in HCl, H2SO4 solutions by bamboo leaf extract. Corrosion Science 2012; 62: 163-175.

Mahalakshmi D., Hemapriya V., Subramaniam EP., Chitra S. Synergistic effect of antibiotics on the inhibition property of aminothiazolyl coumarin for corrosion of mild steel in 0.5 M H_2SO_4. Journal of Molecular Liquids 2019; 284: 316–327.

Mashooque S., Kumar M., Unar IN. Effect of aloe vera extract as green corrosion ınhibitor on medium carbon steel in sulphuric acid environment. Pak. J. Anal. Environ. Chem. 2022; 23(1): 70-78. http://doi.org/10.21743/pjaec/2021.06.07

Miralrio A., Espinoza Vázquez A. Plant extracts as green corrosion ınhibitors for different metal surfaces and corrosive media: A review. Processes 2020; 8(8): 942.

Mungwari CP., Obadele BA., King'ondu CK. Phytochemicals as green and sustainable corrosion inhibitors for mild steel and aluminium: Review. Results in Surfaces and Interfaces 2025; 18: 100374.

Obot IB., Macdonald DD., Gasem ZM. Density functional theory (DFT) as a powerful tool for designing new organic corrosion inhibitors. Part 1: An overview. Corrosion Science 2015; 99: 1-30.

Özkır D. Insights into the high and prolonged inhibition mechanism of pyridoxine hydrochloride as vitamin B6: a new green inhibitor slowing the acidic corrosion of mild steel. Chemical Papers 2024a; 78: 6035–6052.

Özkır D. Oleaster leaf extract: a potential environmentally friendly inhibitor for mild steel. Eurasian J. Bio. Chem. Sci. 2024b; 7(1): 20–25.

Pahuja P., Yadav M., Dhanda M., Arora R., Ahlawat S., Satija A., Jhanjhariya N., Kumar S., Lata S. An eco-friendly corrosion inhibitor *Cuscuta reflexa* extract and PEG400 for mild steel inhibition in acidic medium: Computational and experimental investigations. Environmental Science and Pollution Research International 2023; 30(44): 98701-98717.

Prabakaran M., Kim SH., Mugila N., Hemapriya V., Parameswari K., Chitra S, Chung IM. *Aster koraiensis* as nontoxic corrosion inhibitor for mild steel in sulfuric acid. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 2017; 52: 235-242.

Raja PB., Sethuraman MG. Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media — A review. Materials Letters 2008; 62(1): 113-116.

Royani A., Hanafi M., Mubarak NM., Priyotomo G., Aigbodion VS., Musabikha S., Manaf A. Unveiling green corrosion inhibitor of *Aloe vera* extracts for API 5L steel in seawater environment. Sci. Rep. 2024; 14: 14085.

Sanni O., Ren J., Jen TC. Electrochemical, surface, and theoretical investigations of palm kernel shell extract as an effective inhibitor for carbon-steel corrosion in 1 M HCl solution. Environmental Science and Pollution Research 2024.

Singh A., Ebenso EE., Quarishi MA. Corrosion inhibition of carbon steel in HCl solution by some plant extracts. International Journal of Corrosion 2012; 2012(1): 1-20.

Solmaz R., Salcı A., Aydın Dursun Y., Kardaş G. A comprehensive study on the adsorption, corrosion inhibition efficiency and stability of acriflavine on mild steel in 1 M HCl solution. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2023; 674: 131908.

Umoren SA., Solomon MM. Synergistic corrosion inhibition effect of metal cations and mixtures of organic compounds: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering 2017; 5(1): 246-273.

Zakeri A., Bahmani E., Aghdam ASR. Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review. Corrosion Communications 2022; 5: 25-38.

Zouarhi M., About S., Benzidia B., Chellouli M., Hammouch H., Erramli H., Hassane SOS., Bettach N., Hajjaji N. Evaluation of a new formulation derived from *Aleurites moluccana* seeds oil as a green corrosion inhibitor for iron in acidic medium. Analytical and Bioanalytical Electrochemistry 2019; 11: 1651–1668.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2405-2419, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2405-2419, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Ortaokul Öğrencilerinin Beslenme Alışkanlıklarının Belirlenmesi: Geçerlik ve Güvenirlik Çalışması

Rabia ACEMİOĞLU[1*], Tohit GÜNEŞ[2]

[1]Iğdır Üniversitesi, Tuzluca Meslek Yüksekokulu, Çocuk Gelişimi Programı, 76000, Iğdır
[2]Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, 55000, Samsun

[1]https://orcid.org/0000-0003-4369-2986
[2]https://orcid.org/0000-0002-9525-7081
*Sorumlu yazar: racemioglu@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 12.05.2025
Kabul tarihi:22.08.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Beslenme
Akran
Ekran
Medya
Öğrenci

ÖZ

Bu araştırmanın amacı, ortaokul öğrencilerinin beslenme alışkanlıklarını etkileyen faktörleri ölçmek üzere geçerli ve güvenilir bir ölçme aracı geliştirmektir. Metodolojik desenle yürütülen çalışmada, veri toplama aracı oluşturulmadan önce madde havuzu hazırlanmış ve uzman görüşlerine başvurularak maddelerde gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Ölçeğin pilot uygulaması, 2022-2023 eğitim öğretim yılında Iğdır il merkezindeki devlet ortaokullarında öğrenim gören 293 öğrenciyle gerçekleştirilmiştir. Faktör analizi sonucunda dört faktörlü ve 18 maddelik bir yapı ortaya konmuş, bu yapı toplam varyansın %54,26'sını açıklamıştır. Ölçeğin yapı geçerliğini test etmek amacıyla 320 öğrenciden elde edilen ikinci veri setiyle doğrulayıcı faktör analizi yapılmıştır. Güvenirlik analizleri sonucunda ölçeğin alt boyutlarına ilişkin cronbach's alpha güvenirlik katsayıları; ekran etkisi alt boyutu için 0,81, medya etkisi alt boyutu için 0,79, aile etkisi alt boyutu için 0,74 ve akran etkisi alt boyutu için 0,64 olarak bulunmuştur. Cinsiyet değişkenine göre yapılan güvenirlik analizlerinde ise güvenirlik katsayıları kız öğrenciler için 0,80, erkek öğrenciler için 0,78'dir. Ayrıca test yarılama yöntemi güvenirlik analizi sonucunda testin ilk kısmı için iç tutarlılık katsayısı 0,61; ikinci yarısı için ise 0,73 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda geliştirilen ölçeğin, geçerli ve güvenilir bir ölçme aracı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Determination of Nutritional Habits of Secondary School Students: Validity and Reliability Study

Research Article

Article History:
Received: 12.05.2025
Accepted: 22.08.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Nutrition
Peer
Screen
Media
Student

ABSTRACT

The aim of this study is to develop a valid and reliable measurement tool to assess the factors influencing the nutritional habits of middle school students. Designed with a methodological research framework, the study began with the creation of an item pool, followed by expert evaluations, leading to the necessary revisions of the items. The pilot implementation of the scale was carried out with 293 students attending public middle schools in the city center of Igdır during the 2022-2023 academic year. As a result of factor analysis, a structure consisting of four factors and 18 items was identified, explaining 54.26% of the total variance. To verify construct validity, confirmatory factor analysis was conducted using a second dataset comprising 320 students. As a result of the reliability analyses, the cronbach's alpha coefficients for the sub-dimensions of the scale were found to be 0.81 for the screen influence sub-dimension, 0.79 for the media influence sub-dimension, 0.74 for the family influence sub-dimension, and 0.64 for the peer influence sub-dimension. Reliability coefficients by gender were 0.80 for female students and 0.78 for male students. Additionally, the

split-half reliability method indicated internal consistency coefficients of 0.61 for the first half and 0.73 for the second half. Based on the findings obtained, it was concluded that the developed scale is a valid and reliable measurement tool.

To Cite: Acemioğlu R., Güneş T. Ortaokul Öğrencilerinin Beslenme Alışkanlıklarının Belirlenmesi: Geçerlik ve Güvenirlik Çalışması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2405-2419.

1. Giriş

Beslenme, bireylerin yaşam kalitesini ve sağlığını doğrudan etkileyen temel bir yaşam gereksinimidir. Özellikle ortaokul döneminde, beslenme alışkanlıklarının kazanılması, bireyin gelecekteki sağlık durumu üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Kuzay, 2024). Çünkü ortaokul dönemi adölesan (ergenlik) dönemiyle örtüşmektedir (Altay ve ark., 2018). Ergenlik dönemi, bireyin hızla fiziksel ve bilişsel olarak geliştiği, sosyal çevreden yoğun şekilde etkilendiği, öz kimlik gelişiminin temel taşlarının atıldığı bir evredir (Kulaksızoğlu, 2013). Bu dönemde, bireyin sağlıklı bir kimlik geliştirebilmesi ve olumlu alışkanlıklar edinebilmesi için fiziksel, bilişsel ve sosyal gelişimini destekleyecek çevresel faktörler, özellikle beslenme gibi temel konularda büyük bir önem taşımaktadır (Güdek ve ark., 2016). Bu nedenle, ortaokul öğrencilerinin sağlıklı beslenme alışkanlıkları kazanmalarında eğitim kurumlarının, ailelerin ve diğer çevresel faktörlerin rolü büyüktür (Akçay, 2023). Bu faktörlerin başında ise, günümüzde medya, akran grupları, dijital ekranlar ve aile yapısı gibi etmenler, bireylerin beslenme alışkanlıklarını şekillendiren önemli unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Kıbrıs ve Kızılkaya, 2023). Bu unsurların her biri, eğitim perspektifinden değerlendirildiğinde, beslenme alışkanlıklarını geliştirmeye yönelik içerikler sunmaktadır. Örneğin, sağlıksız beslenme alışkanlıkları bilişsel performansta düşüşe yol açarak (Karaca, 2021), eğitim çıktılarını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu bağlamda, akademik başarı ve bilinçli farkındalık için sağlıklı beslenme eğitimlerinin önemi tartışmasızdır. Özellikle medya ve dijital ekranlar, öğrencilerin beslenme alışkanlıkları üzerindeki etkileri nedeniyle, eğitim sürecinde öğrencilere medya okuryazarlığı ve eleştirel düşünme becerilerinin kazandırılmasını zorunlu kılan bir alan olarak değerlendirilmektedir (Livingstone ve Helsper, 2007).

Ortaokul dönemi, çocukların beslenme alışkanlıklarının şekillendiği kritik bir süreçtir (Yılmaz ve Altunkürek, 2020). Medyada beslenme konusundaki bilgilere kolay erişim sağlanması, özellikle öğrencilerin sağlıklı beslenme alışkanlıklarını etkileme potansiyeline sahiptir (Süar, 2017). Ortaokul öğrencileri, medyayı eğlence, iletişim kurma, bilgiye kolay erişim ve öğrenme amacıyla kullandıkları için medya, öğrenciler arasında popüler bir olgu haline gelmiştir (Taş, 2019). Ergenlik dönemindeki öğrencilerin büyük bir çoğunluğunun medya aracılığı ile istedikleri zaman internete erişim sağlaması, akademik başarılarını da olumsuz etkilemektedir. (Çırak, 2021). Bu durum, aynı zamanda sağlıksız beslenme alışkanlıklarının yayılmasına zemin hazırlayabilmektedir. Dolayısıyla, öğrencilerin medya aracılığıyla maruz kaldıkları beslenme temalı mesajları doğru bir şekilde değerlendirebilmeleri, medya ve beslenme okuryazarlığının kazandırılmasıyla mümkün olacaktır. (Vidgen ve Gallegos, 2014). Bu hedef, eğitim programlarına medya ve beslenme okuryazarlıklarının entegrasyonunun sağlanmasıyla gerçekleştirilebilir. Medya okuryazarlığı eğitimi, öğrencilerin reklam içeriklerini eleştirel bir bakış

açısıyla değerlendirmelerini sağlarken, aynı zamanda sağlıklı beslenme davranışlarını teşvik eder (İçelli, 2017). Beslenme okuryazarlığı ise, öğrencinin temel beslenme bilgilerine ulaşma, anlama ve uygulama kapasitesi olarak tanımlanmaktadır (Vidgen ve Gallegos, 2014). Bu bağlamda, okullarda verilen derslerde öğrencilere reklamların nasıl manipülatif olabileceği ve besin değeri yüksek olmayan gıdaların nasıl cazip hale getirildiği gibi konular öğretilerek, sağlıklı besin tercihleri yapmaları desteklenebilir. Okul ortamında verilen sağlıklı beslenme eğitimi, medya aracılığıyla öğrenilen bilgilerin eleştirel bir süzgeçten geçirilmesine olanak tanırken, aynı zamanda akran baskısını da azaltmaktadır (İçer ve Karadağ, 2023). Akran baskısı, eğitim öğretim ortamlarında bireyin davranış ve alışkanlıklarını etkileyen sosyal bir yapı olarak ifade edilebilir. Özellikle ortaokul döneminde, beslenme alışkanlıklarının şekillenmesinde akran etkisi belirleyici bir rol oynamaktadır (Koyun, 2022). Akran etkisinin güçlü olduğu okul döneminde, eğitim ortamlarında sağlıklı beslenme alışkanlıklarının geliştirilmesine yönelik etkileşime dayalı öğretim yöntemlerinin kullanılması büyük önem taşımaktadır (Fisher ve ark., 2012). Bu yöntemler, sınıf içi etkileşimler ve grup çalışmaları gibi uygulamalarla öğrencilere sağlıklı beslenme alışkanlıklarını benimsemeleri konusunda rehberlik edilmesine olanak tanır.

Dijital araçların yaygınlaşmasıyla öğrencilerin günlük yaşamlarında önemli bir yer edinen ekran olgusu, çocukların yemek yeme alışkanlıklarını etkileyerek sağlıksız beslenme davranışlarına neden olabilmektedir (Kaleli ve ark., 2017). Bu durum, öğrencilerin dijital medyaya yönelik bilinçli bir farkındalığa sahip olmalarını gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla, ekranın olumsuz etkilerini azaltmayı hedefleyen eğitimlerin okul ortamlarında sunulması, dijital araçları doğru ve bilinçli kullanan bireylerin oluşumunu sağlamak için elzemdir (Erkan, 2011). Özellikle, öğrencilerin teknoloji kullanımını dengelemelerine yardımcı olan dijital okuryazarlık programları (Şahin ve Sarıçam, 2022), onların ekran karşısında yemek yeme alışkanlıklarını düzenlemelerine katkı sağlayabilmektedir. Bu nedenle, okullarda verilen eğitimlerde dijital eğitim içerikleri ile ekran bağımlılığını azaltma stratejilerinin bir arada ele alınması, öğrencilerin sağlıklı beslenme alışkanlıkları kazanmalarına yardımcı olabilir.

Bireylerin ilk eğitim aldıkları sosyal ortam olarak ifade edilen aile birimi, beslenme alışkanlıklarının temel belirleyicileri arasında yer almaktadır (Kıbrıs ve Kızılkaya, 2023). Aile, bireylerin beslenme tercihlerini doğrudan şekillendirirken, aynı zamanda çocuklarına rol model olma işlevini üstlenen bir kurumdur (Kabaran ve Mercanlıgil, 2013). Zira aile desteği ile okul öncesi ve okul dönemi boyunca sağlıklı beslenme alışkanlıklarının temelleri atılabilmektedir (Kızıltan ve Oral, 2024). Aile içinde kazanılan beslenme davranışları ise, bireyin sosyal ve kültürel gelişimiyle birlikte şekillenebilmektedir. Özellikle okul hayatı, bu şekillenmede etkili bir faktördür (Gülü ve ark., 2023). Bu nedenle, okullarda aile katılımlı eğitim programlarının geliştirilmesi, öğrencilerin evde sağlıklı beslenme alışkanlıkları edinmelerine olanak tanımaktadır (Küçükkaraca Zakkour ve Yıldıran, 2022). Bu bağlamda, öğrencilerin beslenme alışkanlıklarının aile, medya, ekran ve akran faktörleri kapsamında detaylı bir şekilde incelenmesi önemlidir. Ancak alanyazında, ortaokul dönemindeki

öğrencilerin beslenme alışkanlıklarının bu faktörlerden nasıl etkilendiğini belirlemeye yönelik bir ölçme aracına ulaşılamamıştır. Dolayısıyla, ortaokul dönemindeki öğrencilerin beslenme alışkanlıklarında medyanın, ekranın, ailenin ve akran ilişkilerinin etkisini belirleyerek, bu etkilerin yaratacağı olumsuz sonuçlara karşı koruyucu önlemler alabilmek elzemdir. Özellikle erken ve orta ergenlik dönemlerini kapsayan ortaokul 7. ve 8. sınıf öğrencilerinin yaşadıkları uyum problemlerinin etkisi, beslenme davranışları ve alışkanlıkları değişiminde daha etkilidir (Çivitçi ve Topbaşoğlu, 2015). Bu yüzden, bu çalışmada ortaokul 7. ve 8. sınıf öğrencilerinin beslenme alışkanlıklarını belirlemede geçerli ve güvenilir bir ölçme aracının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu doğrultuda geliştirilen ölçme aracı, eğitimcilerin ortaokul dönemindeki öğrencilerin beslenme alışkanlıklarını analiz etmesine olanak tanıyacak ve sağlıklı beslenme alışkanlıklarını teşvik eden eğitim programlarının planlanmasına katkı sağlayacaktır.

2. Yöntem

2.1. Araştırma Modeli

Bu araştırma, metodolojik desene göre tasarlanmış bir geçerlik ve güvenirlik çalışmasıdır. Ölçek geliştirme çalışmaları, bir konuyla ilgili davranışsal alışkanlıklar ve eğilimler gibi niteliklerin anlaşılmasını sağlamak için kullanılan bir araştırma yöntemidir (Erkuş, 2019).

2.2. Çalışma Grubu

Bu araştırmanın çalışma grubu, 2022-2023 eğitim-öğretim yılında Iğdır ili devlet ortaokullarının 7.ve 8.sınıflarında öğrenim gören ortaokul öğrencilerinden oluşmuştur. Bu amaçla, gerekli izinler Iğdır Milli Eğitim Müdürlüğü'nden alınarak uygulama yapılan okullarla iletişime geçilmiştir. Araştırmaya katılımın gönüllülük esasına dayandığı katılımcılara belirtilmiş ve gönüllü onam formunun doldurulması sağlanmıştır. Bu kapsamda, 293 ortaokul öğrencisi araştırmanın çalışma grubunu oluşturmuştur.

2.3. Adölesan Beslenme Alışkanlıkları Ölçeği'nin (ABAÖ) Geliştirilme Süreci

ABAÖ geliştirilirken bir dizi işlem gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sırasıyla aşağıdaki gibidir;

- Ölçülmek istenen amaç açık bir şekilde belirlendikten sonra, öğrencilerin beslenme alışkanlıklarını etkileyen faktörler alanyazın taramasıyla incelenmiş ve araştırmanın amacına uygun olarak 65 maddeden oluşan madde havuzu oluşturulmuştur.
- Ölçek maddeleri oluşturulduktan sonra, bir dil bilgisi uzmanı ve 3 fen eğitimi uzmanının görüşlerine sunulmuştur.
- Uzman görüşleri doğrultusunda madde havuzuna bir madde daha eklenmiş, ayrıca 12 madde içerik ve dil bilgisi bakımından revize edilmiştir. Yedi madde ise ölçekten çıkarılmıştır. Ayrıca, ölçeğin alt boyutları uzman görüşleri kapsamında ekran etkisi, akran etkisi, medya etkisi ve aile etkisi şeklinde revize edilmiştir.

- Uzman görüşleri çerçevesinde elde edilen 59 soruluk ölçek formunun ön deneme uygulaması, kapsam ve görünüş geçerliğini sağlamak amacıyla öğrenciler arasında araştırmaya katılmayan 100 kişiye uygulanmıştır. Uygulama esnasında, öğrencilerin anlamadıkları herhangi bir yer olursa maddelerin yanına not düşmeleri istenmiş ve maddelerin anlaşılabilirliği hakkında dönüt alınmıştır. Ön deneme uygulama sonrası, alanında uzman iki kişinin dönütleri doğrultusunda üç madde dil bilgisi bakımından tekrar revize edilmiştir.
- Ön deneme uygulaması sonrasında, 59 maddeden oluşan ABAÖ, 341 öğrenciye uygulanmıştır.
- Uygulama sonrası elde edilen veriler üzerinden açımlayıcı faktör analizi (AFA) gerçekleştirilmiştir. AFA sonrası elde edilen ölçeğin yapısını doğrulamak amacıyla, 320 öğrenciden tekrar veri toplanarak doğrulayıcı faktör analizi (DFA) analizi yapılmıştır.
- Gerçekleştirilen analizler sonucunda, 18 maddeden oluşan dört faktörlü geçerli ve güvenilir bir ölçek elde edilmiştir (EK-1).

2.4. Verilerin Analizi

Bu araştırmada, elde edilen verilerin analizinde SPSS ve LISREL analiz uygulamaları kullanılmıştır. Araştırmada, öncelikle 341 öğrenciden elde edilen verilerin AFA'ya uygunluğunu belirlemek amacıyla kayıp veri ve uç değer tespiti yapılmıştır. Elde edilen verilerde uç değerleri belirlemek için ana değişkenler için tek değişkenli uç değerler analizi yapılarak z puanları hesaplanmıştır. Katılımcıların ana değişkenler için elde edilen z puanlarının ± 3 aralığında yer alması nedeniyle (Mertler ve Vannatta, 2005; Çokluk ve ark., 2012), veri setinden herhangi bir veri çıkarılmamıştır. Daha sonra, çok değişkenli uç değerlerin belirlenmesi için regresyon analizi yapılarak Mahalanobis uzaklığı hesaplanmıştır. Çoklu uç değer analizi sonucunda, 48 öğrenciden elde edilen veri uç değer olarak tespit edilip, analize dahil edilmemiş ve 293 katılımcıdan elde edilen verilerle analizlere devam edilmiştir. Bu kapsamda, örneklemin faktör analizine uygunluğunu belirlemek amacıyla Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) ve Bartlett Küresellik Testi (BKT) katsayıları incelenmiştir (Field, 2005). Örneklem büyüklüğünün uygunluğu tespit edildikten sonra ise AFA, güvenirlik analizleri, DFA gerçekleştirilmiştir.

2.5. Etik Kurul İzni

Yapılan bu çalışmada "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması belirtilen tüm kurallara uyulmuştur.

Etik Değerlendirmeyi Yapan Kurul Adı: Iğdır İl Milli Eğitim Müdürlüğü

Etik Değerlendirme Kararının Tarihi: 01/12/2022

Etik Değerlendirme Belgesi Sayı Numarası: 350928

3. Bulgular

3.1. Açımlayıcı Faktör Analizi ve Güvenirlik Analizi Sonuçları

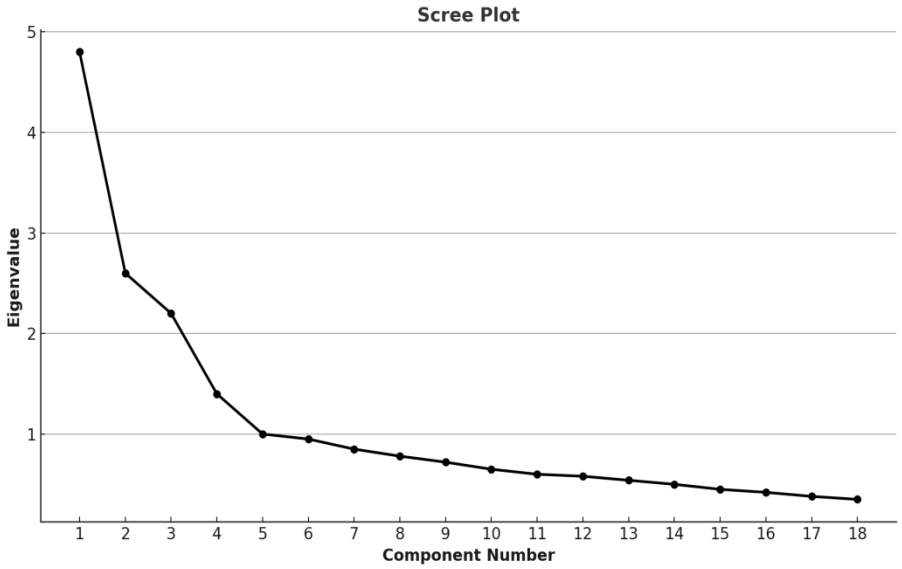
Örneklem uygunluğu için yapılan KMO ve BKT analiz sonuçları, tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. ABAÖ'ye ilişkin KMO ve Bartlett testi analiz değerleri

KMO		0,81
BKT	x^2	1835,73
	Sd	190
	P	,000

Tablo 1'de görüldüğü üzere, KMO katsayısı 0,81, BKT $\chi 2$ değeri ise ,000'dır. KMO değeri 0,80-0,90 aralığında yer almakta ve BKT katsayı değeri 0,05'ten küçük olduğu için (Kaiser, 1974), örneklem büyüklüğü AFA'ya uygundur.

Çalışmada, ölçeğin çok boyutlu olduğu öngörüldüğünden ve maddeler arası ilişkinin olmadığı varsayıldığından, faktörleşme durumunun tespiti amacıyla dik döndürme yöntemlerinden Varimax rotasyonundan yararlanılmıştır (Jackson, 2005). Varimax sonucu elde edilen madde faktör yüklerini incelerken, Field (2005)'in örneklem büyüklüğüne göre kesme değeri referans alınmıştır. Bu kapsamda,çalışmanın katılımcı grubu için kesme değeri 0,30 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, farklı faktörlerdeki maddelerin faktör yük değerleri arasındaki farkın en az 0,10 olması dikkate alınmıştır (Field, 2005). Bu nedenle, faktör yükü 0,30'dan küçük ve eş kökenlilik değeri 0,40'ın altında olan 41 madde ölçekten çıkarılarak analize devam edilmiştir. Çünkü ölçekteki her maddenin kendi faktörü içinde diğer maddelerle uyumlu olması için eş kökenlilik değerinin 0,40'tın altında olmaması gerekir (Pallant, 2007). Böylece, dört faktörlü 18 maddeden oluşan bir ölçek elde edilmiştir. Elde edilen ölçekte yer alan maddelerin faktör yükleri, faktörlerin açıkladıkları varyans bilgileri ve güvenirlikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Aynı zamanda, ölçeğin faktörlerine ilişkin çizgi (scree plot) grafiğinde de kırılma noktasının dördüncü faktöre işaret etmesi (Şekil 1) öngörülen çok boyutluluğu sağlamıştır.



Şekil 1. Yamaç birikinti grafiği

Tablo 2. ABAÖ'nün döndürülmüş faktör yükleri, varyans bilgileri ve güvenirlikleri

Madde Numarası	Faktörler			
	Ekran Etkisi	**Medya Etkisi**	**Aile Etkisi**	**Akran Etkisi**
9	0,757			
10	0,727			
4	0,698			
7	0,691			
5	0,613			
13	0,602			
27		0,774		
28		0,737		
34		0,638		
40		0,611		
31		0,579		
17		0,509		
56			0,725	
45			0,718	
51			0,715	
59			0,623	
16				0,751
15				0,671
Açıklanan toplam varyans (%54,261)	%23,929	%12,609	%10,850	%6,873
α= 0,74	0,81	0,79	0,74	0,64

Tablo 2 incelendiğinde, madde faktör yüklerinin 0,509 ile 0,774 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ölçeğin alt boyutları ise sırasıyla 0,602 - 0,757; 0,509-0,774; 0,623-0,725 ve 0,671 ile 0,751 aralığında faktör yükleriyle temsil edilmiştir. Alanyazında yük işareti değerlerine bakılmaksızın faktör yükü değerinin 0,30'dan büyük olması ve 0,30-0,59 aralığındaki değerlerin orta düzeyde, 0,60 ve üstü değerlerin ise yüksek düzeyde olması faktör yükü değerlerinin yeterli düzeyde olması için ölçüttür (Büyüköztürk, 2010). Bu nedenle, Tablo 2'ye göre ölçekteki maddelerin faktör yüklerinin yeterli düzeyde olduğu söylenebilir.

Tablo 2' ye göre alt boyutlarının cronbach alpha güvenirlik katsayıları sırasıyla 0,81, 0,79, 0,74 ve 0,64; ölçeğin tamamına ilişkin iç tutarlılık güvenirlik değeri ise 0,74'tür. Ölçek alt boyutlarının cronbach alpha değerlerinin 0,64 ile 0,81 arasında olması ölçeğin güvenilir olduğuna işarettir (Büyüköztürk 2010). Bu nedenle "akran etkisi" alt boyutunun iç tutarlılık güvenirlik katsayısı kabul edilebilir olduğu için iki maddeyle temsil edilmesinde bir problem görülmemiştir. Çünkü bir faktörde en az üç maddenin bulunması gerekliliği istisnai durumlarda iki maddeye indirgenebilir (Raubenheimer, 2004).

3.2. Doğrulayıcı Faktör Analizi Sonuçları

AFA sonucunda dört faktörlü ölçeğin yapısını doğrulamak amacıyla 320 adölesandan elde edilen yeni veri seti ile LISREL programında DFA gerçekleştirilmiştir. DFA doğrultusunda ölçeğin yapısına yönelik x^2=386,63 (df=126, p<,05) değerine ulaşılmıştır. Ki-kare değerinin anlamsız olması beklendiğinden alternatif olarak ki-kare oranının serbestlik derecesine bölümü (x^2/df) hesaplaması

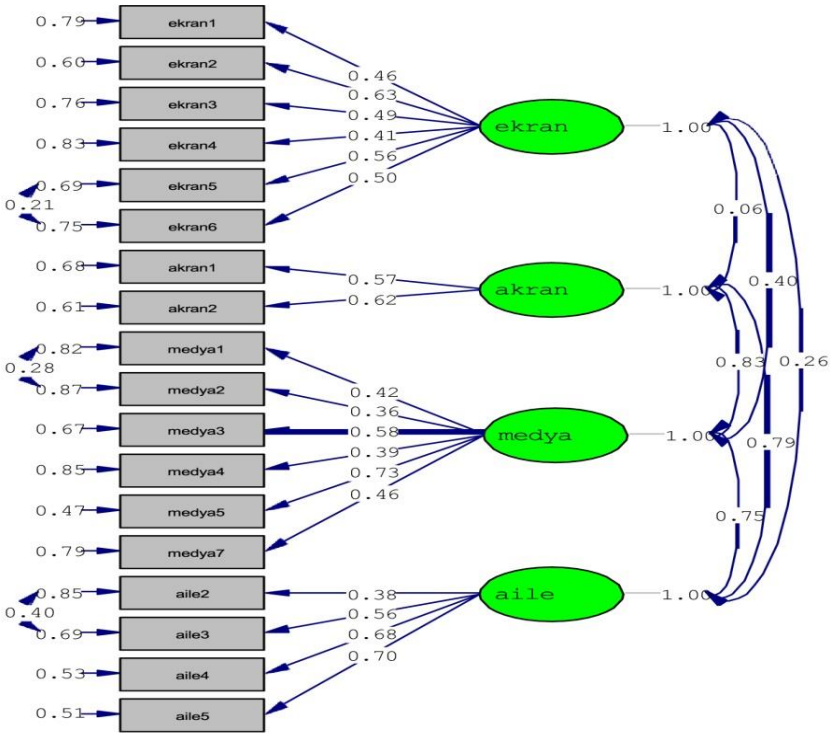
gerçekleştirilmiş (Kline, 2011) ve bu değer 3,06 olarak belirlenmiştir. Kelloway (1998)'e göre bu değer ikinin altında olmaması ile beşin altında olması şartıyla kabul edilebilir. Bu sebeple mevcut çalışmada hesaplanan x^2/df değeri ölçek modelinin doğrulandığını göstermiştir.

Ayrıca RMSEA, NNFI, CFI, IFI, SRMR, GFI uyum indeksleri de incelenmiştir. LISREL programının önerdiği modifikasyon değerleri göz önünde bulundurularak aynı faktör altında yer alan üç korelasyona izin verilmiş ve model yeniden oluşturulmuştur. Belirtilen uyum indekslerinin değer aralıklarında Brown (2009), Çokluk ve ark., (2012) ve Seçer'in (2015) görüşleri dikkate alınmış; bunlar modeldeki son uyum değerleriyle birlikte Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Uyum indeksleri değer aralıkları ve modelde elde edilen değerleri

Uyum İyiliği İndeksleri	Mükemmel	Kabul Edilebilir	Modeldeki Değerler
x^2/sd	x ≤3	3 ≤x ≤5	3,06
RMSEA	x ≤0,05	x ≤0,08	0,08
SRMR	x ≤0,05	x ≤0,08	0,08
GFI	x≥0,95	x≥0,90	0,09
CFI	x≥0,95	x≥0,90	0,09
IFI	x≥0,95	x≥0,90	0,09
NNFI	x≥0,95	x≥0,90	0,09

Tablo 2 incelendiğinde, oluşturulan modeldeki RMSEA, SRMR, GFI, CFI, IFI ve NNFI indekslerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Ek olarak tabloya göre x^2/sd değerinin mükemmel olduğu söylenebilir. Elde edilen modelin Path diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. ABAÖ'ye ilişkin path diyagramı

Şekil 2'ye göre oluşturulan modelin standartlaştırılmış faktör yükleri 0,38 ile 0,73 değerleri arasında değişkenlik göstermiştir. Ayrıca gözlenen değişkenleri açıklamada rolü olan gizil değişkenlerin t değerlerinin anlamlı olduğu saptanmıştır. Geçerlik ve güvenirliğe yönelik elde edilen veriler, ABAÖ'nün ortaokul öğrencileri için kullanılabileceğini göstermiştir.

DFA sonrası beslenme alışkanlıkları ölçeğinin cronbach alpha iç tutarlık katsayısı yeniden hesaplanmış ve toplam ölçek için 0,79 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte cinsiyet değişkeni üzerinden de güvenirlik analizi yapılmış olup; kız adölesanlar için 0,80; erkek adölesanlar için ise 0,78 olarak bulunmuştur. Bunun yanı sıra, araştırmadan elde edilen cevaplar arasındaki tutarlılığı belirlemek amacıyla test yarılama yöntemi uygulanmıştır (Berkün, 2010). Ölçeğin iki yarısı arasındaki Spearman-Brown korelasyon değeri ile Guttman Split Half Coefficient değeri 0,73 olarak bulunmuştur. Ayrıca ölçeğin her iki yarısı için ise güvenirlik katsayıları 1. kısım için (9 soru) 0,61; 2. Kısım (9 soru) için ise 0,73 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler ölçeğin güvenilir olduğunu gösterir niteliktedir.

4. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Bu araştırmada, ortaokul öğrencilerinin beslenme alışkanlıklarının oluşması ve değişmesinde etkili olan faktörler belirlenmeye çalışılmıştır. Yaşam sürecinin sağlığı ve niteliği açısından bakıldığında, beslenme önemli bir yer tutmaktadır. Yetişkinlik dönemindeki yaşam kalitesinin erken yaşlarda kazanılan alışkanlıklarla bağlı olduğu ve özellikle ortaokul döneminde meydana gelen değişimlerin bu alışkanlıklarda çok etkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, ortaokul öğrencilerinin beslenme alışkanlıklarının ve çevresel uyaranların saptanması büyük önem taşımaktadır. Konuyla ilgili alanyazın incelendiğinde, Türkiye'de bu konuyu saptamaya yönelik bir ölçek geliştirmenin yararlı olacağı düşünülmektedir. Daha önce aynı amaçla kullanılan, Bester ve Schnell (2004) tarafından geliştirilen "Eating Habits Questionnaire for Adolescent" adlı ölçek, Yılmaz (2021) tarafından Türkçeye uyarlanmış ve birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Ancak, mevcut çalışmada geliştirilen ölçeğin Türkçeye uyarlanan ölçekten ayrışan yönü, farklı boyutlar altında kategorize edilmesidir. Yılmaz (2021) tarafından Türkçeye uyarlanan beslenme alışkanlıkları ölçeği, "dış faktörler, duygusal yönler, beslenme bilgisi ve davranış" şeklinde kategorilendirilmişken, mevcut çalışmada ise medya, ekran, aile ve akran boyutları altında kategorilendirilmiştir. Bunun yanı sıra, mevcut çalışmada geliştirilen beslenme alışkanlıkları ölçeğinin 7. ve 8. sınıfta öğrenim gören öğrencilere uygulanması, geliştirilen ölçeğin hedef kitleye ulaşmada özgün bir nitelik taşıdığını göstermektedir. Beslenmeyle ilgili yapılan birçok çalışmada kullanılan ölçeklerin çocuklar, yetişkinler ve aileler için olduğu göz önüne alındığında (Demirezen ve Coşansu, 2005; Polat ve Erci, 2010; Menekli ve Fadıloğlu, 2012; Sonay Türkmen ve ark., 2017; Dilsiz ve Dağ, 2018; Tekkurşun Demir ve Cicioğlu, 2019; Başaran ve Pekmezci Purut, 2022), bu çalışmanın alanyazına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda, geliştirilen Adölesan Beslenme Alışkanlıkları Ölçeği (ABAÖ), mevcut ölçeklerin sınırlılıklarını dikkate alarak özellikle ortaokul çağındaki ergen bireylerin çevresel

etkenlerle şekillenen beslenme alışkanlıklarını değerlendirmeyi amaçlamakta olup; bu yönüyle hem literatürde yer alan çeşitli beslenme ölçeklerinden hedef kitlesi, kuramsal temeli ve boyutsal yapısı bakımından farklılaşmakta hem de alanyazına özgün bir katkı sunmaktadır. Öncelikle Başaran ve Pekmezci (2022) tarafından COVID-19 bağlamında geliştirilen "Nutrition Consumption Frequencies Scale of Change", bireylerin olağanüstü koşullarda besin tüketim sıklıklarını ölçmeyi hedeflerken; ABAÖ, olağan yaşam koşullarında ortaokul öğrencilerinin medya, ekran, akran ve aile gibi çevresel faktörler bağlamında beslenme alışkanlıklarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Tekkurşun Demir ve Cicioğlu (2019) tarafından geliştirilen Sağlıklı Beslenmeye İlişkin Tutum Ölçeği (SBİTÖ) ise üniversite öğrencilerinin bireysel tutumlarını bilgi, duygu ve davranış ekseninde ele alırken; ABAÖ, öğrencilerin tutumlarını değil, doğrudan alışkanlıklarını çevresel bağlamda sorgulamaktadır. Dilsiz ve Dağ'ın (2018) geliştirdiği "Beslenme Süreci Anne Tutumları Ölçeği", yalnızca 9-72 ay çocuklarının annelerine yönelik olarak anne tutumlarını ölçerken; ABAÖ, doğrudan ortaokul çağındaki ergen öğrencilerin kendi ifadesiyle veri toplamaktadır. Menekli ve Fadıloğlu'nun (2012) Türkçeye uyarladığı "Beslenme Değişim Süreçleri Ölçeği" ise davranış değişim sürecine odaklanan, yetişkin odaklı bir yapı sunarken; ABAÖ, gelişimsel olarak kritik bir dönem olan ortaokul çağındaki bireylerin güncel sosyal ve dijital etkileşimlerini merkeze alarak özgün bir çerçeve sunmaktadır. Son olarak, Polat ve Erci (2010) tarafından Türkçeye uyarlanan Child Feeding Scale, ebeveynlerin çocuk beslenmesi üzerindeki kontrol davranışlarını ölçerken; ABAÖ, bireyin kendi çevresiyle olan etkileşimini temel alan, doğrudan öz-bildirim temelli bir ölçme aracı olarak ayrışmaktadır. Bu yönüyle ABAÖ, yaş grubu, içerik ve çevresel faktörlerin bütüncül ele alınması açısından alanyazında önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Bunun yanı sıra, Sonay Türkmen ve ark. (2017) tarafından Türkçeye uyarlanan Adölesan Beslenme Okuryazarlığı Ölçeği (ABOÖ), mevcut araştırmada geliştirilen ABAÖ'den içeriksel odak ve ölçme amacı açısından belirgin biçimde ayrılmaktadır. ABOÖ, adölesanların işlevsel, etkileşimli ve eleştirel beslenme okuryazarlığı düzeylerini değerlendirmeyi hedefleyen, bilişsel temelli bir ölçme aracıdır. Buna karşın ABAÖ, bireyin bilgi düzeyinden çok çevresel faktörlerle şekillenen günlük beslenme davranışlarını analiz etmeye yöneliktir. Ölçekte medya, ekran süresi, akran etkisi ve ailevi yönlendirme gibi sosyal belirleyiciler ön plana çıkarılmakta; bu yönüyle beslenme davranışlarının çok boyutlu çevresel bağlamda ele alınmasına olanak sağlanmaktadır. Bu farklılıklar göz önüne alındığında, ABAÖ'nün daha çok davranış temelli ve çevresel koşullar odaklı bir ölçek olduğu; buna karşılık ABOÖ'nün, bireyin bilişsel yeterliliklerini ölçen bir okuryazarlık aracı olduğu söylenebilir. Öte yandan, ortaokul öğrencilerine yönelik beslenme temelli çalışmalarda genellikle bireylerin bilgi düzeyleri (Özdoğan, 2013) ya da belirli davranış kalıpları (Öztürk, 2010) üzerine odaklanıldığı görülmektedir. Oysa bu araştırmada geliştirilen ABAÖ, öğrencilerin beslenme alışkanlıklarını yalnızca bireysel bilgi veya davranış düzeyinde değil; aynı zamanda medya, akran, aile ve dijital ortam gibi çevresel etkileşimler bağlamında çok boyutlu biçimde ele almaktadır.

Her ne kadar beslenme alanında çok sayıda çalışma yapılmış olsa da, bu çalışmalarda kullanılan ölçme araçlarının çoğu ergen bireylerin çevresel faktörlerle şekillenen beslenme alışkanlıklarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmekten uzaktır. Dolayısıyla ABAÖ, çevresel faktörlerin etkisini dikkate alan özgün yapısıyla, ortaokul çağındaki ergenlerin beslenme alışkanlıklarını değerlendirmeye yönelik önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

Bu araştırmada, beşli likert tipinde 18 maddelik "Adölesan Beslenme Alışkanlıkları Ölçeği" elde edilmiştir. **Ekran etkisi, medya etkisi, aile etkisi ve akran etkisi** olmak üzere dört alt faktörden oluşan ölçeğin konuyla ilgili geçerli ve güvenilir bir ölçek olduğu belirlenmiştir. Ekran etkisi faktöründe, öğrencilerin beslenme alışkanlıklarını ortaya çıkaracak altı madde; medya etkisi faktöründe altı madde; aile etkisi faktöründe dört madde ve akran etkisi faktöründe ise iki ifade yer almıştır. Ölçeğin tümüne yönelik hesaplanan iç tutarlılık katsayısı da (α=0,74) ölçeğin güvenilir olduğunu göstermiştir. AFA ile elde edilen yapıya katkı sağlamak amacıyla DFA gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ortaya çıkan yapının kabul edilebilir olduğunu göstermiştir (bkz. tablo 3). Bu sonuçlara dayanarak, şu öneriler sunulabilir;

- Araştırma örnekleminin sadece 7. ve 8.sınıf öğrencilerinden oluşması bir sınırlılıktır. Bu yüzden, gelecekteki araştırmalarda geliştirilecek ölçeklerin 3, 4, 5 ve 6. sınıf gibi farklı kademelerdeki öğrencilerin katılımıyla gerçekleştirilmesi önerilebilir.
- Öğretmenlerin, öğrencilerin beslenme alışkanlıklarını tespit etmek için bu ve benzer ölçekleri kullanarak derslerinde beslenme eğitimi vermeleri yararlı olacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Not

** Bu çalışma Rabia ACEMİOĞLU'nun "Ortaokul Öğrencilerinin Beslenme Okuryazarlığının ve Beslenme Alışkanlıklarının Farklı Değişkenler Açısından İncelenmesi" başlıklı doktora tezi esas alınarak hazırlanmıştır.

Kaynakça

Akçay E. Çocuklarda sağlıklı yeme ile ilgili aile desteğinin sağlıklı yeme öz yeterliği üzerine etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Türkiye, 2023.

Altay M., Cabar HD., Altay B. Adölesan dönemi çocuklarda beslenme ve okul sağlığı. Sinop Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2018; 2(1): 173-180.

Başaran B., Pekmezci Purut H. Nutrition consumption frequencies scale of change: validity and reliability study. Black Sea Journal of Health Science 2022; 5(1): 9-17.

Berkün S. Sosyal hizmet uzmanlarının çalışma hayatinda karşılaştıklari mesleki sorunlar: Bursa örneği. Toplum ve Sosyal Hizmet 2010; 21(1): 99-109.

Bester G., Schnell N. Endogenous factors that relate to the eating habits of adolescents. South African Journal of Education 2004; 24(3): 189-193.

Brown JD. Statistics corner. questions and answers about language testing statistics: choosing the right number of components or factors in PCA and EFA. Shiken: JALT Testing & Evaluation SIG Newsletter 2009; 13(2): 19-23.

Büyüköztürk S. Sosyal bilimler için veri analizi el kitabı. 31. Baskı. Pegem Akademi Yayıncılık; 2010.

Çırak M. Üniversite öğrencilerinde nomofobi: dijital bağımlılık, sosyal bağlılık ve yaşam doyumunun rolü. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2021.

Çivitci A., Topbaşoğlu T. Akılcı duygusal eğitimin ortaokul öğrencilerinin yaşam doyumları üzerindeki etkisi. Ege Eğitim Dergisi 2015; 16(1): 13-29.

Çokluk Ö., Şekercioğlu G., Büyüköztürk Ş. Sosyal bilimler için çok değişkenli istatistik SPSS ve LISREL uygulamaları. 8. Baskı. Pegem Akademi Yayıncılık; 2012.

Demirezen E., Coşansu G. Evaluating dietary pattern in adolescence. Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi 2005; 14(8): 174-178.

Dilsiz H., Dağ İ. Beslenme süreci anne tutumları ölçeği geliştirilmesi, geçerlik ve güvenirlik çalışması. Türkiye Çocuk Hastalıkları Dergisi 2018; 14(1): 7-15.

Erkan T. Ergenlerde beslenme. Türk Pediatri Arşivi 2011; 46(11): 49-53.

Erkuş A. Psikolojide ölçme ve ölçek geliştirme. 7. Baskı. Pegem Akademi; 2019.

Field A. Discovering statistics using SPSS. 2th ed. Sage Publication; 2005.

Fisher JO., Mennella JA., Hughes SO., Liu Y., Mendoza PM., Patrick H. Offering “dip” promotes intake of a moderately-liked raw vegetable among preschoolers with genetic sensitivity to bitterness. Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics 2012; 112(2): 235-245.

Güdek K., Yetim A., Baş F., Kılıç A. Ergenlik ve sosyal çalışma. Çocuk Dergisi 2016; 16(2): 92-97.

Gülü M., Yagin FH., Gocer I., Yapici H., Ayyildiz E., Clemente F.M., Nobari H. Exploring obesity, physical activity, and digital game addiction levels among adolescents: A study on machine learning-based prediction of digital game addiction. Frontiers in Psychology 2023; 14: 109 7145.

İçelli YM. Medya okuryazarlığı öğretim materyalinin, medya okuryazarlığı becerilerine katkısı. Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Türkiye, 2017.

İçer MA., Karadağ MG. Medyadaki gıda reklamlarının üniversite öğrencilerinin beslenme alışkanlıkları ve beslenme durumu üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2023; 12(4): 1590-1604.

Jackson JE. Varimax rotation. Encyclopedia of Biostatistics 2005; 8.

Kabaran S. Mercanlıgil SM. Çocuğun beslenmesinin, besin seçimlerinin ve obezite durumlarının değerlendirilmesi. Beslenme ve Diyet Dergisi 2013; 41(2): 115-123.

Kaiser HF. An index of factorial simplicity. Psychometrika 1974; 39(1): 31-36.

Kaleli S., Kılıç N., Erdoğan M., Erdoğan N. Sakarya Üniversitesi tıp fakültesi öğrencilerinin beslenme alışkanlıkları. Online Türk Sağlık Bilimleri Dergisi 2017; 2(2): 12-18.

Karaca Ş. Sağlık haber algısının sağlıklı yaşam farkındalığı üzerindeki etkisinin incelenmesi. İstanbul University Journal of Sociology 2021; 41(2): 289-318.

Kelloway EK. Using LISREL for structural equation modeling: A researcher's guide. Sage Publication; 1998.

Kıbrıs Ş., Kızılkaya S. E-sağlık okuryazarlık düzeyinin sağlık algısı üzerine etkisinin incelenmesi. Sağlık ve Sosyal Refah Araştırmaları Dergisi 2023; 5(2): 241-250.

Kızıltan G., Oral EA. Okul öncesi çocukların beslenme davranışlarına ebeveynlerin ve aile büyüklerinin etkisi. Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2024; 17(1): 66-74.

Kline RB. Principles and practice of structural equation modeling. 2th ed. Guilford Press; 2011.

Koyun E. Ortaokul öğrencilerinde akran ilişkileri ile algılanan anne ve baba davranışları arasındaki ilişkinin incelenmesi. Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2022.

Kulaksızoğlu A. Ergenlik psikolojisi. 6.Baskı. Remzi Kitabevi; 2013.

Kuzay G. Ortaokul çağındaki öğrencilerin beslenme bilgi düzeyi ve beslenme alışkanlıkları. ADÜ-Spor Bilimleri Dergisi 2024; 1(2): 86-94.

Küçükkaraca Zakkour HK., Yıldıran H. Ebeveyn beslenme eğitiminin okul çağı çocuklarında verilen beslenme eğitimine etkisi. Gazi Sağlık Bilimleri Dergisi 2022; 7(3): 135-148.

Livingstone S., Helsper E. Gradations in digital inclusion: Children, young people and the digital divide. New Media & Society 2007; 9(4): 671-696.

Menekli T., Fadıloğlu Ç. Beslenme değişim süreçleri ölçeğinin geçerlik ve güvenirliği. Hacettepe Üniversitesi Hemşirelik Fakültesi Dergisi 2012; 19(2): 1-21.

Mertler CA., Vannatta R.A. Advanced and multivariate statistical methods: practical application and ınterpretation. 3th ed. Pyrczak Publishing; 2005.

Özdoğan Y. Adölesanların yeme davranışı ve beslenme bilgilerini saptamaya yönelik ölçek geliştirme çalışması. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara, Türkiye, 2013.

Öztürk M. Çocukların beslenme alışkanlıklarının sağlık davranışı etkileşim modeline göre incelenmesi. İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye, 2010.

Pallant J. SPSS survival manual: A step by step guide to data analysis using SPSS for Windows. 3 th ed. Open University Press; 2007.

Polat S., Erci B. Psychometric properties of the child feeding scale in turkish mothers. Asian Nursing Research 2010; 4(3): 111-121.

Raubenheimer JE. An item selection procedure to maximise scale reliability and validity. In SA Journal of Industrial Psychology 2004; 30(4): 59-64.

Seçer İ. Zorbalıkla başa çıkma stratejileri ölçeğinin geliştirilmesi: geçerlik ve güvenirlik çalışması. Atatürk Üniversitesi Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Dergisi 2015; 30: 85-105.

Sonay Türkmen A., Kalkan İ., Filiz E. Adölesan beslenme okuryazarlığı ölçeğinin türkçe'ye uyarlanması: geçerlilik ve güvenirlilik çalışması. International Peer-Reviewed Journal of Nutrition Research 2017; 10: 1-16.

Süar A. Sosyal medyanın geleneksel reklam araçlarına göre hedef kitle belirlemedeki avantajları. Online Academic Journal of Information Technology 2017; 8(28): 21-44.

Şahin EK., Sarıçam H. Okumaya yönelik tutum, dijital okuryazarlık ve okul bağlılığı arasındaki ilişkilerin incelenmesi. Uluslararası Türkçe Edebiyat Kültür Eğitim (TEKE) Dergisi 2022; 11(4): 1743-1765.

Taş İ. Ergenler için internet bağımlılığı ölçeği: geçerlik ve güvenirlik çalışması. Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Dergisi 2019; 20(2): 875-905.

Tekkurşun Demir G., Cicioğlu Hİ. Sağlıklı beslenmeye ilişkin tutum ölçeği (SBİTÖ): geçerlik ve güvenirlik çalışması. Gaziantep Üniversitesi Spor Bilimleri Dergisi 2019; 4(2): 256-274.

Vidgen HA. Gallegos D. Defining food literacy and its components. Appetite 2014; 76(1): 50-55.

Yılmaz G. Adölesanlar için beslenme alışkanlıkları ölçeği geçerlik güvenirliği. Marmara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2021.

Yılmaz S., Altunkürek ŞZ. Ortaokul öğrencilerinin beslenme ve fiziksel aktivite davranışlarının belirlenmesi: Ankara Yenimahalle ilçesi örneği. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2020; 1(2): 70-80.

EK-1: Adölesan Beslenme Alışkanlıkları Ölçeği

Ekran Etkisi	**Kesinlikle katılıyorum**	**Katılıyorum**	**Kararsızım**	**Katılmıyorum**	**Kesinlikle Katılmıyorum**
Ekran karşısında geçirdiğim süre yemek yeme saatlerimi etkiler.					
Ekranla ilgilenmem yemek yeme süremi etkiler.					
Ekran karşısında geçirdiğim süre kahvaltı öğününü hep aksatmama neden olur.					
Ekran karşısında iken ne kadar yediğimi anlamam.					
Ekran karşısında iken ne yediğimi anlamam.					
Ekran karşısında iken günü yemek yemeden geçirdiğim olmuştur.					
Medya Etkisi					
Medyada sağlıklı beslenmeyle ilgili konuları takip ederim.					
Medyada zayıflama ile ilgili konuları takip ederim.					
Beslenmeyle ilgili konuları medyada gerek duyduğumda okurum.					
Medyada takip ettiğim yemekle ilgili sayfalar beslenme alışkanlıklarımı etkiler.					
Arkadaşlarımın sosyal medyalarında yayınladığı yiyecekleri denemek istiyorum.					
Medyada yediklerimin fotoğrafını paylaştığımda kendimi daha popüler hissederim.					
Aile Etkisi					
Okula gitmeden önce ailem mutlaka kahvaltı hazırlar.					
Ailem dışarda ne yemem gerektiği konusunda beni bilgilendirir.					
Ailem besin satın alırken son kullanma tarihine bakmam gerektiği konusunda beni uyarır.					
Evde yapılan yemeklerde sağlıklı yağlar kullanılır.					
Akran Etkisi					
Arkadaşlarımla beraber iken fast-food tüketimim artış gösterir.					
Arkadaşlarımla bir araya geldiğimde daha fazla asitli içecek tüketirim.					

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2420-2448, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2420-2448, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Dijital Depo Yönetiminde Kritik Başarı Etmenlerinin DEMATEL Yöntemiyle Analizi

İlknur YARDIMCI COŞKUN[1*], Murat BASKAK[2], Mehmet TANYAŞ[3]

[1]Maltepe Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik, İstanbul
[2]İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul
[3]Maltepe Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik, İstanbul

[1]https://orcid.org/0000-0002-7183-6142
[2]https://orcid.org/0000-0002-6247-5410
[3]https://orcid.org/0000-0001-8934-3787
*****Sorumlu yazar: ilknuryardimci@maltepe.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 29.01.2025
Kabul tarihi:26.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
DEMATEL yöntemi
Dijital depo
Dijital lojistik
Kritik başarı etmenleri
Teknolojik altyapı

ÖZ

Dijitalleşme, tedarik zinciri yönetimi ve lojistik süreçlerinde köklü bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. Bu dönüşümün önemli bir ayağını oluşturan dijital depolar, gelişen teknolojilerin sunduğu imkânlarla operasyonel süreçleri optimize ederek işletmelere önemli ölçüde rekabet avantajı sağlamaktadır. Geleneksel depo yönetim sistemlerine kıyasla dijital depolar, artan müşteri talepleri, kısa teslimat süreleri ve karmaşık tedarik zinciri yapıları karşısında daha hızlı, esnek ve verimli çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada, dijital depo yönetiminde başarıyı etkileyen kritik faktörlerin belirlenmesi ve bu faktörler arasındaki nedensel ilişkilerin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Literatür taraması sonucunda 34 kritik başarı etmeni belirlenmiş ve bu etmenler DEMATEL yöntemi ile değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, dijital depolarda en yüksek etkiye ve önem derecesine sahip etmenlerin otomasyon, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri, blok zincir, otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS) ve otomatik depolama sistemleri (AS/RS) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bulut bilişim, otomasyon, blok zincir, büyük veri, yapay zekâ ve IoT gibi ileri teknolojilerin diğer etmenler üzerinde yüksek düzeyde etkileyici olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, dijital dönüşüm sürecinde altyapı teknolojilerinin stratejik rolüne işaret etmektedir. Öte yandan, kurumsal kaynak planlaması (ERP), gerçek zamanlı konum sistemleri (RTLS), istifleyici vinç sistemleri, AS/RS, ışıklı/sesli toplama sistemleri ve depo yönetim sistemlerinin (WMS) ise daha çok etkilenen konumda yer aldığı ve bu etmenlerin başarısının büyük ölçüde diğer teknoloji bileşenlerine bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Elde edilen bulgular, dijital depo yönetiminde teknolojik altyapıya yapılacak yatırımların başarının temel belirleyicilerinden biri olduğunu vurgulamakta; dijitalleşme sürecinde stratejik önceliğin etkileyici teknolojilere verilmesi gerektiğini göstermektedir.

An Analysis of Critical Success Factors in Digital Warehouse Management Using the DEMATEL Method

Research Article

Article History:
Received: 29.01.2025
Accepted: 26.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Critical success factors
DEMATEL method
Digital warehouse

ABSTRACT

Digitalization has triggered profound transformations in supply chain management and logistics operations. As a crucial part of this transformation, digital warehouses leverage technological advancements to optimize operational processes and provide companies with significant competitive advantages. Compared to traditional warehouse management systems, digital warehouses offer faster, more flexible, and more efficient solutions to meet increasing customer demands, rapid delivery expectations, and complex supply chain structures. This study aims to identify the critical success factors

Digital logistics
Technological infrastructure

affecting digital warehouse management and to analyze the causal relationships among these factors. Based on an extensive literature review, 34 critical success factors were identified and analyzed using the DEMATEL method. The analysis revealed that automation, the Internet of Things (IoT), big data, blockchain, automated guided vehicle systems (AGVS), and automated storage and retrieval systems (AS/RS) are the most influential and important factors in digital warehouses. Moreover, advanced technologies such as cloud computing, automation, blockchain, big data, artificial intelligence, and IoT were found to exert a high level of influence over other factors, highlighting the strategic role of technological infrastructure in digital transformation processes. Conversely, factors such as enterprise resource planning (ERP), real-time location systems (RTLS), stacker crane systems, AS/RS, light/sound picking systems, and warehouse management systems (WMS) were identified as more affected elements, whose success heavily depends on the integration with higher-level technologies. The findings emphasize that investments in technological infrastructure are critical for achieving success in digital warehouse management and suggest that strategic prioritization should focus on highly influential technologies to enhance the efficiency of digital transformation efforts.

To Cite: Yardımcı Coşkun İ., Baskak M., Tanyaş M. Dijital Depo Yönetiminde Kritik Başarı Etmenlerinin DEMATEL Yöntemiyle Analizi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2420-2448.

1. Giriş

Dijitalleşme, kuruluşlardaki iş akışlarını ve karar verme süreçlerini iyileştirmek için dijital teknolojilerin benimsenmesini içerir (Große Kamphake, 2020). Bugün dijitalleşme akıllı evler, e-sağlık hizmetleri ve akıllı şehirler gibi alanlarda kullanılması ile günlük yaşamı ve toplumsal yapıyı etkileyerek iş dünyasında kullanımın ötesine geçmiştir (Gray ve Rumpe, 2015).

Depolar, malların depolanması, taşınması ve dağıtımı için kritik merkezler olarak hizmet veren tedarik zincirinin ayrılmaz parçalarıdır (Tien ve ark., 2019). Depolar, nakliye sürelerini ve operasyonel maliyetleri optimum düzeyde tutarak envanter yönetimi için merkezi bir nokta işlevi görür ve böylece lojistik süreçlerin kolaylaşmasına katkı sağlar (Larutama ve ark., 2022; Gurram ve ark., 2024).

Tedarik zinciri içinde son derece yüksek öneme sahip olan depoların dijital olarak yönetilmesi birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda dijital depolar verimliliği, esnekliği ve rekabet gücünü artırmak amacıyla ileri teknolojilerden yararlanan çağdaş tedarik zinciri operasyonlarının kritik bir bileşenidir. Dijital depo yönetiminin başarısı ise teknolojik altyapı, entegrasyon (bütünleşme) ve organizasyonel hedeflerle stratejik uyum gibi birkaç kritik faktöre bağlıdır. Bu etmenler, geleneksel tedarik zincirlerinden dijital tedarik zincirlerine geçişi desteklemek ve gelişmiş kurumsal performans elde etmek için gereklidir.

Yapay zekâ, robotik, bulut bilişim ve nesnelerin interneti (IoT) gibi ileri teknolojilerin benimsenmesi, dijital depo yönetiminin temelini oluşturur. Bu teknolojiler, otomasyonu kolaylaştırır, veri işleme yeteneklerini artırır ve karar verme süreçlerini iyileştirir (Zaman ve ark., 2023). Sağlam bir teknolojik altyapının kurulması, dijital lojistiğin başarılı bir şekilde benimsenmesinde en etkili etmenlerden biri olarak tanımlanmaktadır (Khan ve ark., 2022). Sağlam bir teknolojik altyapı, stok devrini hızlandırmak ve bilgi akışlarını optimize etmek için çok önemli olan dijital iletişim platformlarının ve otomatik sistemlerin uygulanmasını destekler (Borisova ve ark., 2019).

Tedarik zinciri boyunca dijital sistemlerin bütünleştirilmesi, kesintisiz operasyonlar için yaşamsal önem taşır. Bu, iş birliğini ve bilgi paylaşımını geliştirmek için yeşil bilgi sistemlerinin kullanımını ve etkili tedarikçi yönetimini içerir (Erdem, 2022). Lojistik 4.0; üst düzey bir otomasyon seviyesine ulaşabilmek amacıyla internet (nesnelerin interneti) üzerinden toplanıp paylaşılan ilgili bilgilerin işlendiği veri tabanlarına ve yazılımlara sahip, akıllı sensörlerle (RFID sistemleriyle) desteklenen lojistik ve tedarik zinciri süreçleri olarak özetlenebilecek geniş kapsamlı bir terim olup, tüm makinelerin birbirleriyle ve insanlarla iletişim içinde olduğu bir lojistik ağını ifade etmektedir (Domingo Galindo, 2016). Dijital depo yönetimi, Lojistik 4.0 girişimlerinin organizasyonel stratejilerle bütünleştirilmesinden yararlanır ve dijital dönüşümlerin daha geniş iş hedefleriyle uyumlu olmasını sağlar (Khan ve ark., 2022). Endüstriyel düzeyde, dijital depo uygulamaları sadece operasyonel verimliliği değil aynı zamanda esneklik, izlenebilirlik ve sürdürülebilirliği de artırmakta; tedarik zinciri içindeki bilgi akışını optimize etmektedir. Dijital depo yönetimi sayısız yarar sağlarken, yüksek maliyetler, bilgi riskleri ve dijital yetkinlik eksikliği gibi zorluklar, uygulanmasını engelleyebilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek ve depo lojistiğinde dijital yetenekleri geliştirmek için üst yönetim desteği, dijital altyapının geliştirilmesi ve kamu-özel ortaklıklarının teşvik edilmesi gerekmektedir (Borisova ve ark., 2019).

Bu bağlamda çalışmanın temel araştırma soruları şunlardır: Dijital depo yönetiminde hangi etmenler kritik öneme sahiptir? Hangi teknolojiler dijital depo yönetiminde önemli etmenlerdir? Bu etmenler arasında nedensel ilişkiler nasıl şekillenmektedir? Hangi etmenler dijital dönüşüm stratejilerinde önceliklendirilmelidir?

Bu soruların yanıtlanması amacıyla lojistikte önemli ve inovatif bir yere sahip olan dijital depoların kritik başarı etmenlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kritik etmenler, her firmanın misyon ve vizyonuna bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle genel kapsamlı dijital depolar için temel kritik başarı etmenleri, sistematik literatür analizi ile belirlenmiş ve DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) yöntemi ile analiz edilmiştir. DEMATEL sonuçlarına göre dijital depo yönetiminde hangi etmenlerin daha fazla etkileyici olduğu ve hangilerinin daha çok etkilenen etmenler olduğu belirlenmiştir.

Çalışmada literatür analizi bölümünde mevcut çalışmalar analiz edilmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde çalışmanın hangi sorulara yanıt aradığı ve yöntemi belirlenirken sonrasında yürütülen metodolojiye değinilmiştir. Elde edilen sonuçlar bulgular bölümünde verilerek yorumlanmış, sonuç ve öneriler bölümünde nihai değerlendirme yapılarak gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

Bu çalışma, hem ulusal hem de uluslararası literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Türkiye özelinde, dijital depo yönetimi konusundaki akademik çalışmalar sınırlı sayıda olup özellikle DEMATEL yöntemiyle nedensel ilişkilerin analiz edildiği araştırmalar oldukça nadirdir. Bu yönüyle çalışma, alandaki boşluğu doldurarak hem lojistik sektörü uygulayıcılarına hem de araştırmacılara kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır. Uluslararası literatür açısından ise, dijital depo teknolojilerine ilişkin kritik başarı etmenlerinin sistematik bir yaklaşımla belirlenmesi ve bu etmenler arasındaki etkileşimlerin ortaya konulması, dijitalleşme sürecinin çok boyutlu doğasını anlamaya yönelik önemli bir katkıdır.

Ayrıca çalışma, gelişmekte olan ülkelerde dijital depo uygulamalarının nasıl şekillendiğine dair özgün bir perspektif sunarak küresel araştırmalar için karşılaştırmalı analiz olanağı sağlamaktadır.

1.1. Literatür Analizi

Bu çalışmada literatür taraması, sistematik bir yaklaşım izlenerek gerçekleştirilmiştir. Anahtar sözcükler olarak "digital warehouse", "critical success factors", "digital warehouse management" ve "digital logistics" ifadeleri kullanılmıştır. Taramalar; DergiPark Akademik (TÜBİTAK), Scopus, Web of Science, Taylor & Francis Online ve Google Scholar veri tabanlarında yürütülmüştür. Çalışma seçiminde, dijital depo yönetimi kavramını doğrudan ele alan veya dijital lojistik başlığı altında depo süreçlerine odaklanan, kritik başarı faktörleri içeren ve somut teknolojik etmenleri belirleyen araştırmalar dikkate alınmıştır. Literatür seçim sürecinde, yayınların içerik analizi yapılarak dijital depo odaklılığı ve başarı faktörü belirleme niteliği temel ölçüt olarak kullanılmıştır. Tablo 1'e dahil edilen çalışmaların seçilmesinde, dijital teknolojilere atıf yapılması ve başarı etmeni içeriği taşıması ölçüt olarak belirlenmiştir. Veri deposu (data warehouse) çalışmaları farklı bir alana ait olduğundan ilgili literatürden ayıklanmıştır.

Dijital depo yönetimi, son yıllarda lojistik ve tedarik zinciri yönetiminde dijital dönüşümün önemli bir parçası haline gelmiştir. Var olan literatür, dijital depoların işletme süreçlerini iyileştirme ve operasyonel verimliliği artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Dijital depo yönetiminde kritik başarı etmenleri üzerine yapılan araştırmalar, çeşitli teknolojilerin ve entegrasyonun verimliliği nasıl artırdığına odaklanmaktadır. Dijital depo yönetimindeki kritik başarı etmenlerini analiz eden çalışmalar Tablo 1'de verilmiştir.

Literatür taramasının sınırlılığı, daha çok son beş yıldaki çalışmalara odaklanılması ve yalnızca açık erişimli kaynakların değerlendirilmesiyle sınırlıdır. Ancak bu yaklaşım, güncel teknoloji trendlerini yansıtma açısından avantaj sağlaması sebebi ile tercih edilmiştir. Literatürde 2020 yılı öncesinde "dijital lojistik" ve " lojistik otomasyonu" olarak sıklıkla yer alan kavramlar, 2020 yılı sonrası depo yönetimi özelinde odaklanılarak çalışılmıştır. Literatürde dijital depo teknolojilerinin gelişim süreci incelendiğinde, 2010 yılı öncesinde barkod ve karekod sistemlerine, 2010 yılı sonrasında RFID teknolojilerine, 2014 yılı itibarıyla robotik uygulamalara, 2020 yılı sonrasında uzaktan izleme ve kontrol sistemlerine ve 2022 yılı itibarıyla ise yapay zekâ teknolojilerine yönelik vurgunun belirgin şekilde arttığı görülmektedir.

Tablo 1. Literatürde yer alan çalışmalar

Yazar/Yıl	Çalışma Özeti
Wang ve ark., 2010	Çalışma, otomatik tanımlama, RFID (Radyo Frekansı Tanımlama) teknolojisini dijital depo yönetimi için anahtar etmen olarak belirlenmiştir.
Burke ve Ewing, 2014	Çalışmada dijital depolar için temel teknolojiler arasında RFID, 2D barkodlama ve robotik ele alınmaktadır.
El Ouadaa ve ark., 2018	Çalışma dijital bir depo için temel teknolojiler arasında izleme ve tanımlama için RFID, çevresel izleme için Kablosuz Sensör Ağları (WSN'ler) ve gerçek zamanlı envanter kontrolü, ürün yerelleştirme ve verimli depo operasyonları sağlayan veri yönetimi için entegre ara yazılım bulunduğunu belirlemiştir.
Liu ve ark.,, 2018	Çalışmada, dijital depo etmenleri; verimli Siber-Fiziksel Sistem (CPS) veri toplama, doğru yer belirleme (lokalizasyon), insan-makine etkileşimi için insan etkinliği tanıma ve çoklu robot iş birliği olarak belirlenmiştir.
Ma, 2018	Çalışma dijital bir depo için temel teknolojiler olarak RFID, sensörler, yapay zeka, otonom araçlar, nesnelerin interneti (IoT) ve yüksek performanslı bilgi işlemi belirlemiştir.
Barisova ve ark., 2019	Çalışmada dijital depolamadaki temel teknolojiler arasında otomatik ve robotik teknolojiler, dijital iletişim platformları, veri işleme için yapay zeka ve akıllı analitik tanımlanmıştır.
Andiyappillai, 2020	Bu çalışmada Depo Yönetim Sistemi (WMS), otomatik taşıma sistemleri ve konveyörler, robotlar, insansız hava araçları, ışıklı ve sesli toplama sistemleri dijital depo anahtar teknolojileri olarak belirlenmiştir.
Khan ve ark., 2021	Makale, dijital tedarik zincirlerinin kritik etmenlerini 15 etmen şeklinde tanımlamaktadır. Bunlardan yapay zekâ, makina öğrenmesi, sensör teknolojisi ve otomasyon depo süreçleri için belirlenmiştir.
Kihel, 2022	Bu araştırmaya göre, depo yönetim sistemi (WMS), büyük veri, yapay zekâ (AI), nesnelerin interneti (IoT), radyo-tanımlama (RFID), makinadan makinaya (M2M) iletişim, bulut bilişim, otomasyon, işbirliksel robotlar (cobotlar), artırılmış gerçeklik (AR), gerçek zamanlı konumlandırma (GPS) sistemleri, istifleyici vinç, blok zincir, sensör teknolojisi, 3 boyutlu baskı teknolojisi ve siber güvenlik, kritik depo bileşenleridir.
Khan ve ark., 2022	Çalışma, dijital dönüşüm yoluyla geleneksel lojistiği Endüstri 4.0 ile uyumlu duruma getirecek Lojistik 4.0'ın kritik başarı etmenleri, üst yönetim taahhüdü ve desteği', 'Lojistik 4.0 girişimlerini örgütsel strateji ile uyumlu duruma getirme' ve 'teknolojik altyapı' olarak belirlenmiştir.
Agrawal ve ark., 2023	Çalışma, Dijital depoları yönlendiren temel teknolojiler arasında artırılmış gerçeklik, otonom robotik, nesnelerin interneti, blok zincir ve dronlara yer vermiştir.
Arif ve ark., 2023	Çalışmada, radyo frekansı tanımlama (RFID) teknolojisi, makina öğrenmesi, temel dijital dönüşüm araçları olarak belirlenmiştir.
Ayokunle ve ark., 2023	Çalışma, radyo frekansı tanımlama (RFID) teknolojisi, artırılmış gerçeklik (AR), insansız hava araçları (İHA), nesnelerin interneti (IoT), robotik ve otomasyon, blok zincir teknolojisi depo yönetimi için anahtar etmenler olarak belirlenmiştir.
Aouani ve ark., 2023	Radyo frekansı tanımlama (RFID) ve gerçek zamanlı konum sistemlerinin (RTLS), depo yönetim sistemi (WMS), ürün izleme, akıllı otomasyon, dijital ikiz, robotlar, blok zincir ve yapay zekâ bütünleşmesini, akıllı depolar için anahtar bileşenler olarak tanımlamaktadır.
Cabral Filho, 2023	Makale, Depo Yönetim Sistemi (WMS) ve Taşımacılık Yönetim Sistemi (TMS), stok rotasyonu, akıllı toplama, otomatik konsolidasyon ve çapraz yerleştirme sistemlerini, dijital lojistik uygulamalarının temeline koymaktadır.

Lober ve ark., 2023	Makale, depo yönetim sistemi (WMS) ile otomatik depolama sistemini (AS/RS) dijital teknolojilerin bütünleştirilmesinde önemli olarak tanımlamaktadır.
Rauniyar ve ark., 2023	Makale, nesnelerin interneti, robotik ve siber sistemler, yapay zekâ, büyük veri, kağıtsız teknolojiler, eklemeli üretim teknolojileri (3D baskı), bulut bilişimi, insansız ve mobil teknolojiler, biyometrik teknolojiler, kuantum teknolojileri, tanımlama teknolojileri ve blok zincirini akıllı lojistik faaliyetler için önemli etmenler olarak tanımlamaktadır.
Özen ve Yavaş, 2023	Çalışma, tersine lojistikte dijitalleşme için kritik etmenleri; robotik toplama ve ayrıştırma sistemleri, nesnelerin interneti, gömülü cihazlar, tam zamanlı izleme sistemleri, kaynak paylaşımı ve akıllı sistemler olarak belirlemiştir.
Zaman ve ark., 2023	Makale, stratejik rekabet gücü için tedarik zinciri performansını artırmada dijitalleşme başlığı altında radyo frekansı tanımlama (RFID), sensörler, bulut bilişim, artırılmış gerçeklik ve blok zincir teknolojisini, kritik etmenler olarak belirlemiştir.
Alherimi ve ark., 2024	Bu çalışmada, dijital depolama süreçlerinde kritik rol oynayan temel teknolojiler; malzeme hareketliliği için Otomatik Yönlendirmeli Araçlar (AGV'ler), bağlantı ve veri akışı için Nesnelerin İnterneti (IoT), operasyonel görevlerin otomasyonu için robotlar, tedarik zinciri şeffaflığının sağlanması için blok zinciri ve süreçlerin simülasyonu ile optimizasyonu için dijital ikizler olarak belirlenmiştir.
Bugarčić ve ark., 2024	Makalede barkodlu sistemler, elektronik veri alışverişi (EDI), coğrafi konumlandırma sistemleri (GPS), kurumsal kaynak planlaması (ERP), dağıtım gereksinim planlaması (DRP), çok küçük diyafram terminalleri (VSAT), coğrafi bilgi sistemleri (GIS), otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS) ve otomatik stok izleme sistemleri (AITS) akıllı lojistik için anahtar bileşenler olarak tanımlamaktadır.
Eriksson ve ark., 2024	Çalışma, gelişmiş üretim planlama sistemleri ve IoT çözümlerini, dijital depo başarı etmenleri olarak tanımlamaktadır.
Faget, 2024	Makale, yapay zekâ (AI), makina öğrenmesi (ML), nesnelerin interneti (IoT), blok zincir, otonom araçlar (taşıma, yönlendirme ve boşaltma sistemleri) dijital lojistik için anahtar teknolojiler olarak tanımlamaktadır.
Kumar, 2024	Makale depo operasyonlarını iyileştirmede, envanteri optimize etme ve müşteri beklentilerini karşılamada otomasyon, robotik ve yapay zekâyı (AI) kritik başarı etmenleri olarak tanımlamaktadır.
Ruiz ve ark., 2024	Makale depo yönetim sistemi (WMS), radyo frekansı tanımlama (RFID) teknolojisi, nesnelerin interneti (IoT), otomasyon, görüntü sinyal izleme ve takip sistemleri ile yapay zekâ teknolojisini, akıllı depolar için anahtar bileşenler olarak tanımlamaktadır.
Sied, 2024	Makale; operasyonel verimliliği ve rekabet gücünü artırmak için tedarik zinciri yönetimine dijital depolama ve yapay zekânın (AI) bütünleşmesini değerlendirmektedir.
Qureshi ve ark., 2024	Makale; büyük veri, bulut bilişim, robotik ve otomasyon, GPS ve rezervasyon sistemleri, çevrimiçi ödeme ve irsaliye sistemleri, ağ tabanlı iletişim altyapısını, dijital lojistik için anahtar etmenler olarak tanımlamaktadır.

Konunun güncel ve yeni teknolojilere odaklanan yapısı nedeniyle, yayınların 2020 yılı sonrasında artış gösterdiği belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların çoğunlukla genelden özele doğru dijital tedarik zinciri ve dijital lojistik konularına odaklandığı, dijital depo konusunda çalışmaların yer aldığı ancak burada kullanılan tek bir veya birkaç teknolojiye odaklanıldığı ve tüm teknolojileri içeren kıyaslamaya ilişkin bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu nedenle çalışma, literatürde yer alan bu boşluğu doldurmaktadır.

Literatür taraması sonucunda dijital depo yönetimindeki kritik başarı etmenleri; 3 boyutlu baskı teknolojisi, ağ tabanlı iletişim altyapısı, araç rezervasyon sistemleri, artırılmış gerçeklik (AR), barkodlu

sistemler, biyometrik teknolojiler, blok zincir, bulut bilişim, büyük veri, coğrafi bilgi ve konumlandırma sistemleri (GIS-GPS), çevrimiçi ödeme ve irsaliye sistemleri, dağıtım gereksinim planlaması (DRP), depo yönetim sistemi (WMS), dijital ikiz, elektronik veri alışverişi (EDI), gerçek zamanlı konum sistemleri (RTLS), görüntü sinyal izleme ve takip sistemleri, ışıklı/sesli toplama ve ayrıştırma sistemleri, insansız hava araçları (drone), istifleyici vinç, kaynak paylaşımı, kurumsal kaynak planlaması (ERP), makina öğrenmesi, nesnelerin interneti (IoT), otomasyon, otomatik depolama sistemleri (AS/RS) (stok rotasyonu, akıllı toplama, otomatik konsolidasyon ve çapraz yerleştirme sistemleri), otomatik stok izleme sistemleri (AITS), otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS) , radyo frekansı tanımlama (RFID), robotlar/cobotlar, sensör teknolojisi, siber güvenlik, taşımacılık yönetim sistemi (TMS) ve yapay zekâ (AI) olarak 34 ölçüt belirlenmiştir. Ölçütlerin belirlenmesinde, literatürde tekrar eden temalar ve teknolojik bileşenler dikkate alınmıştır.

Son yıllarda, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, farklı disiplinlerdeki karar alma süreçlerinde etkin bir araç olarak öne çıkmaktadır. Gerek mühendislik gerekse sosyal bilimler alanlarında, karmaşık sistemlerin çok boyutlu değerlendirilmesini mümkün kılan bu yöntemler, karar vericilere sistematik ve karşılaştırmalı analiz imkânı sunmaktadır. ÇKKV yaklaşımlarının; üretim optimizasyonu (Mosavi, 2013; Bayraktar ve Gupta, 2021; Der ve ark., 2024) , ekonomik performans değerlendirmesi (Tekin ve Mat, 2024), sürdürülebilirlik analizi (Toksöz ve ark., 2022), sağlık hizmetlerinin yönetimi (Ordu, 2023), depo ekipman seçimi (Kazancı ve Kocaoğlu, 2025) gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanıldığı görülmektedir. Bu bağlamda, söz konusu yöntemlerin yalnızca ölçütlerin önem düzeylerini belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda bu ölçütler arasındaki karşılıklı etkileşimleri, bağımlılık ilişkilerini ve karar süreçlerine etkilerini de ortaya koyduğu dikkat çekmektedir.

Lojistik ve tedarik zinciri yönetimi bağlamında da, özellikle dijitalleşme süreciyle birlikte artan karmaşıklık, karar destek sistemlerinde daha bütüncül ve analitik yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, dijital depo yönetiminde kullanılan nedensel ilişki analizine dayalı yöntemler, teknolojik bileşenler arasındaki karşılıklı bağımlılıkları açıklama gücü sayesinde önemli bir analitik çerçeve sunmaktadır. Ancak mevcut literatürde, dijital depo yönetimi özelinde bu tür yöntemlerin sınırlı düzeyde kullanıldığı, çoğu çalışmanın betimleyici düzeyde kaldığı ve etkileşimsel analizlere yeterince yer verilmediği gözlemlenmektedir. Bu durum, alandaki yönteme dayalı bilgi ihtiyacına işaret etmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Dijital depo yönetiminde en önemli etmenler (teknoloji, uygulama, donanım vd.) nelerdir? Bu etmenler arasında nasıl bir etkileşimsel ilişki vardır? Çok kriterli karar verme yöntemleriyle bu ilişkileri analiz ederek hangi stratejilerin öncelikli olması gerektiği sonucuna ulaşılabilir mi? Bu sorular çalışmanın odak konusudur.

Çalışmanın ilk aşamasında, dijital depo yönetimindeki kritik başarı etmenlerini belirlemek amacıyla, ilgili literatürdeki var olan bilgileri ve bulguları derlemek ve analiz etmek için sistematik bir literatür

taraması yöntemi uygulanmıştır. Bu kapsamda, belirlenen anahtar sözcükler ve araştırma ölçütlerine dayalı olarak akademik veri tabanlarında kapsamlı bir tarama yapılmış, konuyla ilgili önceki çalışmalar titizlikle incelenmiş ve bulgular karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Dijital depo yönetimi gibi çok sayıda teknoloji ve uygulamanın etkileşimli biçimde çalıştığı alanlarda, karar değişkenleri arasındaki nedensel ilişkilerin açıkça belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, karar verme süreçlerinde farklı boyutları dikkate alarak sistematik ve analitik çözüm yolları sunmaktadır (Ezici, 2022). Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında AHP, ANP, SAW, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE, ELECTRE, Gri İlişkisel Analiz, MAUT, MOORA, COPRAS ve MACBETH gibi teknikler bulunmaktadır. Ancak bu yöntemlerin büyük çoğunluğu, karar kriterleri arasındaki karşılıklı bağımlılığı göz ardı eden, yalnızca sıralama ve önceliklendirme temelli algoritmalar sunmaktadır. Bu yöntemler çoğunlukla bağımsız değişkenler varsayımı altında çalışmakta ve kriterlerin yalnızca karar verme hedeflerine olan etkisini analiz etmektedir.

Oysa dijital depo yönetimi gibi çok sayıda teknolojik bileşenin birbirleriyle doğrudan ve dolaylı etkileşim içinde olduğu karmaşık sistemlerde, sadece kriterlerin göreli öneminin belirlenmesi yeterli olmamaktadır. Bu tür durumlarda, kriterler arasındaki nedensel ilişkilerin analiz edilmesi ve hangi kriterlerin etkileyici, hangilerinin etkilenen rol üstlendiğinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda, AHP ve SAW gibi yöntemler, karar kriterleri arasında hiyerarşik yapıyı dikkate almakla birlikte, etkileşimleri modelleyemezler. ANP yöntemi kriterler arası bağımlılığı analiz edebilme kapasitesine sahip olsa da, 30'un üzerinde kriter için uygulama süreci oldukça karmaşık, zaman alıcı ve tutarlılık kontrolü açısından sınırlayıcıdır. TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE ve ELECTRE gibi yöntemler ise ideal ve anti-ideal çözüme yakınlık ya da tercih farklılıkları üzerinden sıralama yaparken, kriterler arası nedensellik ilişkilerini analiz etmezler. Gri ilişkisel analiz ve MOORA gibi nicel ağırlıklandırma teknikleri de benzer şekilde karar kriterlerini yalnızca etkilerine göre puanlayarak sıralama yapar.

Bu gerekçeler doğrultusunda, bu çalışmada DEMATEL yöntemi tercih edilmiştir. DEMATEL yöntemi, kriterler arasında hem doğrudan hem de dolaylı etkileri analiz etme kapasitesine sahip olup, özellikle sistemdeki etki akışını görselleştirebilmesi ve neden sonuç ilişkilerini ortaya koyması açısından diğer yöntemlerden ayrılmaktadır. Ayrıca, dijital depo sistemleri gibi belirsizlik içeren, çok boyutlu ve teknoloji temelli ortamlarda uzman görüşlerine dayalı karar modelleri daha gerçekçi sonuçlar üretebilmektedir. Bu nedenle, sektörde deneyimli uzmanlardan alınan geri bildirimlerle oluşturulan DEMATEL modeli, dijital depo bileşenleri arasındaki ilişkilerin analizi açısından en uygun yöntem olarak değerlendirilmiştir.

Bu nedenlerle çalışmada, ölçütler arası karşılıklı etkileşimleri ortaya koyabilen ve özellikle etmenlerin hem etkileyen hem de etkilenen rolleri açısından analizine imkân tanıyan çok kriterli karar verme yöntemlerinden DEMATEL yöntemi tercih edilmiştir. DEMATEL, sadece sıralama değil, aynı zamanda sistem içerisindeki yapısal ilişki ağını görselleştirerek karar destek sürecine stratejik katkı sağlar. Sayısal

veriye dayalı nesnel yöntemler bu tür etkileşimsel analizleri sınırlı ölçüde sunabilirken, DEMATEL yöntemi uzman görüşlerine dayalı değerlendirmeler yoluyla özellikle belirsizlik içeren, çok boyutlu karar ortamlarında daha gerçekçi ve bağlamsal sonuçlar üretebilmektedir. Dijital depo yönetimi gibi teknolojik dönüşüm süreçleri, çoğu zaman kuruma özel dinamiklerle şekillendiğinden, uzman görüşleri bu etmenlerin önem derecelerini ve ilişkilerini değerlendirmek için uygun bir zemin oluşturur. Bu nedenle, sektörde uzun yıllar deneyime sahip profesyonellerin ve akademisyenlerin katılımıyla oluşturulan görüşler, çalışmanın bilimsel niteliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda mevcut uygulamalara doğrudan yansıma potansiyeli taşıyan sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

Sonraki aşamada belirlenen 34 ölçüt DEMATEL matrisine aktarılmış ve analiz edilmiştir.

Adım 1: Faktörlerin Belirlenmesi: Dijital depo yönetimi için kritik olan faktörler literatür taranarak belirlenmiştir.

Adım 2: DEMATEL Anketi Hazırlama: Bu etmenler arasındaki ilişkileri değerlendirmek için uzmanlardan anket verisi toplanmıştır (EK-1).

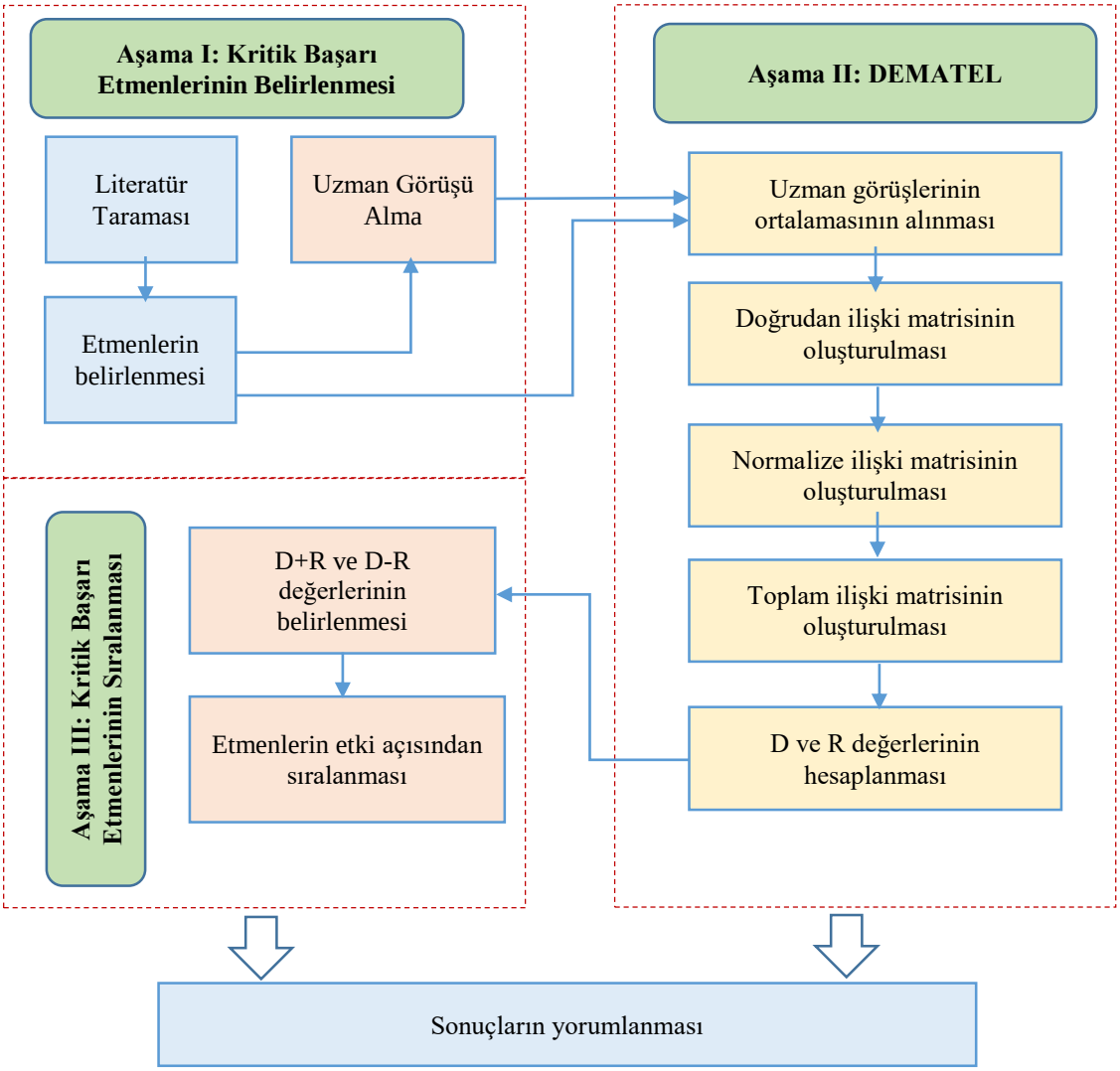
Adım 3: DEMATEL Matrisinin Oluşturulması: Toplanan veriler doğrultusunda DEMATEL matrisi kurularak her bir etmenin diğerlerini ne ölçüde etkilediği belirlenmiştir (EK-2, EK-3, EK-4).

Adım 4: Nedensel İlişkilerin Oluşturulması: DEMATEL sonuçlarına göre dijital depo yönetiminde hangi etmenlerin daha fazla etkileyici olduğu ve hangilerinin daha çok etkilenen etmenler olduğu belirlenmiştir.

3. Metodoloji

DEMATEL yöntemi, 1976 yılında etmenler arasındaki nedensel ilişkiyi değerlendiren bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır (Khan ve ark., 2018). Graf teorisi temelli olan DEMATEL yöntemi; geleneksel tekniklerden olan AHP gibi, unsurlarının bağımsız olduğu varsayımı yerine unsurların arasında var olan ilişkiyi de ortaya çıkarmaya yarayan bir yöntemdir (Shieh ve ark., 2010).

Çalışmanın anahtar çerçevesi (Şekil 1) literatür taraması sonrası DEMATEL yöntemi ile analiz, etmenleri sıralama ve sonuçların yorumlanması olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın araştırma çerçevesi

DEMATEL yöntemi adımları:

1. Uzmanlar tarafından değerlendirilecek n ölçütün literatür taraması ile belirlenmesi

2. Ölçütlerin uzmanlar tarafından karşılaştırma ölçeği (Tablo 2) yardımıyla değerlendirilmesi

Tablo 2. DEMATEL yöntemi karşılaştırma ölçeği

Sayısal Değer	Tanım
0	Önemsiz
1	Düşük Önemli
2	Orta Önemli
3	Yüksek Önemli
4	Çok Yüksek Önemli

Çalışmada uzman görüşleri, sektörde deneyimli profesyoneller ve akademisyenler arasından amaçlı örnekleme yöntemiyle seçilerek elde edilmiştir. Tablo 3' de bilgileri yer alan uzmanlar birbirleri ile etkileşime geçmemiş, her bir uzman bağımsız olarak form üzerinden Tablo 2' de yer alan ölçeği kullanarak değerlendirmesini tamamlamıştır.

Tablo 3. Görüşü alınan uzmanlara ilişkin bilgiler

Uzman	Mesleği	Mesleki Deneyimi
Uzman 1	Lojistik ve Tedarik Zinciri Profesyoneli	14 Yıl
Uzman 2	Lojistik Operasyonları Genel Müdürü	39 Yıl
Uzman 3	Lojistik ve Tedarik Zinciri Uzmanı	29 Yıl
Uzman 4	Uluslararası bir danışmanlık şirketinde Tedarik Zinciri Hizmetleri Lideri	19 Yıl
Uzman 5	Otomatik Depo Kurulum Uzmanı	21 Yıl
Uzman 6	Akademisyen (Prof.Dr.-Uluslararası Ticaret ve Lojistik Yönetimi)	45 Yıl
Uzman 7	Akademisyen (Prof.Dr.-Lojistik Yönetimi)	42 Yıl
Uzman 8	Akademisyen (Doç.Dr.-Endüstri Mühendisliği-Depo Yönetimi)	34 Yıl
Uzman 9	Depo Operasyon Sorumlusu	8 Yıl
Uzman 10	Depo Operasyon Sorumlusu	5 Yıl
Uzman 11	Depo Müdürü	11 Yıl

3. Doğrudan ilişki matrisinin oluşturulması ve ortalama doğrudan ilişki matrisinin bulunması

4. Ortalama ilişki matrisinin oluşturulması:

Elde edilen doğrudan ilişki matrislerinin (1)'deki denklem kullanılarak ortalamaları alınır ve ortalama doğrudan ilişki matrisi (A) oluşturulur (Sarı ve erk., 2017). Bu aynı zamanda grup kararıdır.

$$\boldsymbol{a_{ij} = \frac{1}{H}\sum_{n=1}^{H} X_{ij}} \quad (1)$$

11 uzmanın her biri (EK-1) DEMATEL anket formunu dijital olarak doldurarak iletmiştir. Formül 1'e göre uzman görüşlerinin ortalaması alınarak doğrudan ilişki matrisi (EK-2) oluşturulmuştur. Bu adım ile her bir uzman görüşünün karara eşit derece katılımı sağlanmıştır.

5. Normalize edilmiş doğrudan ilişki matrisinin oluşturulması:

Formül (2) ve formül (3) kullanılarak normalize edilmiş doğrudan ilişki matrisi (X) oluşturulur. x_{ij} elemanları yerine a_{ij} elemanları yazılır; matrisin satır ve sütun toplamları içinden en büyüğü belirlenerek ortalama doğrudan ilişki matrisi bu değere bölünür (Akın, 2017; Sarı ve ark., 2017).

$$\boldsymbol{s = maks\left(maks\sum_{j=1}^{n} x_{ij},\ maks\sum_{i=1}^{n} x_{ij}\right)} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{X = \frac{A}{s}} \quad (3)$$

Doğrudan ilişki matrisinin satır toplamları, satırdaki her bir ölçütün diğerleri üzerindeki toplam etkiyi gösterdiğinden formül (2)'de yazılan ifadelerden ilki, diğerleri üzerinde en fazla etkisi olan ölçütün toplam etkisine işaret etmektedir. Aynı şekilde her *i* sütununun toplamı, *i* ölçütünün üzerindeki toplam etkiyi göstermektedir (EK-3). Maksimumu ise en fazla etkiyi gösterendir. İki değerden en büyük olanı seçip her elemanı bu değere böldüğümüzde X matrisi elde edilir ve bu matrisin elemanları 0 ve 1 arasında bir değer alır.

6. Toplam ilişki matrisinin oluşturulması:

Birim matristen X matrisinin çıkarılması ile elde edilen matrisin tersi alınır. Bu matris X matrisi ile çarpılarak toplam ilişki matrisi oluşturulur (T) (EK-4).

7. Etkilenen ve etkileyen ölçüt gruplarının belirlenmesi:

T matrisinden yola çıkarak; bu matrisin *i*'inci satırının toplamı D_i, *i* ölçütü tarafından diğer ölçütlere gönderilen doğrudan ve dolaylı etkilerin toplamını gösterir. Sütun toplamı olan R_i ise, aynı ölçütün diğer ölçütlerden gelen etkilerinin toplamını gösterir.

D_i+R_i değerleri ölçütlerin ne kadar önem derecelerine sahip olduğunu gösterirken, D_i-R_i değerleri ölçütleri etkileyen ve etkilenen olarak ikiye ayırır. Genel olarak D_i-R_i değerlerinden negatif olanlar etkilenen grubu, pozitif olanlar ise etkileyen grubu gösterir (Tzeng ve ark., 2012).

4. Bulgular

Literatür taraması sonrası belirlenen depo yönetimindeki 34 kritik başarı (Tablo 4) ölçütü uzmanlarca değerlendirilmiş ve uzman görüşlerinin ortalaması alınarak doğrudan ilişki matrisi oluşturulmuştur. Bu matris, gerçekleştirilen işlemler ile normalize ilişki matrisine dönüştürülmüş ve sonrasında toplam ilişki matrisi belirlenmiştir.

Tablo 4. Ölçütler

Ölçüt No	Ölçüt Açıklaması
Ölçüt 1	3 boyutlu baskı teknolojisi
Ölçüt 2	Ağ tabanlı iletişim altyapısı
Ölçüt 3	Araç rezervasyon sistemleri
Ölçüt 4	Artırılmış gerçeklik (AR)
Ölçüt 5	Barkodlu sistemler
Ölçüt 6	Biyometrik teknolojiler
Ölçüt 7	Blok zincir
Ölçüt 8	Bulut bilişim
Ölçüt 9	Büyük veri
Ölçüt 10	Coğrafi bilgi ve konumlandırma sistemleri (GIS- GPS)
Ölçüt 11	Çevrimiçi ödeme ve irsaliye sistemleri
Ölçüt 12	Dağıtım gereksinim planlaması (DRP)
Ölçüt 13	Depo yönetim sistemi (WMS)
Ölçüt 14	Dijital ikiz
Ölçüt 15	Elektronik veri alışverişi (EDI)
Ölçüt 16	Gerçek zamanlı konum sistemleri (RTLS)
Ölçüt 17	Görüntü sinyal izleme ve takip sistemleri
Ölçüt 18	Işıklı/sesli toplama ve ayrıştırma sistemleri
Ölçüt 19	İnsansız hava araçları (drone)
Ölçüt 20	İstifleyici vinç
Ölçüt 21	Kaynak paylaşımı
Ölçüt 22	Kurumsal kaynak planlaması (ERP)

Ölçüt 23	Makina öğrenmesi
Ölçüt 24	Nesnelerin interneti (IoT)
Ölçüt 25	Otomasyon
Ölçüt 26	Otomatik depolama sistemleri (AS/RS) (stok rotasyonu, akıllı toplama, otomatik konsolidasyon ve çapraz yerleştirme sistemleri)
Ölçüt 27	Otomatik envanter izleme sistemleri (AITS)
Ölçüt 28	Otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS)
Ölçüt 29	Radyo frekansı tanımlama (RFID)
Ölçüt 30	Robotlar/cobotlar
Ölçüt 31	Sensör teknolojisi
Ölçüt 32	Siber güvenlik
Ölçüt 33	Taşımacılık yönetim sistemi (TMS)
Ölçüt 34	Yapay zekâ (AI)

4.1. Dijital Depo Yönetimi Etmenlerinin Kavramsal Gruplandırılması

Çalışmada incelenen ölçütler kavramsal benzerliklerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır. 34 dijital depo etmeni kavramsal olarak sınıflandırıldığında 7 sınıf oluşturmaktadır (Tablo 5);

Tablo 5. Ölçütlerin sınıflandırılması

1. **Otomasyon ve Robotik Teknolojiler**
• Ölçüt 25: Otomasyon • Ölçüt 26: Otomatik Depolama Sistemleri (AS/RS) • Ölçüt 27: Otomatik Envanter İzleme Sistemleri (AITS) • Ölçüt 28: Otomatik Yönlendirmeli Araç Sistemleri (AGVS) • Ölçüt 30: Robotlar / Cobotlar • Ölçüt 19: İnsansız Hava Araçları (Drone) • Ölçüt 20: İstifleyici Vinç • Ölçüt 18: Işıklı/Sesli Toplama ve Ayırma Sistemleri
2. **Veri Toplama ve Tanımlama Teknolojileri**
• Ölçüt 5: Barkodlu Sistemler • Ölçüt 29: Radyo Frekansı Tanımlama (RFID) • Ölçüt 31: Sensör Teknolojisi • Ölçüt 6: Biyometrik Teknolojiler • Ölçüt 16: Gerçek Zamanlı Konum Sistemleri (RTLS) • Ölçüt 10: Coğrafi Bilgi ve Konumlandırma Sistemleri (GIS-GPS)
3. **Veri Yönetimi ve İşleme Teknolojileri**
• Ölçüt 8: Bulut Bilişim • Ölçüt 9: Büyük Veri • Ölçüt 22: Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) • Ölçüt 15: Elektronik Veri Alışverişi (EDI) • Ölçüt 33: Taşımacılık Yönetim Sistemi (TMS) • Ölçüt 12: Dağıtım Gereksinim Planlaması (DRP) • Ölçüt 11: Çevrimiçi Ödeme ve İrsaliye Sistemleri
4. İleri Analitik ve Karar Destek Sistemleri
• Ölçüt 23: Makine Öğrenmesi • Ölçüt 34: Yapay Zekâ (AI) • Ölçüt 14: Dijital İkiz

• Ölçüt 17: Görüntü Sinyal İzleme ve Takip Sistemleri • Ölçüt 4: Artırılmış Gerçeklik (AR) • Ölçüt 1: 3 Boyutlu Baskı Teknolojisi
5. **İletişim ve Bağlantı Teknolojileri**
• Ölçüt 2: Ağ Tabanlı İletişim Altyapısı • Ölçüt 24: Nesnelerin İnterneti (IoT)
6. **Güvenlik ve Güvenilirlik Sistemleri**
• Ölçüt 7: Blok Zincir • Ölçüt 32: Siber Güvenlik
7. **Depo Yönetimi Çekirdek Sistemleri**
• Ölçüt 13: Depo Yönetim Sistemi (WMS) • Ölçüt 21: Kaynak Paylaşımı

Bu çalışmada dijital depo yönetimine ilişkin kritik başarı etmenleri, teknolojik altyapı ve süreç yönetimi odaklı olacak şekilde literatür analizi ile belirlenmiştir. Ölçütlerin bazıları, dijital dönüşüm süreçlerinde birbirini tamamlayan veya kapsayan teknolojik bileşenler içerebilmektedir. Örneğin, otomasyon (Ölçüt 25) kavramı, belirli kullanım senaryolarında yapay zekâ (Ölçüt 34) destekli uygulamaları içerebilir; bulut bilişim (Ölçüt 8) ve büyük veri (Ölçüt 9) teknolojileri arasında veri yönetimi açısından doğal bir entegrasyon bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada her ölçüt, literatürde tanımlandığı kendi özgül işlev ve katkı çerçevesinde bağımsız olarak değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir. Böylece, teknolojik etmenlerin dijital depo yönetimindeki rolleri hem bireysel hem de karşılıklı etkileşim düzeyinde kapsamlı şekilde ortaya konulmuştur.

Toplam ilişki matrisinden D ve R değerleri hesaplanmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. Ölçüt/Kriter katılım indeksleri

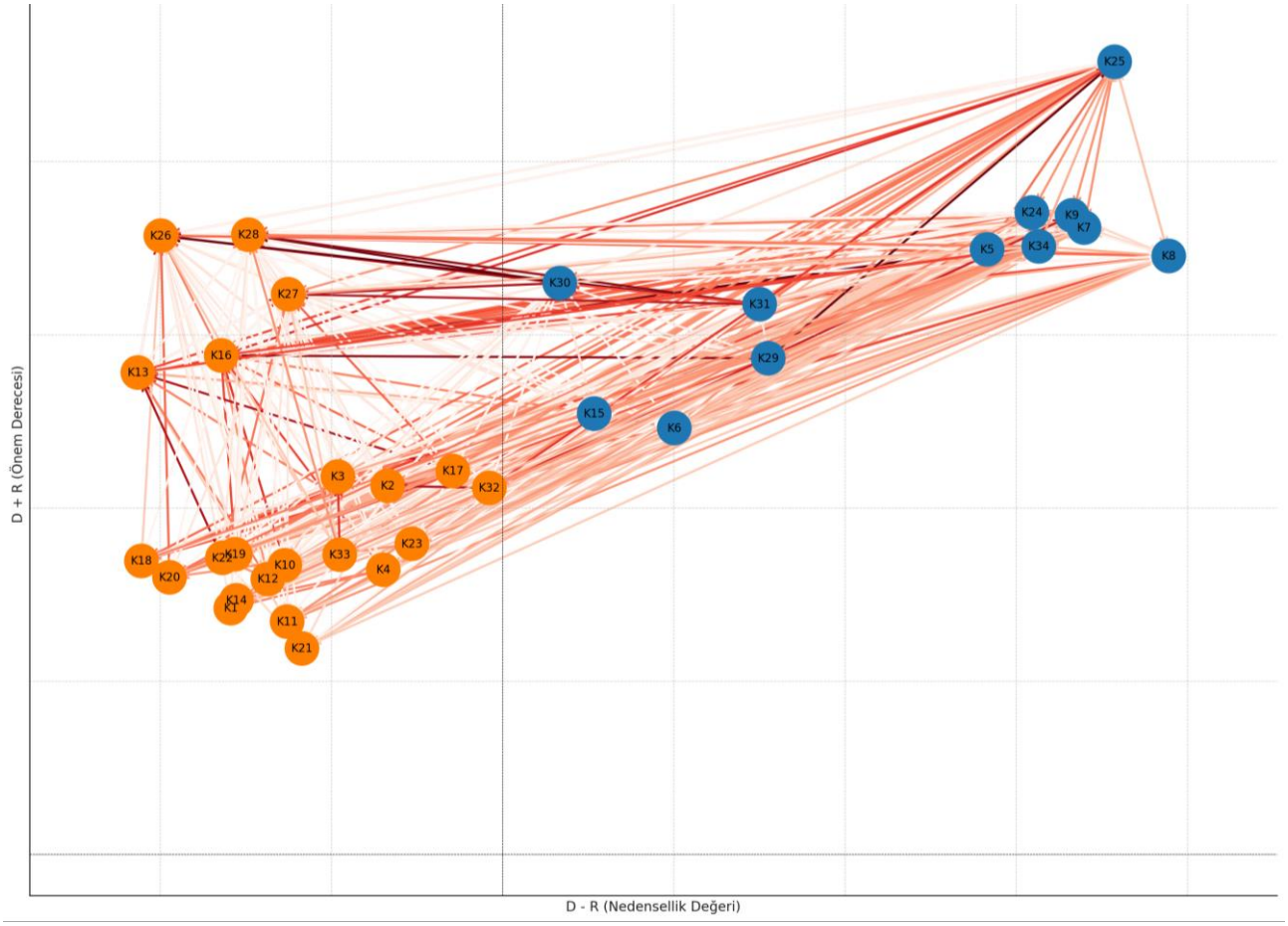
ÖLÇÜT	D (Etkileyenlik)	R (Etkilenebilirlik)	D+R (Önem Derecesi)	D-R
1	0,1571	0,5540	0,7111	-0,3969
2	0,4482	0,6161	1,0642	-0,1679
3	0,4251	0,6658	1,0909	-0,2407
4	0,3239	0,4982	0,8221	-0,1742
5	1,2270	0,5196	1,7466	0,7075
6	0,7409	0,4902	1,2312	0,2507
7	1,3293	0,4804	1,8097	0,8489
8	1,3501	0,3775	1,7276	0,9726
9	1,3381	0,5067	1,8448	0,8314
10	0,2584	0,5765	0,8350	-0,3181
11	0,1788	0,4935	0,6723	-0,3147
12	0,2261	0,5690	0,7951	-0,3430
13	0,4293	0,9619	1,3913	-0,5326
14	0,1725	0,5612	0,7337	-0,3888
15	0,7031	0,5695	1,2726	0,1337
16	0,5148	0,9257	1,4405	-0,4109
17	0,5172	0,5899	1,1071	-0,0727

18	0,1600	0,6874	0,8474	-0,5274
19	0,2382	0,6287	0,8669	-0,3906
20	0,1568	0,6432	0,8000	-0,4865
21	0,1508	0,4439	0,5947	-0,2930
22	0,2237	0,6328	0,8565	-0,4091
23	0,3823	0,5148	0,8971	-0,1326
24	1,3129	0,5402	1,8531	0,7726
25	1,5909	0,6973	2,2883	0,8936
26	0,6436	1,1427	1,7863	-0,4990
27	0,6521	0,9652	1,6173	-0,3131
28	0,7089	1,0801	1,7890	-0,3712
29	0,9101	0,5223	1,4324	0,3878
30	0,8664	0,7830	1,6494	0,0833
31	0,9819	0,6066	1,5884	0,3753
32	0,5194	0,5388	1,0582	-0,0194
33	0,3139	0,5518	0,8657	-0,2379
34	1,2691	0,4863	1,7555	0,7828

Yapılan analiz sonucunda D+R değeri en büyük olan ölçütler (önemi en yüksek olan ölçütler) sırası ile 25 (otomasyon), 24 (nesnelerin interneti (IoT)), 9 (büyük veri), 7 (blok zincir), 28 (Otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS)) ve 26 (Otomatik depolama sistemleri (AS/RS)) olarak belirlenmiştir.

D-R değerleri incelendiğinde bulut bilişim, otomasyon, blok zincir, büyük veri, yapay zeka ve nesnelerin interneti en yüksek pozitif değere sahip ölçütlerdir. Bu ölçütlerin etkileyici ölçütler olduğu görülmektedir.

En çok etkilenen ölçütler ise kurumsal kaynak planlaması, gerçek zamanlı konum sistemleri, istifleyici araçlar, otomatik depolama sistemleri (AS/RS) (stok rotasyonu, akıllı toplama, otomatik konsolidasyon ve çapraz yerleştirme sistemleri), ışıklı/sesli toplama ve ayrıştırma sistemleri ile depo yönetim sistemi (WMS) olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. DEMATEL yöntemiyle elde edilen sadeleştirilmiş etki ağı diyagramı (eşik değeri > 0.8)

Şekil 2'de yer alan grafik, 34 kritik etmenin arasındaki güçlü etkileşimleri görselleştirmek amacıyla DEMATEL yöntemi sonucu oluşturulmuştur. Düğümler analizde yer alan teknolojik uygulamaları temsil ederken, oklar ölçütler arası yönlü etkiyi göstermektedir. Şekildeki düğüm renkleri, her ölçütün sistemdeki rolünü temsil etmektedir. Mavi düğümler, diğer ölçütleri etkileyen yani neden konumundaki teknolojileri ifade eder (D−R > 0). Turuncu düğümler, diğerlerinden etkilenen yani sonuç konumundaki teknolojileri göstermektedir (D−R < 0). Ok renkleri ise etkilerin şiddetini yansıtır; açık renkten koyu kırmızıya doğru ilerleyen tonlar, artan etki gücünü temsil etmektedir. Grafik yalnızca etki değeri 0.8'in üzerinde olan ilişkileri içermektedir. X ekseninde ölçütlerin nedensellik derecesi (D−R), Y ekseninde ise toplam önem derecesi (D+R) gösterilmiştir. Pozitif D−R değerine sahip ölçütler sistemde etkileyen (neden), negatif D−R değerine sahip olanlar ise etkilenen (sonuç) konumundadır.

Grafik incelendiğinde, bazı ölçütler arasında çok sayıda güçlü etkileşimin bulunduğu ve yönlü çizgilerin yer yer çakıştığı görülmektedir. Bu durum, analiz edilen dijital teknolojilerin birbiriyle yoğun bir etkileşim ağı oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle K25 (Otomasyon), K24 (Nesnelerin İnterneti), K9 (Büyük Veri) ve K34 (Yapay Zekâ) gibi ölçütler yüksek D+R ve pozitif D−R değerleriyle ağın merkezinde yer almakta, yani sistemde hem yüksek öneme sahip hem de güçlü şekilde diğer ölçütleri etkilemektedir.

Ancak çok sayıda yönlü ilişkinin çakışması ve bazı düğümler arasında üst üste binen bağlantılar, sistemin kompleks bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, dijital teknolojilerin birbirini yalnızca destekleyici değil, aynı zamanda tetikleyici şekilde çalıştığını; dolayısıyla dönüşüm süreçlerinin bütünsel bir stratejiyle ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Net olarak ifade edilebilir ki: IoT, yapay zekâ ve otomasyon gibi teknolojiler, diğer sistem bileşenlerini etkileyerek lojistikte depo dijital dönüşümünün temel yapı taşlarını oluşturmakta, bu nedenle yatırım önceliği bu alanlara verilmelidir.

5. Tartışma

Bu çalışma, dijital depo yönetiminde kritik başarı etmenlerini belirleyerek bu etmenler arasındaki ilişkileri DEMATEL yöntemi ile analiz etmiştir. Dijital depo yönetimi alanında yapılan önceki çalışmalar, teknolojik altyapının etkinliğinin operasyonel verimliliği artırmak için kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Khan ve ark., 2022). DEMATEL analizi sonuçları, bulut bilişimin, blok zincirin ve nesnelerin internetinin diğer teknolojiler üzerindeki dönüştürücü etkisini göstermiştir. Kihel (2022) tarafından yapılan çalışma, depo yönetim sistemi (WMS), büyük veri, yapay zekâ, radyo frekans tanımlama (RFID) ve otomasyon gibi faktörlerin depo işleyişinde büyük rol oynadığını belirlemiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara benzer şekilde geçmiş çalışmalar teknolojik altyapının güçlendirilmesinin dijital depo yönetiminin başarısını belirleyen en kritik unsur olduğunu göstermektedir. Ayrıca, DEMATEL yöntemi ile elde edilen sonuçlar, yapay zekâ, büyük veri ve IoT'un dijital depo işleyişindeki etkisinin literatürde belirtilen bulgularla örtüştüğünü doğrulamaktadır (Zaman ve ark., 2023). Özellikle otomasyonun depo operasyonlarındaki rolü vurgulanmış olup, bu bulgu Kumar (2024) tarafından yapılan çalışmadaki sonuçlarla uyumludur.

DEMATEL analizi ile elde edilen D+R ve D−R değerleri ışığında, dijital depo yönetiminde etkileyici ve etkilenen ölçütler daha ayrıntılı şekilde belirlenmiştir. Bu doğrultuda yapılan analizlerin detayları aşağıda sunulmaktadır:

Dijital depo yönetiminde ölçütlerin önem düzeylerine ilişkin analiz sonuçları, sektörde dijitalleşmenin yönünü belirleyen temel teknolojilere ışık tutmaktadır. Yapılan değerlendirmelere göre, D+R (etkileşim gücü) değerleri açısından en yüksek öneme sahip ölçütler sırasıyla otomasyon (Ölçüt 25), nesnelerin interneti (IoT) (Ölçüt 24), büyük veri (Ölçüt 9), blok zincir (Ölçüt 7), otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS) (Ölçüt 28) ve otomatik depolama sistemleri (AS/RS) (Ölçüt 26) olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, dijital depo yönetiminde hem fiziksel süreçlerin otomasyonu hem de veri tabanlı izlenebilirlik ve karar destek mekanizmalarının kritik roller üstlendiğini göstermektedir.

D−R (nedensellik) değerleri incelendiğinde, bulut bilişim, otomasyon, blok zincir, büyük veri, yapay zekâ ve nesnelerin interneti gibi ileri teknolojilerin yüksek pozitif değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, söz konusu teknolojilerin sistemin genel yapısını etkileyen temel etmenler olduğunu göstermekte, dijital depo yönetiminin dijital altyapı, veri yönetimi ve yapay zekâ destekli süreçlerle

şekillendiğine işaret etmektedir. Etkileyici ölçütlerin çoğunluğunun veri odaklı ve otomasyon temelli olması, günümüz depo yönetimi anlayışının teknoloji odaklı evrimine paralel bir sonuç vermektedir.

Öte yandan, en düşük D−R değerlerine sahip olan ve dolayısıyla en çok etkilenen ölçütler arasında kurumsal kaynak planlaması (ERP), gerçek zamanlı konum sistemleri (RTLS), istifleyici araçlar, otomatik depolama sistemleri (AS/RS), ışıklı/sesli toplama ve ayrıştırma sistemleri ile depo yönetim sistemi (WMS) yer almaktadır. Bu sonuç, söz konusu teknolojilerin diğer üst düzey teknolojik etkenlerden doğrudan ve dolaylı olarak etkilendiğini ve sistem içindeki uyumlarını geliştirmek için dış faktörlere bağımlı olduklarını göstermektedir. Özellikle AS/RS ve WMS gibi çekirdek depo yönetim çözümlerinin başarıya ulaşabilmesi için bulut bilişim, IoT ve otomasyon gibi teknolojilerle bütünleşik çalışmasının kritik olduğu anlaşılmaktadır.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, dijital depo yönetiminde başarıyı etkileyen 34 kritik etmeni belirleyerek, DEMATEL yöntemi ile bu etmenler arasındaki ilişkileri ve önem düzeylerini analiz etmiştir. Yapılan analizler sonucunda, dijital depo yönetiminde en yüksek etkiye sahip etmenlerin, öncelikli olarak teknolojik altyapıya dayalı unsurlar olduğu belirlenmiştir. Özellikle otomasyon (Ölçüt 25), nesnelerin interneti (IoT) (Ölçüt 24), büyük veri (Ölçüt 9), blok zincir (Ölçüt 7), otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS) (Ölçüt 28) ve otomatik depolama sistemleri (AS/RS) (Ölçüt 26) en yüksek D+R değerlerine sahip ölçütler olarak öne çıkmıştır. Bu bulgu, dijital depo yönetiminde veri tabanlı teknolojilerin ve otomasyon çözümlerinin kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

D−R (nedensellik) değerleri incelendiğinde, bulut bilişim, otomasyon, blok zincir, büyük veri, yapay zekâ ve nesnelerin interneti gibi ileri teknolojilerin yüksek pozitif değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, söz konusu teknolojilerin sistemin genel işleyişine yön veren, diğer teknolojiler üzerinde doğrudan etkili olan etmenler olduğunu göstermektedir. Etkileyici ölçütlerin çoğunluğunun veri işleme, iletişim ve otomasyon odaklı olması, dijital depo dönüşümünün temelinde güçlü bir teknoloji entegrasyonu ihtiyacının bulunduğunu göstermektedir.

Öte yandan, kurumsal kaynak planlaması (ERP), gerçek zamanlı konum sistemleri (RTLS), istifleyici vinç sistemleri, otomatik depolama sistemleri (AS/RS), ışıklı/sesli toplama ve ayrıştırma sistemleri ile depo yönetim sistemi (WMS) gibi teknolojiler, D−R değerlerinin negatif olması nedeniyle daha çok etkilenen faktörler olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, operasyonel süreçlerde kullanılan otomasyon ve yönetim sistemlerinin, başarıya ulaşabilmeleri için güçlü bir dijital altyapıya ve veri odaklı teknolojilere bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak, çalışma bulguları dijital depo yönetiminde teknolojik altyapı unsurlarının temel bir başarı belirleyicisi olduğunu desteklemektedir. Bu çerçevede, dijital depo yönetiminde yapılacak teknolojik yatırımların önceliklendirilmesinde, sistem üzerindeki etkileşim ağı yüksek olan etmenlere öncelik verilmesinin dijital dönüşüm süreçlerinin verimliliğini ve etkinliğini artırabileceği değerlendirilmektedir.

Çalışmada uzman seçimi, stratejik bir bakış açısıyla gerçekleştirilmiş; analiz sürecine üst düzey yöneticiler, akademisyenler ile depo operasyon çalışanları ve yöneticileri dahil edilmiştir. Bu yaklaşım, dijital depo yönetiminin stratejik ve teknolojik boyutlarının sistematik biçimde analiz edilmesine olanak tanımıştır. Ancak doğrudan depo operasyonlarını yöneten saha uygulayıcılarının sınırlı düzeyde temsil edilmesi, yönetici sayısının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, dijital teknolojiler gibi yatırım kararı gerektiren konuların stratejik karar alma sürecinde yer alması ve bu kararların çoğunlukla yöneticiler tarafından verilmesiyle ilişkilidir. Gelecek çalışmalarda, farklı uzman profillerinin (örneğin depo yöneticileri, saha mühendisleri, sistem operatörleri) daha geniş kapsamda sürece dahil edilmesi önerilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, dijital depo yönetiminde başarıyı etkileyen faktörlerin önceliklendirilmesi için çok kriterli karar verme yöntemlerinin (örneğin Analitik Hiyerarşi Süreci - AHP, Analitik Ağ Süreci - ANP) kullanılması önerilmektedir. Böylelikle, sektörler bazında kritik başarı faktörleri daha etkin şekilde belirlenebilir ve sektöre özel dijital depo yönetim stratejileri geliştirilebilir. Ayrıca, farklı sektörlerde (örneğin e-ticaret, sağlık, otomotiv ve gıda sektörleri) dijital depo teknolojilerinin uyarlanabilirliği ve etkisi araştırılarak, sektörel ihtiyaçlara göre optimize edilmiş uygulamalar geliştirilmesi sağlanabilir. Bu tür sektörel çalışmalar, dijital depo yönetiminde sektöre özel rekabetçi avantajların oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Agrawal P., Nagesh P., Navgotri S., Sharma R. Six technologies driving digitalization of industrial warehouses. INDAM: Indian Academy of Management at SBM-NMIMS Mumbai 2023: 797-807. Singapore.

Akın NG. İşletme bölümü öğrencilerinin meslek seçimini etkileyen faktörlerin bulanık DEMATEL yöntemi ile değerlendirilmesi. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi 2017; 13(4): 873-890.

Alherimi N., Saihi A., Ben-Daya M. A systematic review of optimization approaches employed in digital warehousing transformation. IEEE Access 2024.

Andiyappillai N. Digital transformation in warehouse management systems (WMS) implementations. International Journal of Computer Applications 2020; 177(45): 34-37.

Aouani SE., Daldoul D., Sboui L., Chaabane A. Design and implementation of a digital twin testbed for smart warehouse operations. IEEE Third International Conference on Signal, Control and Communication (SCC), December 2023, sayfa no:1-6, Tunisia.

Arif M., Shah A., Khan S. Embracing the future: evaluating the strategic impact of digital supply chain integration on business performance. Journal of Asian Development Studies 2023; 12(3): 376-393.

Ayokunle Y., Shukla N., Rahman T., Chakraborty S., Kumari S. The performance evaluation of digital technologies in warehouse management: a systematic literature review. SSRN Preprint 2023.

Bayraktar S., Gupta K. Multi-criteria decision making through soft computing and evolutionary techniques. Intelligent Manufacturing 2021: 123-147.

Borisova V., Taymashanov K., Tasueva T. Digital warehousing as a leading logistics potential. Sustainable Leadership for Entrepreneurs and Academics: 2018 Prague Institute for Qualification Enhancement (PRIZK) International Conference "Entrepreneurial and Sustainable Academic Leadership"(ESAL2018) 2019; 279-287.

Bugarčić FŽ., Mijušković VM., Aćimović S. Innovation and new technologies as determinants of logistics 4.0. Politická Ekonomie 2024; 72(1): 102-121.

Burke EM., Ewing Jr DL. Improving warehouse inventory management through rfid, barcoding and robotics Technologies. Doctoral dissertation, Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2014.

Cabral FDA. Logistics 4.0: fundamentals and importance. Seven Editora 2023.

Der O., Ordu M., Başar G. Multi-objective optimization of cutting parameters for polyethylene thermoplastic material by integrating data envelopment analysis and SWARA-based CoCoSo approach. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(2): 638-661.

Domingo GL. The challenges of logistics 4.0 for the supply chain management and the information technology. Norwegian University of Science and Technology – NTNU, Trondheim, Norway, 2016.

El Ouadaa S., Bah S., Berrado A. Design of intelligent warehouse based on RFID and WSNs technologies. In Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications, 2018, October, sayfa no: 1-6.

Erdem MB. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde kritik başarı faktörlerinin geleneksel ve dijital perspektiften karşılaştırmalı değerlendirmesi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi 2022; 12 (Dijitalleşme): 151-165.

Eriksson KM., Olsson AK., Carlsson L. Beyond lean production practices and Industry 4.0 technologies toward the human-centric Industry 5.0. Technological Sustainability 2024; 3(3): 286-308

Ezici NŞ. Yöneylem araştırması teknikleri kullanılarak deprem farkındalığını etkin bir şekilde sağlayacak süreçlerin belirlenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2022.

Faget MF. The impact of emerging technologies on logistics: a comprehensive analysis. In Proceedings of the International Conference on Business Excellence, 2024; 18(1): 1868-1881.

Gray J., Rumpe B. Models for digitalization. Software & Systems Modeling 2015; 14: 1319-1320.

Große Kamphake A. Digitalization in controlling. Digitization in Controlling: Forecasting Processes through Automation 2020: 3-25.

Gurram A., Chowdary KM., Neelesh NP., Reddy RST., Bangalore RA. Optimal warehouse slotting in supply chain management system. In 2024 5th International Conference for Emerging Technology (INCET), 2024, 1-7.

Kazancı U., Kocaoğlu B. Depolarda kullanılmak üzere reach truck seçimi analitik hiyerarşi prosesi ve hedef programlamanın bir arada kullanımı. Maltepe Üniversitesi Akademik Bakış Dergisi 2025; 1(1).

Khan S., Imran KM., Haleem A. Towards effective management of cold chain: a DEMATEL approach. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, September 2028; 404: 012019. IOP Publishing.

Khan S., Singh R., Haleem A., Dsilva J., Ali SS. Exploration of critical success factors of logistics 4.0: a DEMATEL approach. Logistics 2022; 6(1): 13.

Khan SA., Kusi-Sarpong S., Gupta H. Arhin FK., Lawal JN., Hassan SM. Critical factors of digital supply chains for organizational performance improvement. IEEE Transactions on Engineering Management 2021; 71: 13727-13741

Kihel YE. Digital transition methodology of a warehouse in the concept of sustainable development with an ındustrial case study. Sustainability 2022; 14(22): 15282.

Kumar S. Enhancing e-commerce warehouse management. International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM) 2024; 8(3).

Larutama W., Bentar DR., Risdayanto RO., Alvariedz RS. Implementation of warehouse management system planning in finished goods warehouse. Journal of Logistics and Supply Chain 2022; 2(2): 81-90.

Liu X., Cao J., Yang Y., Jiang S. CPS-based smart warehouse for industry 4.0: A survey of the underlying technologies. Computers 2018; 7(1): 13.

Lober A., Ollinger L., Voelker S., Baumgaertel H. Towards logistics 4.0: a skill-based OPC UA communication between WMS and the PLC of an automated storage and retrieval system. Tehnički Glasnik 2023; 17(3): 383-390.

Ma H. An industry 4.0 technologies-driven warehouse resource management system. In International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation. 2018, September, pp: 27-33, Singapore.

Mosavi A. A multicriteria decision making environment for engineering design and production decision-making. International Journal of Computer Applications 2013; 69(1): 26-38.

Ordu M. Evaluating occupational accidents and disease-based sustainable performances of the Turkish development regions using a hybrid MCDM approach. In Intelligent Engineering Applications and Applied Sciences for Sustainability. IGI Global 2023; 190-207.

Ozen Y., Yavaş VA. A study on critical factors of digitalization in reverse logistics. Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 16(1): 1-6.

Qureshi KM., Mewada BG., Kaur S., Khan A., Al-Qahtani MM., Qureshi MRNM. Investigating Industry 4.0 technologies in logistics 4.0 usage towards sustainable manufacturing supply chain. Heliyon 2024; 10(10).

Rauniyar K., Wu X., Gupta S., Modgil S., Kumar A. Digitizing global supply chains through blockchain. Production Planning & Control 2023; 1-22.

Ruiz JE., Martínez I., Juárez C. Configuration based on industry 4.0 technologies as a step towards an affordable smart warehouse. Journal of Smart Cities and Society (Preprint) 2024; 1-12.

Sarı İU., Ervural BÇ., Bozat S. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde DEMATEL yöntemiyle tedarikçi değerlendirme kriterlerinin incelenmesi ve sağlık sektöründe bir uygulama. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2017; 23(4): 477-485.

Shieh JI., Wu HH., Huang KK. A DEMATEL method in identifying key success factors of hospital service quality. Knowledge-Based Systems 2010; 23(3): 277-282.

Sied A. Factors influencing digital warehousing and AI utilization in modern supply chains: implications for warehouse maintenance costs and product pricing. International Journal for Multidisciplinary Research 2024; 6(4).

Tekin P., Mat B. Afet dönemlerinde e-ticaret sektöründe uygulanan fiyat dalgalanmaları analizi: İçecek kategorisi için Türkiye örneği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(4): 1826-1850.

Tien NH., Anh DBH., Thuc TD. Global supply chain and logistics management. 2019.

Toksöz ET., Ünal ZB., Acar E. Seçilmiş hazır giyim fason üreticilerinin sosyal uygunluk yönünden değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(2): 653-667.

Tzeng GH., Huang CY. Combined DEMATEL technique with hybrid MCDM methods for creating the aspired intelligent global manufacturing & logistics systems. Annals of Operations Research 2012; 197: 159-190.

Wang H., Chen S., Xie Y. An RFID-based digital warehouse management system in the tobacco industry: a case study. International Journal of Production Research 2010; 48(9): 2513-2548.

Zaman SI., Khan S., Zaman SAA., Khan SA. A grey decision-making trial and evaluation laboratory model for digital warehouse management in supply chain networks. Decision Analytics Journal 2023; 100293.

EK 1- DEMATEL Formu (a)

Çalışmanın amacı; dijital depo yönetiminde kritik başarı etmenlerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda çok kriterli karar verme yöntemlerinden DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) kullanılacaktır. Bu nedenle sizlerin bilgi ve deneyimlerinize ihtiyaç duymaktayım.

Yanıtlarınızın doğruluğu, araştırmanın sağlıklı ve başarılı sonuçlar vermesi açısından önemli olup, sonuçlar bireysel ve kurum bazında değil, genel olarak değerlendirilecektir. **Yanıtlarınız tamamen gizli kalacak ve elde edilen genel değerlendirme sonuçları yalnızca bilimsel platformlarda sunulacaktır.**

Aşağıda istenilen değerlendirme yöntemi ve kriterler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Katkılarınız için teşekkür ederim.

Tablo EK-1a. Ölçütler

Ölçüt No	Ölçüt Açıklaması
Ölçüt 1	3 boyutlu baskı teknolojisi
Ölçüt 2	Ağ tabanlı iletişim altyapısı
Ölçüt 3	Araç rezervasyon sistemleri
Ölçüt 4	Artırılmış gerçeklik (AR)
Ölçüt 5	Barkodlu sistemler
Ölçüt 6	Biyometrik teknolojiler
Ölçüt 7	Blok zincir
Ölçüt 8	Bulut bilişim
Ölçüt 9	Büyük veri
Ölçüt 10	Coğrafi bilgi ve konumlandırma sistemleri (GIS- GPS)
Ölçüt 11	Çevrimiçi ödeme ve irsaliye sistemleri
Ölçüt 12	Dağıtım gereksinim planlaması (DRP)
Ölçüt 13	Depo yönetim sistemi (WMS)
Ölçüt 14	Dijital ikiz
Ölçüt 15	Elektronik veri alışverişi (EDI)
Ölçüt 16	Gerçek zamanlı konum sistemleri (RTLS)
Ölçüt 17	Görüntü sinyal izleme ve takip sistemleri
Ölçüt 18	Işıklı/sesli toplama ve ayrıştırma sistemleri
Ölçüt 19	İnsansız hava araçları (drone)
Ölçüt 20	İstifleyici vinç
Ölçüt 21	Kaynak paylaşımı
Ölçüt 22	Kurumsal kaynak planlaması (ERP)
Ölçüt 23	Makina öğrenmesi
Ölçüt 24	Nesnelerin interneti (IoT)
Ölçüt 25	Otomasyon
Ölçüt 26	Otomatik depolama sistemleri (AS/RS) (stok rotasyonu, akıllı toplama, otomatik konsolidasyon ve çapraz yerleştirme sistemleri)
Ölçüt 27	Otomatik envanter izleme sistemleri (AITS)
Ölçüt 28	Otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS)

Ölçüt 29	Radyo frekansı tanımlama (RFID)
Ölçüt 30	Robotlar/cobotlar
Ölçüt 31	Sensör teknolojisi
Ölçüt 32	Siber güvenlik
Ölçüt 33	Taşımacılık yönetim sistemi (TMS)
Ölçüt 34	Yapay zekâ (AI)

PUANLANDIRMA

Bir ölçütün dijital depo yönetiminde bir diğeri üzerindeki etkisi önemsiz ise 0, düşük önemde ise 1, orta önemde ise 2, yüksek önemde ise, çok yüksek önemde ise 4 puan veriniz.

Tablo EK-1b. DEMATEL Yöntemi Karşılaştırma Ölçeği

Sayısal Değer	**Tanım**
0	Önemsiz
1	Düşük Önemli
2	Orta Önemli
3	Yüksek Önemli
4	Çok Yüksek Önemli

Örnek: DEMATEL formunda kriterlerin karşılaştırılması ve önem derecelerinin gösterilmesi

		Etkilenen Ölçütler		
	Karar Değişkenleri/Ölçütler	3 boyutlu baskı teknolojisi	Ağ tabanlı iletişim altyapısı	Araç rezervasyon sistemleri
Etkileyen Ölçütler	3 boyutlu baskı teknolojisi	**-**	**1**	**2**
	Ağ tabanlı iletişim altyapısı	**0**	**-**	**3**
	Araç rezervasyon sistemleri	**0**	**0**	**-**

- **3 Boyutlu Baskı Teknolojisi**, Ağ Tabanlı İletişim Altyapısı üzerinde **düşük önemde** etkiye sahip olduğu için → **1** puan verilmiş.
- **3 Boyutlu Baskı Teknolojisi**, Araç Rezervasyon Sistemleri üzerinde **orta önemde** etkiye sahip olduğu için → **2** puan verilmiş.
- **Ağ Tabanlı İletişim Altyapısı**, Araç Rezervasyon Sistemleri üzerinde **yüksek önemde** etkiye sahip olduğu için → **3** puan verilmiş.

(Kendi kendine etki sorulmadığı için çapraz boş bırakılmalı veya - yazılmalıdır.)

EK 1- DEMATEL Formu (b)

	Etkilenen Kriterler																																	
Etkileyen Kriterler	**KD**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**
	1	-																																	
	2		-																																
	3			-																															
	4				-																														
	5					-																													
	6						-																												
	7							-																											
	8								-																										
	9									-																									
	10										-																								
	11											-																							
	12												-																						
	13													-																					
	14														-																				
	15															-																			
	16																-																		
	17																	-																	
	18																		-																
	19																			-															
	20																				-														
	21																					-													
	22																						-												
	23																							-											
	24																								-										
	25																									-									
	26																										-								
	27																											-							
	28																												-						
	29																													-					
	30																														-				
	31																															-			
	32																																-		
	33																																	-	
	34																																		-

EK 2- Direkt / Doğrudan İlişki Matrisi (A)

		Etkilenen Kriterler																																
	KD	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**
Etkileyen Kriterler	**1**	0,00	0,00	0,55	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,55	0,27	0,27	0,00	0,55	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,73	0,00	0,27	0,00	0,27	0,27	0,73	0,27	0,00	0,00
	2	0,82	0,00	2,27	0,82	0,55	0,27	0,55	0,55	0,27	1,27	0,27	0,82	0,27	0,55	0,55	0,55	0,55	0,27	0,82	0,55	0,82	0,82	0,55	0,82	0,27	0,27	0,27	0,55	0,55	0,27	0,82	0,55	0,27	0,55
	3	0,27	0,82	0,00	0,27	0,82	0,55	0,27	0,27	0,82	2,00	0,55	0,55	0,27	0,55	0,27	0,82	0,55	0,55	0,27	0,55	0,55	0,55	0,55	0,82	0,55	0,27	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,27
	4	2,18	0,00	0,27	0,00	0,00	0,27	0,55	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	2,18	0,55	2,73	0,27	0,55	0,55	0,00	0,55	0,27	0,55	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,55	1,45	0,27	0,00	0,00
	5	0,55	0,82	1,09	0,82	0,00	0,82	1,09	0,82	1,09	1,09	0,82	0,82	3,00	0,82	0,55	4,00	3,73	2,73	0,82	2,55	0,82	0,55	0,82	1,09	3,73	3,27	3,27	3,00	1,09	3,00	1,09	1,09	0,82	0,55
	6	1,09	0,82	0,55	0,55	0,82	0,00	1,09	0,55	0,82	0,82	1,09	0,55	1,09	0,82	1,82	0,55	2,27	0,55	1,09	1,09	0,82	1,09	1,09	0,82	0,82	0,82	0,55	1,09	1,09	1,09	1,55	0,82	1,09	1,09
	7	2,00	1,73	1,73	1,45	1,45	2,00	0,00	1,73	1,45	1,45	1,73	1,45	2,18	1,73	1,73	2,45	1,45	2,45	1,45	1,45	1,73	1,73	2,00	1,73	1,73	2,18	1,45	2,18	1,45	2,00	1,45	2,00	1,73	1,73
	8	1,73	1,73	1,45	1,45	1,73	1,45	1,45	0,00	1,73	1,45	2,00	2,00	2,73	1,45	1,45	2,73	1,45	2,73	2,00	2,00	1,45	1,45	2,00	1,45	1,45	2,45	2,00	2,45	1,73	1,45	1,73	2,00	1,45	1,73
	9	2,00	1,73	1,73	1,73	1,45	1,45	2,00	1,27	0,00	2,00	2,00	1,73	2,45	1,73	1,73	2,45	1,73	2,73	1,45	1,45	1,45	1,73	1,45	1,73	1,73	2,18	1,73	2,18	1,45	2,00	1,45	1,45	1,73	1,73
	10	0,00	0,27	1,45	0,00	0,27	0,27	0,27	0,27	0,55	0,00	0,27	0,00	0,27	0,00	0,27	2,91	0,00	0,55	0,55	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,27	0,27	0,27	0,00	0,55	0,27	0,27	0,27	0,27	0,00
	11	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	1,45	0,00	1,45	0,00	0,27	0,27	0,00	0,00	0,27	0,27	0,55	0,27	0,00	0,00	0,27	0,00	0,27	0,55	0,27	0,00	0,27	0,00
	12	0,27	0,55	0,00	0,55	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,55	0,00	0,00	0,27	0,27	2,00	0,27	0,55	0,00	0,00	0,27	0,55	0,55	0,00	0,00	0,27	1,45	0,55
	13	0,55	0,00	0,27	0,27	0,00	0,55	0,27	0,55	0,00	0,55	0,00	2,18	0,00	0,55	0,00	0,00	0,55	0,55	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,27	0,27	3,18	3,18	2,18	0,00	0,00	1,73	0,00	0,55	0,00
	14	0,00	0,00	0,27	0,27	0,00	0,00	0,27	0,00	0,55	0,27	0,00	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,55	0,55	0,55	0,27	0,00	0,00	0,27	0,27	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,18	0,00	0,27
	15	0,27	2,45	2,73	0,00	0,00	2,00	0,00	0,55	0,00	2,00	2,18	0,55	1,73	0,55	0,00	2,18	0,27	1,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,55	2,18	2,18	2,00	0,55	1,73	1,73	0,00	0,00	0,27
	16	0,00	0,27	0,00	0,55	0,55	0,27	0,27	0,00	0,55	0,27	0,00	2,00	2,73	0,55	0,27	0,00	0,27	0,00	2,73	0,55	0,00	0,00	0,00	0,55	0,55	2,18	2,45	2,18	0,55	0,55	0,55	0,00	1,45	0,00
	17	0,00	0,55	0,55	0,55	0,55	0,27	0,27	0,55	0,55	0,00	0,00	0,00	3,45	0,27	0,00	2,45	0,00	2,45	0,00	0,00	0,27	0,27	0,27	0,27	0,55	2,45	2,45	2,73	0,00	0,00	0,00	0,27	0,27	0,27
	18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,55	0,00	0,27	0,27	0,00	0,27	0,55	0,55	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,73	0,27	1,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00
	19	0,55	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,27	0,00	0,27	0,00	0,27	0,00	0,55	0,55	0,00	1,45	2,73	2,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00
	20	0,27	0,00	0,00	0,27	0,55	0,27	0,27	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,27	0,27	0,27	0,00	0,00	2,45	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,27
	21	0,00	1,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,27	0,00	0,55	0,00	0,00	0,55	0,55	0,00	1,27	0,00	0,00	0,27	0,55	0,27	0,27	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,27
	22	0,00	0,00	0,27	0,00	0,27	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	3,45	0,00	0,55	0,00	0,27	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,55	0,55	0,00	0,27	0,55	0,00	0,00	0,27	0,27	0,55
	23	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,55	0,27	0,27	0,00	0,55	0,00	0,55	2,18	0,00	0,00	0,00	0,27	0,27	0,00	2,00	0,00	0,27	0,00	0,55	0,27	0,00	0,55	3,18	0,00	2,91	0,27	0,27	0,27	0,55
	24	1,73	1,45	1,45	1,45	1,73	1,45	1,73	1,00	2,00	1,45	2,00	1,45	2,73	1,45	1,45	2,45	1,45	2,18	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	0,00	1,45	2,18	1,45	2,73	1,73	1,73	1,73	2,00	1,45	1,73
	25	2,00	2,00	1,73	2,27	2,27	2,00	2,00	1,55	2,00	1,73	2,00	2,00	2,73	2,00	2,27	3,00	2,00	2,45	2,27	2,27	1,73	2,27	2,27	2,00	0,00	2,73	2,00	2,45	2,00	2,27	1,73	2,00	2,00	2,00
	26	1,09	0,82	0,82	1,09	0,82	0,82	0,82	0,55	0,55	0,82	0,82	1,09	0,82	0,82	1,09	0,55	1,09	0,55	1,09	0,55	0,82	0,55	1,09	0,82	0,82	0,00	0,55	1,09	0,82	1,82	0,82	0,55	0,55	0,82
	27	0,82	0,55	1,09	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,55	0,55	1,09	1,09	0,82	0,82	1,09	0,82	0,55	0,55	1,09	1,09	0,55	2,27	0,82	1,09	0,55	0,55	0,00	1,09	0,55	1,09	0,82	0,55	0,82	1,09
	28	1,09	1,09	0,82	1,09	0,82	0,82	1,09	0,55	0,55	0,82	0,55	0,55	0,82	0,82	1,09	1,09	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	1,09	0,82	0,82	0,82	0,82	1,09	0,00	1,09	2,00	1,09	0,82	1,09	1,09
	29	0,82	0,55	0,82	0,82	1,09	0,82	0,55	1,09	1,09	0,82	0,55	0,82	0,55	1,09	0,55	3,73	0,82	0,82	1,09	2,55	0,82	0,55	0,55	1,09	4,00	0,82	1,09	1,09	0,00	2,73	1,09	0,82	0,82	0,82
	30	0,55	0,55	1,09	0,55	1,09	0,82	0,82	0,82	0,82	1,09	0,82	0,82	0,82	1,09	1,09	1,09	0,82	0,55	0,82	0,82	0,55	0,82	0,82	0,82	1,09	3,45	3,45	4,00	0,82	0,00	1,09	0,82	0,82	1,09
	31	1,09	1,09	0,82	0,82	0,82	0,55	1,09	0,55	1,09	0,82	0,55	0,82	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	0,82	2,27	0,82	1,09	1,09	0,55	1,09	4,00	3,45	3,73	1,09	2,73	0,00	1,09	0,82	1,09
	32	0,55	3,45	0,00	0,55	0,55	0,00	0,55	0,00	3,18	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,27	0,00	0,00	0,27	0,27	0,00	0,27	0,55	0,27	2,18	2,91	0,55	0,00	0,55	0,27	0,55	0,27	0,00	0,55	0,00
	33	0,27	0,00	2,91	0,27	0,55	0,55	0,27	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,00	0,27	0,00	0,55	0,27	1,45	1,45	2,00	0,55	0,00	0,27	0,00	0,00	0,55
	34	1,45	2,00	1,73	1,73	1,73	1,45	1,45	0,73	1,45	1,73	1,45	1,45	2,73	2,00	2,00	2,73	1,45	2,18	1,73	1,73	1,45	2,00	1,45	0,00	1,73	2,45	1,73	2,18	2,00	1,45	1,45	2,00	2,00	0,00

EK 3- Normalize İlişki Matrisi (X)

		Etkilenen Kriterler																																
Etkileyen Kriterler	KD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
	1	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	2	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
	3	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
	4	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
	5	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,06	0,05	0,04	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,05	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01
	6	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
	7	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02
	8	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
	9	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
	10	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	12	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01
	13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00
	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
	15	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
	16	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00
	17	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	19	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	21	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,01
	24	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
	25	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,00	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
	26	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
	27	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
	28	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02
	29	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06	0,01	0,02	0,02	0,00	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01
	30	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,06	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,02
	31	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,06	0,05	0,05	0,02	0,04	0,00	0,02	0,01	0,02
	32	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
	33	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	34	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,00

EK 4- Toplam İlişki Matrisi (T)

KD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
1	0,002	0,002	0,010	0,005	0,005	0,001	0,002	0,001	0,009	0,006	0,005	0,002	0,010	0,010	0,002	0,003	0,002	0,002	0,006	0,002	0,001	0,006	0,002	0,002	0,012	0,004	0,007	0,003	0,005	0,006	0,012	0,006	0,002	0,002
2	0,016	0,005	0,037	0,015	0,012	0,008	0,011	0,011	0,008	0,023	0,008	0,016	0,011	0,012	0,012	0,016	0,012	0,009	0,016	0,013	0,015	0,017	0,012	0,016	0,009	0,013	0,011	0,016	0,012	0,010	0,016	0,012	0,008	0,011
3	0,008	0,016	0,005	0,008	0,016	0,011	0,008	0,007	0,016	0,033	0,011	0,012	0,011	0,012	0,008	0,019	0,012	0,013	0,009	0,013	0,011	0,012	0,012	0,016	0,013	0,013	0,015	0,016	0,012	0,014	0,012	0,012	0,012	0,008
4	0,033	0,003	0,007	0,002	0,003	0,006	0,010	0,002	0,003	0,007	0,002	0,003	0,006	0,034	0,010	0,043	0,007	0,011	0,012	0,003	0,010	0,007	0,010	0,010	0,004	0,007	0,006	0,006	0,010	0,012	0,024	0,007	0,003	0,002
5	0,020	0,025	0,029	0,024	0,013	0,023	0,027	0,021	0,027	0,028	0,022	0,026	0,065	0,025	0,021	0,076	0,066	0,054	0,027	0,050	0,021	0,022	0,023	0,028	0,067	0,074	0,070	0,068	0,027	0,059	0,029	0,027	0,025	0,019
6	0,023	0,020	0,017	0,014	0,018	0,007	0,022	0,013	0,018	0,019	0,022	0,015	0,029	0,019	0,033	0,021	0,040	0,017	0,023	0,024	0,017	0,024	0,022	0,019	0,021	0,028	0,022	0,031	0,022	0,026	0,030	0,019	0,023	0,022
7	0,041	0,039	0,040	0,032	0,033	0,040	0,012	0,033	0,033	0,034	0,036	0,034	0,054	0,038	0,038	0,056	0,035	0,050	0,036	0,036	0,035	0,039	0,040	0,037	0,041	0,058	0,044	0,057	0,033	0,047	0,035	0,041	0,038	0,036
8	0,037	0,039	0,036	0,033	0,037	0,032	0,032	0,009	0,036	0,034	0,040	0,042	0,061	0,034	0,034	0,060	0,035	0,054	0,043	0,043	0,031	0,036	0,040	0,034	0,037	0,063	0,052	0,061	0,037	0,040	0,039	0,041	0,034	0,036
9	0,041	0,039	0,040	0,036	0,033	0,032	0,039	0,027	0,012	0,042	0,040	0,038	0,058	0,038	0,038	0,056	0,038	0,054	0,036	0,035	0,031	0,039	0,033	0,037	0,041	0,058	0,048	0,057	0,033	0,047	0,035	0,033	0,038	0,036
10	0,002	0,007	0,023	0,002	0,006	0,006	0,006	0,006	0,010	0,003	0,006	0,004	0,009	0,003	0,006	0,045	0,003	0,010	0,012	0,007	0,006	0,003	0,002	0,003	0,007	0,010	0,009	0,005	0,010	0,007	0,007	0,006	0,007	0,002
11	0,002	0,006	0,003	0,001	0,001	0,002	0,009	0,005	0,001	0,002	0,002	0,002	0,024	0,002	0,022	0,003	0,006	0,006	0,002	0,002	0,005	0,006	0,009	0,005	0,002	0,005	0,008	0,005	0,005	0,010	0,006	0,001	0,005	0,002
12	0,006	0,010	0,003	0,010	0,010	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,006	0,002	0,005	0,002	0,010	0,004	0,010	0,003	0,002	0,006	0,005	0,031	0,006	0,010	0,003	0,004	0,007	0,012	0,010	0,003	0,002	0,006	0,023	0,010
13	0,012	0,004	0,009	0,008	0,004	0,011	0,008	0,011	0,004	0,012	0,004	0,035	0,006	0,012	0,005	0,006	0,012	0,012	0,009	0,009	0,004	0,006	0,004	0,008	0,008	0,053	0,052	0,039	0,004	0,007	0,029	0,004	0,012	0,005
14	0,002	0,003	0,005	0,005	0,002	0,001	0,005	0,001	0,010	0,005	0,001	0,002	0,010	0,002	0,002	0,002	0,009	0,010	0,009	0,005	0,001	0,002	0,005	0,006	0,003	0,011	0,003	0,003	0,001	0,002	0,002	0,033	0,002	0,005
15	0,010	0,041	0,047	0,006	0,006	0,034	0,006	0,012	0,006	0,036	0,037	0,016	0,035	0,014	0,008	0,041	0,011	0,025	0,012	0,012	0,009	0,012	0,010	0,011	0,015	0,044	0,043	0,041	0,014	0,034	0,032	0,006	0,007	0,010
16	0,006	0,009	0,006	0,013	0,012	0,008	0,008	0,004	0,011	0,009	0,004	0,034	0,045	0,013	0,009	0,007	0,009	0,005	0,044	0,013	0,004	0,007	0,005	0,013	0,014	0,042	0,045	0,041	0,012	0,015	0,014	0,004	0,026	0,005
17	0,005	0,013	0,013	0,013	0,012	0,008	0,009	0,012	0,012	0,005	0,004	0,007	0,057	0,009	0,005	0,042	0,006	0,041	0,007	0,005	0,008	0,010	0,008	0,009	0,013	0,046	0,044	0,049	0,005	0,007	0,006	0,008	0,009	0,008
18	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,002	0,002	0,009	0,002	0,006	0,006	0,002	0,007	0,009	0,010	0,003	0,010	0,002	0,002	0,002	0,001	0,009	0,002	0,012	0,006	0,024	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,006	0,002	0,002
19	0,010	0,003	0,007	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,007	0,007	0,003	0,007	0,003	0,007	0,002	0,011	0,010	0,003	0,023	0,043	0,038	0,004	0,002	0,004	0,003	0,006	0,002	0,003
20	0,006	0,002	0,002	0,005	0,009	0,005	0,005	0,001	0,001	0,005	0,001	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,010	0,002	0,005	0,006	0,006	0,001	0,002	0,038	0,006	0,007	0,002	0,003	0,002	0,001	0,005	0,005
21	0,001	0,019	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,009	0,003	0,005	0,001	0,009	0,001	0,001	0,010	0,009	0,001	0,020	0,001	0,001	0,005	0,010	0,006	0,006	0,001	0,005	0,001	0,001	0,001	0,005
22	0,002	0,002	0,007	0,002	0,006	0,002	0,002	0,006	0,002	0,003	0,002	0,004	0,053	0,002	0,010	0,004	0,006	0,007	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002	0,010	0,011	0,014	0,006	0,009	0,010	0,003	0,003	0,006	0,006	0,010
23	0,004	0,008	0,004	0,004	0,004	0,011	0,008	0,007	0,003	0,012	0,003	0,012	0,036	0,004	0,004	0,005	0,008	0,008	0,004	0,033	0,003	0,008	0,004	0,011	0,008	0,010	0,016	0,054	0,004	0,046	0,009	0,007	0,008	0,012
24	0,037	0,035	0,036	0,032	0,036	0,032	0,036	0,023	0,040	0,034	0,039	0,034	0,061	0,034	0,034	0,056	0,034	0,047	0,039	0,039	0,035	0,039	0,036	0,013	0,037	0,058	0,044	0,064	0,036	0,043	0,039	0,040	0,034	0,036

25	0,0 44	0,0 45	0,0 43	0,0 46	0,0 46	0,0 42	0,0 42	0,0 32	0,0 42	0,0 41	0,0 42	0,0 45	0,0 66	0,0 44	0,0 48	0,0 68	0,0 45	0,0 54	0,0 50	0,0 50	0,0 37	0,0 50	0,0 46	0,0 43	0,0 20	0,0 72	0,0 56	0,0 66	0,0 43	0,0 54	0,0 42	0,0 43	0,0 44	0,0 42
26	0,0 22	0,0 19	0,0 19	0,0 21	0,0 18	0,0 17	0,0 17	0,0 12	0,0 14	0,0 18	0,0 17	0,0 22	0,0 23	0,0 18	0,0 22	0,0 19	0,0 22	0,0 16	0,0 23	0,0 15	0,0 17	0,0 15	0,0 21	0,0 18	0,0 20	0,0 14	0,0 20	0,0 29	0,0 18	0,0 35	0,0 19	0,0 14	0,0 14	0,0 17
27	0,0 18	0,0 15	0,0 23	0,0 17	0,0 18	0,0 17	0,0 17	0,0 16	0,0 13	0,0 15	0,0 21	0,0 22	0,0 24	0,0 18	0,0 22	0,0 22	0,0 15	0,0 16	0,0 23	0,0 23	0,0 13	0,0 39	0,0 18	0,0 21	0,0 16	0,0 21	0,0 11	0,0 28	0,0 14	0,0 24	0,0 19	0,0 14	0,0 18	0,0 21
28	0,0 23	0,0 23	0,0 21	0,0 22	0,0 18	0,0 18	0,0 22	0,0 13	0,0 14	0,0 19	0,0 14	0,0 15	0,0 24	0,0 19	0,0 23	0,0 27	0,0 19	0,0 20	0,0 20	0,0 20	0,0 17	0,0 24	0,0 18	0,0 19	0,0 21	0,0 27	0,0 29	0,0 15	0,0 22	0,0 38	0,0 23	0,0 19	0,0 22	0,0 22
29	0,0 21	0,0 18	0,0 22	0,0 21	0,0 25	0,0 20	0,0 17	0,0 22	0,0 25	0,0 22	0,0 16	0,0 22	0,0 25	0,0 26	0,0 18	0,0 68	0,0 22	0,0 23	0,0 28	0,0 47	0,0 19	0,0 19	0,0 17	0,0 25	0,0 67	0,0 33	0,0 34	0,0 35	0,0 09	0,0 52	0,0 26	0,0 21	0,0 22	0,0 20
30	0,0 17	0,0 18	0,0 26	0,0 16	0,0 24	0,0 20	0,0 20	0,0 18	0,0 20	0,0 25	0,0 20	0,0 21	0,0 27	0,0 25	0,0 25	0,0 30	0,0 21	0,0 19	0,0 22	0,0 22	0,0 15	0,0 22	0,0 20	0,0 21	0,0 26	0,0 66	0,0 64	0,0 73	0,0 20	0,0 14	0,0 25	0,0 20	0,0 21	0,0 24
31	0,0 26	0,0 26	0,0 24	0,0 21	0,0 21	0,0 17	0,0 24	0,0 15	0,0 24	0,0 22	0,0 17	0,0 22	0,0 32	0,0 26	0,0 26	0,0 31	0,0 26	0,0 27	0,0 23	0,0 43	0,0 20	0,0 27	0,0 25	0,0 18	0,0 28	0,0 76	0,0 66	0,0 72	0,0 25	0,0 53	0,0 11	0,0 25	0,0 22	0,0 25
32	0,0 15	0,0 56	0,0 09	0,0 14	0,0 14	0,0 06	0,0 14	0,0 05	0,0 51	0,0 07	0,0 06	0,0 07	0,0 14	0,0 07	0,0 11	0,0 11	0,0 07	0,0 12	0,0 11	0,0 07	0,0 10	0,0 15	0,0 10	0,0 37	0,0 48	0,0 19	0,0 10	0,0 19	0,0 10	0,0 17	0,0 11	0,0 07	0,0 14	0,0 06
33	0,0 07	0,0 04	0,0 45	0,0 07	0,0 11	0,0 11	0,0 07	0,0 02	0,0 03	0,0 08	0,0 03	0,0 03	0,0 05	0,0 04	0,0 04	0,0 06	0,0 04	0,0 04	0,0 11	0,0 04	0,0 03	0,0 08	0,0 03	0,0 11	0,0 08	0,0 26	0,0 26	0,0 34	0,0 11	0,0 05	0,0 08	0,0 03	0,0 03	0,0 11
34	0,0 32	0,0 42	0,0 39	0,0 35	0,0 35	0,0 31	0,0 31	0,0 19	0,0 31	0,0 37	0,0 31	0,0 33	0,0 59	0,0 40	0,0 40	0,0 58	0,0 33	0,0 45	0,0 38	0,0 38	0,0 30	0,0 42	0,0 31	0,0 13	0,0 40	0,0 60	0,0 47	0,0 55	0,0 39	0,0 38	0,0 34	0,0 39	0,0 40	0,0 10

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2449-2463, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2449-2463, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Bina Enerji Performansı Değerlendirmesinde Simülasyon Programlarının Kullanımı: TRNSYS Uygulamaları

Enes KAVUN[1*], Ertaç HÜRDOĞAN[1,2]

[1]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Enerji Eğitim Etüt Uygulama ve Araştırma Merkezi, Osmaniye
[2]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0002-2969-0880
[2]https://orcid.org/0000-0003-1054-9964
*Sorumlu yazar: eneskavun@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 10.06.2025
Kabul tarihi:04.09.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Enerji verimliliği
Bina enerji performansı
Enerji simülasyonu
TRNSYS

ÖZ

İnşaat sektörü küresel enerji talebinin büyük bir kısmını oluşturmakta ve bu durum çevre kirliliği ile iklimi olumsuz etkileyen sera gazı salınımına neden olmaktadır. İnşaat sektörünün mevcut görünümü göz önüne alındığında bu durum tasarımcılar, şehir planlamacılar ve araştırmacılar için binaların enerji performansının iyileştirilmesinde ve yapıların çevresel sürdürülebilirliğinin artırılabilmesinde geniş bir inceleme alanı oluşturmaktadır. Binalarda mevcut enerji performansını değerlendirmek ve tasarım alternatiflerini karşılaştırmak için son yıllarda simülasyon programlarının kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bina enerji performansında simülasyon programlarının kullanılması, tasarımcılara model bir binanın ekonomik ömrü boyunca karşılaşacağı iklimsel dönemlere göre performans değerlendirmesine ve bu süreçte enerji optimizasyonuna imkân tanımaktadır. Bu çalışmada, bina enerji performansı değerlendirmesinde simülasyon programlarının kullanımı, mevcut çalışmalar çerçevesinde incelenmiş, tasarlanan örnek bir binanın TRNSYS programı ile simülasyon çalışmaları ele alınmış ve bina enerji performansı değerlendirmesinde simülasyon programlarının kullanımının önemi ortaya konmuştur. Örnek bir bina için gerçekleştirilen simülasyon sonucunda, yalıtımsız durumda yıllık enerji gereksiniminin 11.680 kWh olduğu; yalıtım uygulanmasıyla bu değerin 6.720 kWh'e düştüğü ve toplam enerji talebinde yaklaşık %42'lik bir azalma gerçekleştiği belirlenmiştir.

Use of Simulation Programs in Building Energy Performance Evaluation: The TRNSYS Applications

Research Article

Article History:
Received: 10.06.2025
Accepted: 04.09.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Energy efficiency
Building energy performance
Energy simulation
TRNSYS

ABSTRACT

The construction sector constitutes a significant portion of global energy demand, which results in greenhouse gas emissions that adversely affect environmental pollution and climate. Given the current state of the construction industry, this situation presents a broad area of investigation for designers, urban planners, and researchers in improving the energy performance of buildings and enhancing the environmental sustainability of structures. In recent years, the use of simulation programs has become prominent in evaluating the existing energy performance of buildings and comparing design alternatives. The application of simulation programs in building energy performance enables designers to assess performance based on climatic periods encountered throughout a building's economic lifespan and facilitates energy optimization during this process. This study examines the use of simulation programs in building energy performance evaluation within

the context of existing research, presents simulation studies of a model building designed using the TRNSYS program, and underscores the significance of using simulation programs in evaluating building energy performance. As a result of the simulation conducted for a sample building, it was determined that the annual energy demand was 11,680 kWh under uninsulated conditions, while the application of insulation reduced this value to 6,720 kWh, corresponding to an approximate 42% reduction in total energy demand.

To Cite: Kavun E., Hürdoğan E. Bina Enerji Performansı Değerlendirmesinde Simülasyon Programlarının Kullanımı: TRNSYS Uygulamaları. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2449-2463.

1. Giriş

Dünyada nüfusun hızlı artışı, kentleşme ve sanayileşme ile enerji talebini, dolayısıyla özellikle fosil yakıtların (petrol, doğal gaz, kömür, fuel oil vb.) kullanımını arttırmış bu da karbon ve diğer sera gazı emisyonlarının artmasına neden olmuştur. Fosil kaynaklar gelecekte tükeneceği için hem dünyada hem de ülkemizde yasal düzenlemelerle enerjinin verimli kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Binalarda tüketilen enerjinin (bina enerjisi), ülkelerin enerji tüketiminde büyük orana sahip olduğu düşünüldüğünde, yapılan çalışmalar özellikle binalarda, enerjiyi verimli kullanarak belirli düzeylerde ekonomik faydalar sağlanabileceğini ve enerji tüketiminin azaltılmasıyla zararlı çevresel faktörlerin etkisinin düşebileceğini göstermektedir (Ozalp ve ark., 2019). Bina kaynaklı enerji tüketimleri, karbon emisyonlarının önemli bir parçası olarak görülmektedir. Binalar, gelişmiş ülkelerde toplumun toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ına karşılık gelmektedir. Binaların tasarım aşaması bina enerji tüketimini azaltmak için çok önemlidir. Bina performans analizleri, enerji, maliyet ve termal konfor vb. dahil olmak üzere çeşitli kriterleri göz önünde bulundurarak en iyi tasarım çözümünü bulmayı amaçlamaktadır. Son yirmi yılda simülasyon tabanlı bina performans tasarımı, özellikle yüksek performanslı binaları tasarlamak için önemli bir yöntem haline gelmiştir (Al-Shargabi ve ark., 2022). Bir binanın erken tasarım ve yapım öncesi aşamaları, sürdürülebilirlik özellikleri hakkında karar vermek için en kritik dönemdir. Geleneksel bilgisayar destekli tasarım planlama programları, genellikle tasarım geliştirmenin ilk aşamalarında sürdürülebilirlik analizlerini gerçekleştirme noktasında yetersiz kalabilmektedir. Bina enerji performans analizleri genelde mimari tasarım ve inşaat dokümanları oluşturulduktan sonra yapılmaktadır (Azhar ve ark., 2011). Bina tasarımının erken aşamalarında farklı tasarım parametrelerinin ve tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesinde BLAST, BSim, DeST, DOE-2.1E, ECOTECT, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, Energy Plus, eQUEST, ESP-r, IDAICE, IES/VES, HAP, HEED, Power Domus, SUNREL, Tas, TRACE ve TRNSYS gibi farklı simülasyon programları kullanılabilmektedir (Renuka ve ark., 2022). Literatürde bina enerji performansının farklı programlar kullanılarak tahmin edildiği birçok çalışma yer almaktadır. Yang ve ark., (2014); Anhui Eyaleti, Ma'anshan Şehrindeki bir konut alanını ECOTECT yazılımı kullanarak ele almışlardır. Yazarlar çalışmada yerleşim yeri planlaması perspektifinden plan tasarım aşamasında bazı faydalı keşifler yapmışlar ayrıca meteorolojik verileri ve enerji koruma stratejilerini analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda yazarlar, konut planlamasının optimizasyonunu gerçekleştirmek için bina yöneliminin,

binadaki güneş radyasyon analizinin, güneş yörünge analizinin ve güneş ışığı süresinin ECOTECT yazılımı ile görsel ve net olarak yansıtılabileceğini öne sürmüşlerdir. Shabunko ve ark., (2018); Brunei Sultanlığındaki üç farklı binanın enerji performansını karşılaştırmak için EnergyPlus simülasyon aracını kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, binaların incelenmesinde elektrik faturalarının analiz edilmesinden toplanan verilere dayanarak, Mentiri, Panaga ve Meragang binalarında üç farklı model geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yazarlar, elektrik tüketiminin Ramazan Bayramı gibi özel günlerde, çalışma saatlerinin kısalmasından kaynaklı, klima ve cihazlarının daha fazla kullanılmasına yol açan yüksek düzeyde sosyal aktivitelerden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Kenai ve ark., (2021); Fransa'nın Lille kentinde bulunan tipik bir tuğla evde, TRNSYS kapsamında yeşil duvarların binaların enerji dengesi üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Yapılan çalışmada, evin güney ve batı taraflarına yerleştirilen yeşil duvarların gizlenmesinin analizine odaklanmışlardır. Çalışma sonucunda yazarlar, TRNSYS ortamında geliştirilen bir modelin entegrasyonu, yalıtılmamış veya yeterli kalınlıkta yalıtılmış tuğlalarda mevcut binalarda basit yeşil duvar kullanımının termal etkisini değerlendirmeyi mümkün kıldığını gözlemlemişlerdir. Muhammed ve ark., (2022); Hindistan'da galvanizli demir saç levha ile kaplanmış çatıya sahip bir laboratuvarda enerji verimliliği ve insan konforunun simülasyonu için eQuest yazılımı kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, binanın enerji tüketiminde yapı malzemesinin ısıl geçirgenliği (U değeri), pencereler, ısı yalıtımı, pencere/duvar oranı ve aydınlatma sistemi gibi ana faktörlerin simülasyon programı ile enerji tüketimini araştırmışlardır. Yazarlar dört farklı durum için yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda, Hindistan'da ceviz özlü yalıtım levhasının konforu düşük maliyetle sağladığını tespit etmişlerdir. Gao ve ark., (2022); Urumçi kentinde bulunan üniversitenin, eğitim binasının yapısına dayalı olarak, enerji tüketimi ve karbon emisyonlarındaki değişimleri, farklı uygulamalarda araştırmak için DesignBuilder yazılımı kullanmışlardır. İnceleme sonucunda yazarlar, eğitim binasının iç mekân ısıl konforunun sağlanması şartıyla, elektrikle ısıtmaya uygun olup, en yüksek iç konfor seviyesine sahip ısıtma sisteminin, yerden ısı radyasyonlu ısıtma sistemi olduğunu sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada, binaların enerji performans analizinde kullanılan yöntemleri ve teknolojik gelişmeleri de ortaya koyarak mevcut ve yeni binalarda enerji performans iyileştirmesine yönelik kullanılan enerji simülasyon programları değerlendirilmiş ve TRNSYS programı özelinde bina enerji simülasyonlarına odaklanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle binalarda enerji performans analizi, simülasyon programları ve TRNSYS simülasyon programı detaylı bir şekilde incelenmiş ve daha sonra çalışmanın ana konusu olan örnek bir binanın TRNSYS ile analizinin gerçekleştirilmesiyle ilgili aşamalara yer verilmiştir. Çalışmanın, bina enerji simülasyon programlarının özellikle erken tasarım aşamalarında kullanımı konusunda, araştırmacı ve tasarımcılara referans oluşturması hedeflenmektedir.

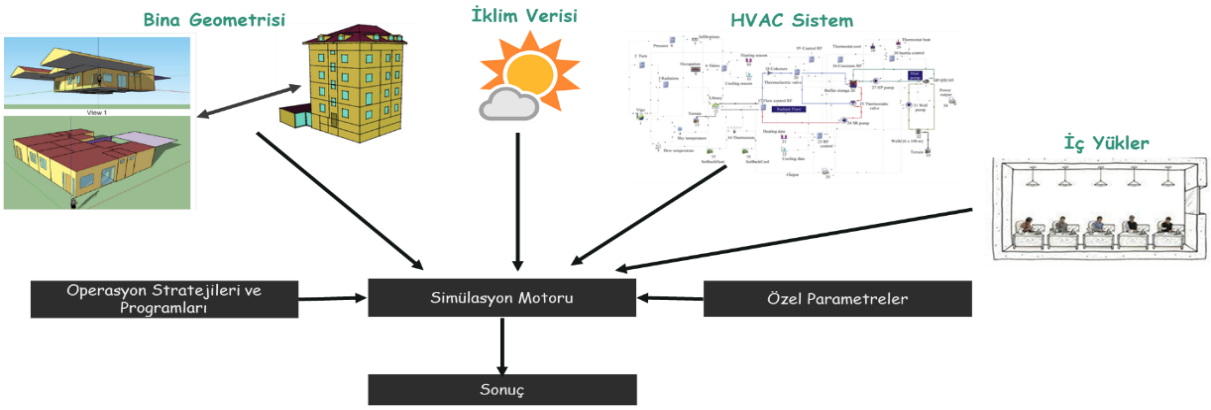
2. Binalarda Enerji Performans Analizi

Binalarda enerji performans analizi, kullanıcının gereksinimlerini belirli bir binanın özellikleriyle karşılaştırmaya olanak tanıyan, bir başka ifade ile bir binanın işlevlerini ne kadar iyi yerine getirdiğini ölçmeye imkân tanıyan bir kavram olarak değerlendirilebilmektedir (de Wilde, 2019). Bir bina hangi amaçla inşa edilecekse, o amaca yönelik gereksinimi karşılamalıdır. Bu nedenle binanın tasarım süreci çok önemlidir ve binanın kullanım sürecindeki performansını belirleyecek kriterler de bu aşamada belirlenmektedir. Yüksek performanslı bir bina tasarlayabilmek için, binanın kullanıcının gereksinimlerini tam anlamıyla karşılaması önemlidir (Harputlugil, 2011). Ülkemizde 2008 yılında yürürlüğe giren "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği", dış iklim koşulları, iç ortam gereksinimleri, yerel özellikler ve maliyet etkinliği gibi faktörleri göz önünde bulundurarak, binalarda enerji kullanımına ilişkin hesaplama esaslarını tanımlamaktadır. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, binaların birincil enerji tüketimi ve karbondioksit (CO_2) emisyonları açısından sınıflandırılmasını, yeni binalar ile kapsamlı tadilat gerektiren mevcut yapılarda enerji performans koşullarının belirlenmesini amaçlamaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi, ısıtma ve soğutma sistemlerinin denetimi, sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması ve bina enerji performansına ilişkin kriterlerin belirlenmesiyle çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamayı hedeflemektedir. Yönetmelik ayrıca konutlar, eğitim binaları, ofisler, iş, hizmet binaları, sağlık binaları, otel, motel vb., mevcut ve yeni binaların enerji performansını değerlendirmek için kullanılabilmektedir. Bir binanın enerji performansının belirlenmesi için temel kriterler; değerlendirilen binanın m^2 başına düşen yıllık enerji tüketimi, yıllık enerji tüketimine karşılık gelen CO_2 salımı miktarı, elde edilen verilerin referans (eş değer) bir bina ile kıyaslanması sonucunda binanın enerji sınıfının belirlenmesidir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2020).

3. Simülasyon Programları

Bina enerji performansının modellenmesi ve simüle edilmesi için araçların geliştirilmesi, teknolojik ilerlemenin, çevrede sürdürülebilirlik ve koruma ihtiyacının bir sonucu olarak açığa çıkmıştır. Bina simülasyon programlarının gelişimi, basit enerji tüketimi hesaplamalarına kıyasla bina bileşenleri ve sistemlerinin karmaşık etkileşimini simüle etmeyi mümkün kılmaktadır. Bilgisayar simülasyonu, alternatif tasarımları karşılaştırmak ve faktörlerin optimal kombinasyonunu elde etmek için güçlü bir araçtır. Bilgisayar simülasyonları ile optimize edilmiş ve ayarlanmış binalar, maliyetten tasarruf sağlamanın yanı sıra bina sakinlerinin konforunu arttırmaktadır (Nimlyat ve ark., 2014). Doğru seçilen bir simülasyon programı, bina enerji performansının ve çevresel etkinin güvenilir bir şekilde tahmin edilmesini sağlamaktadır. Binalarda enerji kullanımının tanımlanması, tahmini ve kontrolü için temel fiziksel olayları incelemek için gelişmiş modeller ve araçlar gereklidir. Bina enerji performansını tutarlı bir şekilde simüle etmeyi sağlayan güvenilir bir bina modelinin üretilmesi, iklim koşulları, opak ve şeffaf bina kabuğu, kurulu enerji sistemleri, elektrik tüketen ekipman ile ilgili veriler gibi çok sayıda girdi

gerektirmektedir. Ayrıca çalışma programları, termal yükleri ve kazanımları etkileyebilecek çevredeki ortam hakkında bilgiler vermektedir (Pisello ve ark., 2012). Bina simülasyonlarında temel girdi parametreleri; bina geometrisi, iç yükler, HVAC sistemleri ve bileşenleri, iklim verileri ve işletme stratejisidir (Şekil 1). Temelde her enerji simülasyonu termodinamik denklemlere, ilkelere ve varsayımlara dayanır. Fakat simülasyonda belirli varsayımlar karşılanmazsa veya gerçek hayatta eşleştirilmezse sonuçlar yanlış olabilir. Simülasyon programları, hesaplama, modelleme ve ihtiyaç duyulan kullanım alanları gibi ana parametreleri ele alarak sonuç ortaya koymaktadır (Maile ve ark., 2007).



Şekil 1. Simülasyon programlarının genel veri akışı (Maile ve ark., 2007)

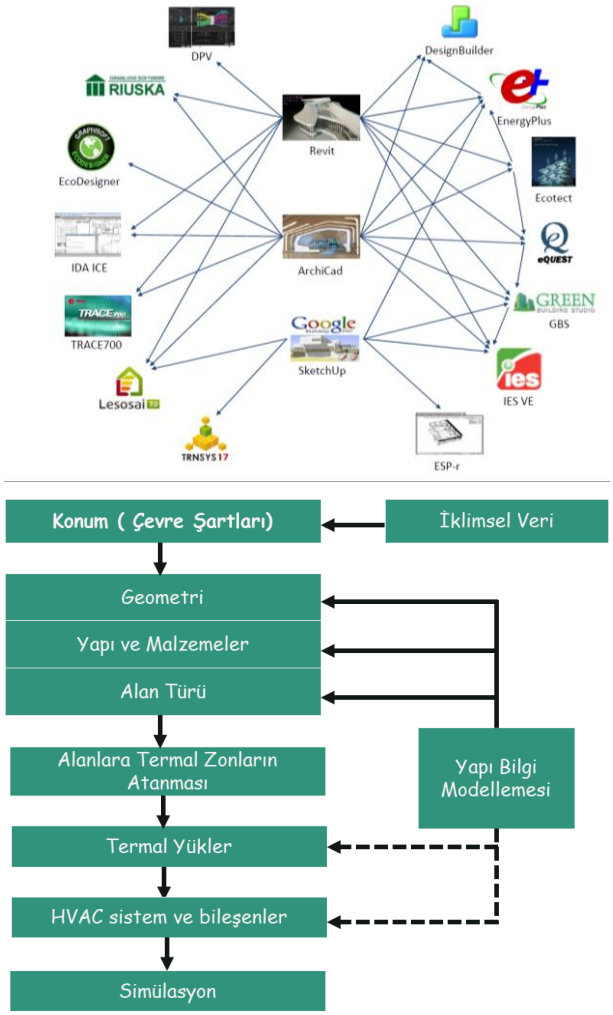
Tablo 1'de literatürde bina enerji performansının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan farklı simülasyon programlarının genel özellikleri verilmiştir. Tabloya bakıldığında özellikle termal analizlerin çoğunun simülasyon programı ile gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Kullanıcının talep ve isteklerine göre program seçimi yapılabilmektedir. Şekil 2'de enerji simülasyonlarında kullanılan yardımcı yazılımlar ile programların girdi parametreleri sunulmaktadır. Şekil 2-a'da, simülasyon programlarının yardımcı yazılımlarla olan bağlantıları gösterilmekte olup, ok işaretleri programlar arasındaki veri akışını ifade etmektedir. Şekil 2-b'de ise TRNSYS, EnergyPlus ve DesignBuilder gibi yaygın kullanılan simülasyon programlarına ait girdi parametreleri yer almaktadır (Nugraha ve ark., 2013).

Literatürde yer alan çalışmaların incelenmesinden farklı programlar ile bina enerji simülasyonlarının gerçekleştirilebileceği görülmüştür. Fakat TRNSYS programının modüler yapısı sayesinde farklı bileşenlerin (örneğin, ısı pompası, güneş kolektörü, PV sistemleri ve HVAC ekipmanları vb.) aynı platformda entegre edilerek analiz edilebilmesi, yazılımı öne çıkaran en önemli özelliklerden biridir. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde TRNSYS programı özelinde bina enerji simülasyonlarına odaklanılmış ve TRNSYS programı ile örnek bir bina enerji simülasyonlarının çalışması yapılmıştır. TRNSYS; modüler bir yapıya sahip bileşen yaklaşımına dayalı olarak Wisconsin Üniversitesi'nde geliştirilen ticari bir geçici sistem simülasyon programıdır. TRNSYS kütüphanesi, HVAC sistemleri, yenilenebilir enerji sistemleri vb. için ayrıntılı birçok bölgeli bina modeli ve bileşenleri içerir (Magni ve

ark., 2021). Literatürde TRNSYS programı ile binalarda enerji simülasyonların gerçekleştirildiği farklı birçok çalışma yer almaktadır.

Tablo 1. Simülasyon programlarının özellikleri (Nugraha ve ark., 2013)

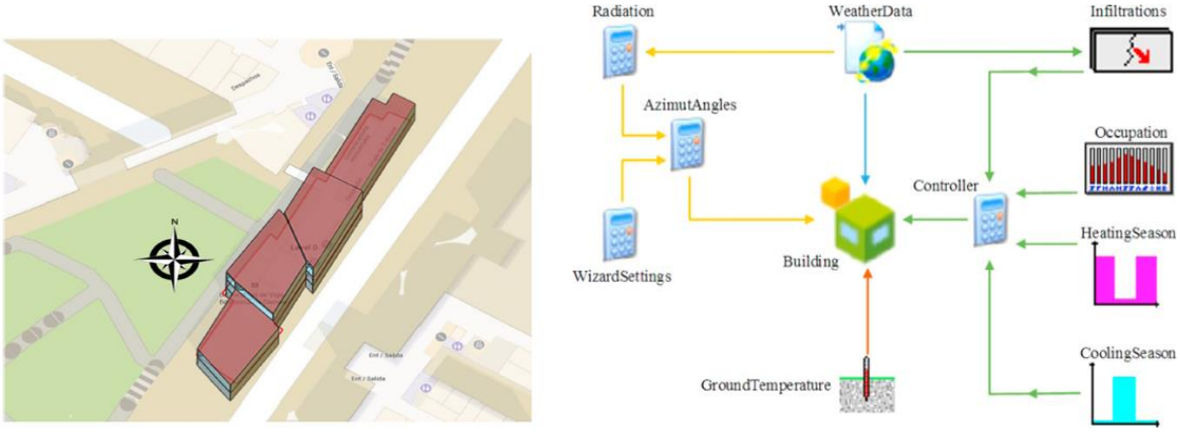
Program	Özellikler (Yapılabilecek analizler)
ESP-r	Çevresel tasarım, 3D tasarım, termal tasarım ve analiz, ısıtma ve soğutma yükleri, güneş kontrolü, aydınlatma, doğal havalandırma, kombine ısı ve elektrik üretimi ve fotovoltaik cepheler, akustik analiz, yaşam döngüsü ve çevresel etki değerlendirmeleri.
eQUEST	Enerji performansı, simülasyon, enerji kullanım analizi, kavramsal tasarım performans analizi, 3D model (3B tasarım), termal tasarım ve analiz, ısıtma ve soğutma yükleri, güneş kontrolü, gölgeleme, aydınlatma sistemleri, yaşam döngüsü maliyetlendirme, programlama.
Ecotect	Çevresel tasarım, 3D Model (3B Tasarım), termal tasarım ve analiz, ısıtma ve soğutma yükleri, validasyon; güneş kontrolü, gölgeleme, hâkim rüzgarlar ve hava akışı, doğal ve yapay aydınlatma, yaşam döngüsü değerlendirmesi, zamanlama, geometrik ve istatistiksel akustik analiz.
DesignBuilder	Çevresel tasarım, 3D Model (3B Tasarım), termal tasarım ve analiz, ısıtma ve soğutma yükleri, doğal ve yapay aydınlatma, iç hava, ortalama radyasyon ve çalışma sıcaklıkları, nem, CO_2 emisyonları, güneş kırıcı, ısı iletimi, zamanlama.
EnergyPlus	Enerji simülasyonu, ısıl tasarım ve analiz, ısıtma ve soğutma yükleri, validasyon; güneş kontrolü, gölgeleme, doğal ve yapay aydınlatma, yaşam döngüsü değerlendirmesi, yaşam döngüsü maliyeti, planlama.
TRACE 700	Çevresel tasarım, 3D Model (3B Tasarım), termal tasarım ve analiz, ısıtma ve soğutma, yaşam döngüsü maliyeti, tesis sistemi.
DPV (Design Performance Viewer)	Çevresel tasarım, termal tasarım ve analiz, ısıtma ve soğutma yükleri, enerji maliyeti, ekserji/CO_2, yaşam döngüsü değerlendirmesi, çizelgeleme.
TRNSYS	Çevresel tasarım, 3D Model (3B Tasarım), termal tasarım ve analiz, ısıtma ve soğutma yükleri, güneş kontrolü, gölgeleme, hâkim rüzgarlar ve hava akışı, elektrik, fotovoltaik, hidrojen sistemleri, yaşam döngüsü maliyeti.



(a) (b)

Şekil 2. Enerji simülasyonlarında yardımcı yazılımlar ve programların girdi parametresi değişimleri

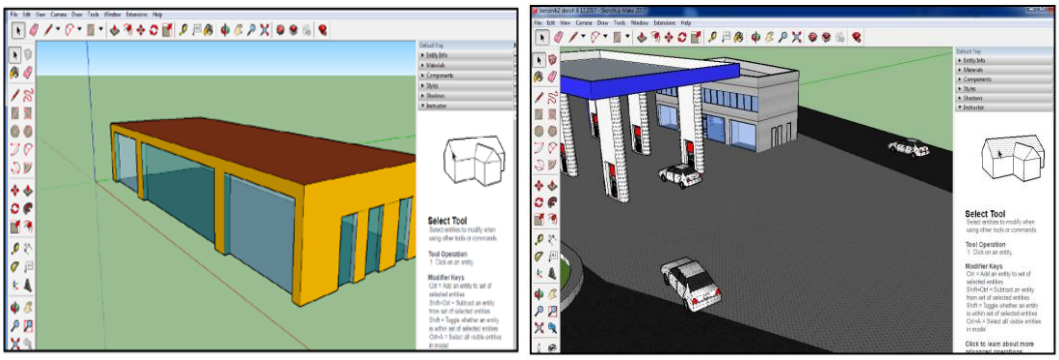
Valdiserri ve ark., (2015); İtalya'da iki farklı iklim bölgesinde yer alan, Bologna ve Roma şehirlerinde referans bina ile iki farklı iklim bölgesinde termal performansın belirlenmesini amaçlamışlardır. Yapılan çalışmada gelişmiş bir termal dış cephe tasarımı ve yüksek verimli pencereler aracılığıyla mevcut bir bina için ısıtma talebini azaltmaya yönelik entegre bir pasif tasarım yaklaşımını ele almışlar ve sayısal optimizasyonu, TRNSYS simülasyon aracı ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda yazarlar binaları güçlendirmek için, yatırım maliyeti ve geri ödeme sürelerinin, bina yerinin iklim bölgesinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Eguía, ve ark., (2016); Vigo Üniversitesi'ndeki bir kütüphane binasındaki ısıtma ve soğutma taleplerinin yanı sıra oluşturulan farklı hava şartları ile elde edilen ısıtma ve soğutma taleplerindeki hataları hesaplamış ve karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada, bina geometrisi üç boyutlu modelleme amacıyla kullanılan Trimble SketchUp yazılımı ile tanımlanmış (Şekil 3-a) ayrıca bina termal modeli, bilinen bina kabuğu özelliklerine dayalı olarak TRNSYS yazılımı kullanarak oluşturulmuştur (Şekil 3-b). Çalışma sonucunda yazarlar, gerçekleştirilen incelemelerin diğer bina ve tesislere genellemek için daha fazla enterpolasyon yöntemi ve daha fazla sayıda simülasyon kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır.



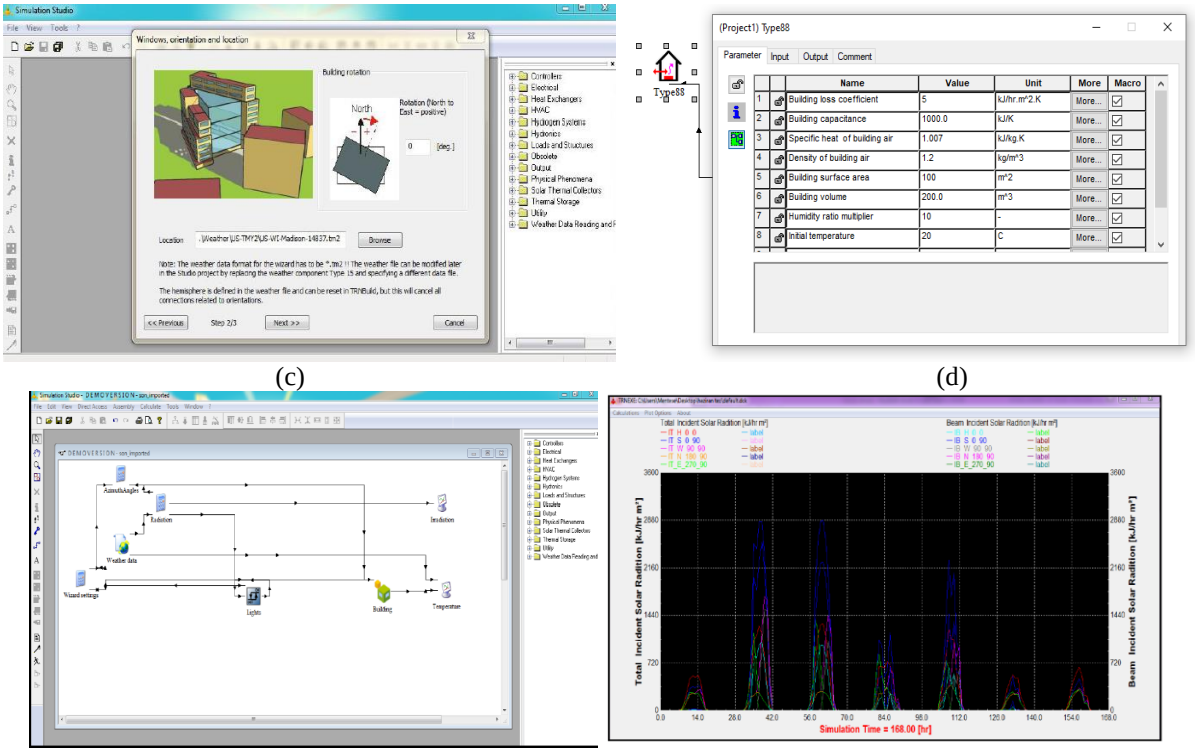
(a) (b)

Şekil 3. Binanın sketchup modeli ve TRNSYS 'ten simülasyon stüdyosu paneli (Eguía, ve ark., 2016)

Cao ve ark., (2017); tipik bir dikdörtgen kat planına sahip örnek bir binanın Çin'in Dalian bölgesi şartlarına göre ısıtma/soğutma yükünü hesaplamak için birleşik bir TRNSYS yöntemi geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada hesaplama yönteminde önemli bir parametre olan atmosferik sıcaklık ve rüzgâr hızının dikey değişiminin yüksek bir binanın ısıtma/soğutma yükü üzerinde büyük etkisi olduğu açığa çıkartılmıştır. Çalışma sonucunda yazarlar, TRNSYS yöntemi gibi birleşik ölçekler arası yöntemin yüksek bir binanın ısıtma/soğutma yüklerinin tahmini için kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir. Duman ve ark., (2017); Elazığ'da şehir merkezinden uzakta bulunan ve bu nedenle doğalgaz temini bulunmayan bir akaryakıt istasyonu binasının çizimini Google SketchUp kullanarak (Şekil 4-a) gerçekleştirmiş ve sonrasında TRNSYS programına aktarmışlardır (Şekil 4-b, 4-c). Çalışmada bina bileşenlerinin parametreleri girilerek yıllık ihtiyaç duyulan ısıtma ve soğutma enerjisi hesaplanmıştır (Şekil 4-d, 4-e). Yazarlar ayrıca binanın 7/24 yıllık enerji talebinin ayrıntılı bir görsel verilerini de çalışmalarında sunmuşlardır (Şekil 4-f). Araştırmaları sonucunda yazarlar, binaların ısıtma-soğutma ihtiyaçlarının hesaplanmasının yanı sıra, yeşil bina tasarımları için çeşitli kaynaklar ile ısıtma, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının hesapları yapılarak, termal performansı, sistemin analizi ve boyutlandırılması, hava akış analizi, güneş ve güç modellemesi, kontrol sistemleri gibi modellemeleri TRNSYS ile yapılabildiğini belirtmişlerdir.



(a) (b)



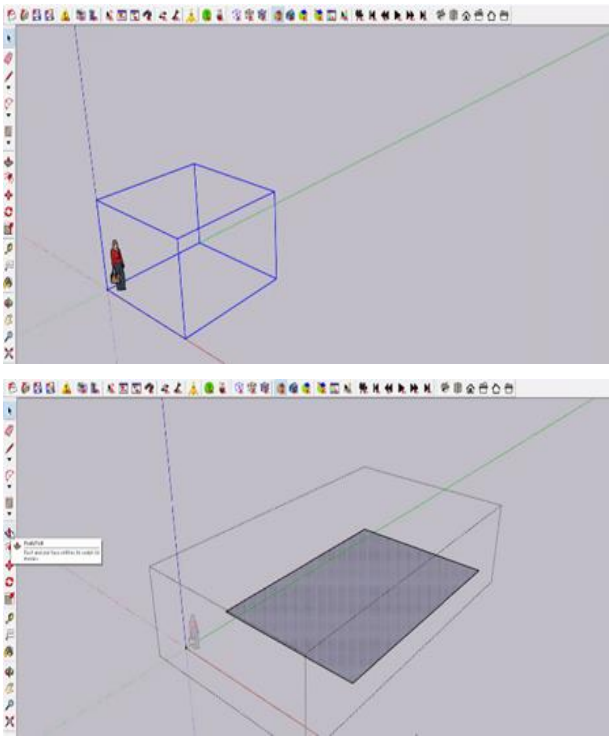
Şekil 4. TRNSYS Simülasyon programı ile binanın modellenmesi (Duman ve ark., 2017)

Yu ve ark., (2017); TRNSYS yazılımı ile bir üniversite binasında merkezi iklimlendirme sisteminin kontrol yöntemini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada yazarlar, eğitim binasında merkezi iklimlendirmenin genel kontrol yönteminin ilkelerini ve kusurlarını analiz etmişler ve sınıf sayısına dayalı yeni bir tip klima kontrol şeması önermişlerdir. Çalışmada TRNSYS yazılımı, iki tür kontrol şemasının iklimlendirme sistemini simüle etmek için kullanılmıştır. Sonuç olarak yazarlar yeni kontrol şemasının, ilk kontrol şemasından daha iyi olduğu ve yeni şemanın enerji tüketiminin, eski şemadan daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.

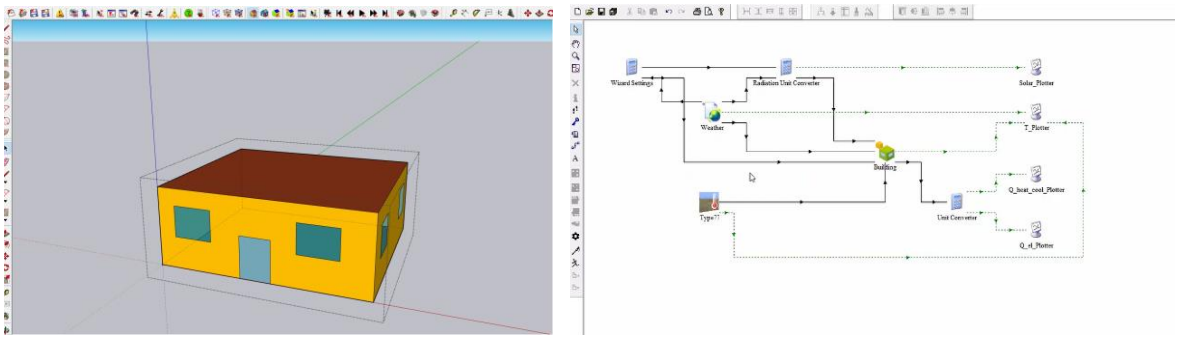
4. TRNSYS Bina Simülasyon Adımları ve Örnek Bina analizi

Çalışmanın bu bölümünde, Osmaniye ilinde bulunan tek katlı bir konut TRNSYS simülasyon programı kullanılarak modellenmiş ve simülasyon adımları incelenmiştir. Örnek modelde konutun taban alanı 200 m², tavan yüksekliği 3 m olup, her biri 1,5 m x 2 m boyutlarında çift cam özellikli 10 pencere yer almaktadır. Öncelikle SketchUp programı kullanarak örnek bir binanın modellemesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5-a). Programda ilk adım, bina zemininin tanımlanmasıdır (Şekil 5-b). Binanın katı modellemesi için ise zemin üzerinde konutun bilgileri ve kat yükseklikleri girilmiştir (Şekil 5-c). Hazırlanan bina modeli için TRNSYS kütüphanesinden iklim verileri, ışınım verileri çekilerek programa aktarılmış ve bina parametreleri oluşturulmuştur (Şekil 5-d). Bina modellemesinde verilerin doğruluğu için binanın iklim verilerinin bina parametreleri ile eşleştirilmesi kontrol edilmiştir (Şekil 5-e). Parametrelerin eşleştirilmesinden sonra binaya ait yapı malzeme bilgileri tanımlanmış ve binanın duvar kalınlığı ile ısıl

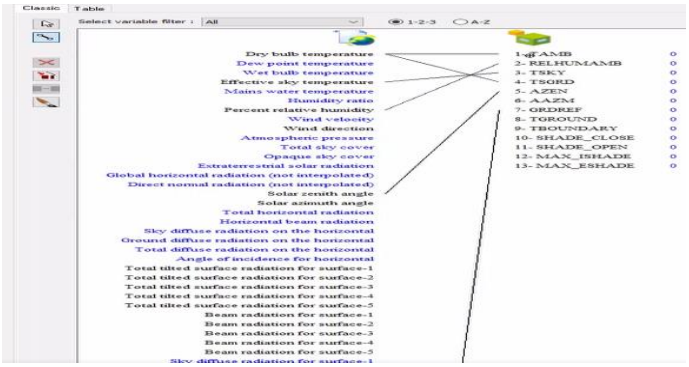
geçirgenlik katsayısı (U– W/m^{2}K) gibi yapı özellikleri TRNSYS programına işlenmiştir (Şekil 5-f). Girilen parametrelerin kontrolünü sağlamak için bina cepheleri, duvar özellikleri, kat özellikleri ve pencere özelliklerinin kontrolü sağlanmıştır (Şekil 5-g).



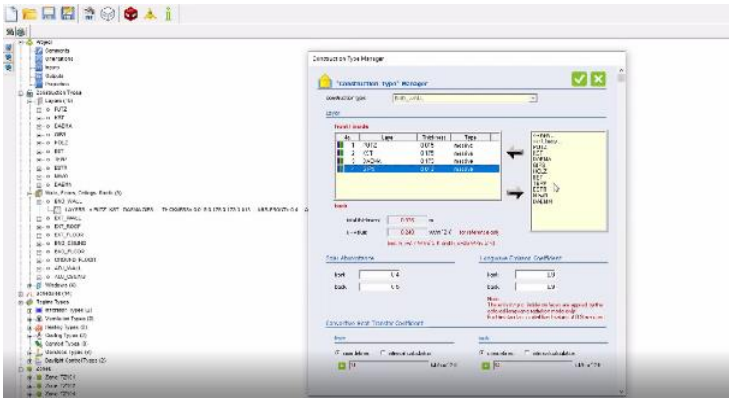
(a) (b)



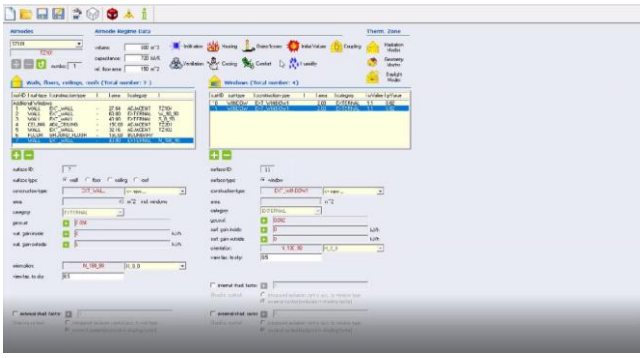
(c) (d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 5. Örnek konuta ait simülasyon basamakları

Daha sonra modellenen konuta birinci gün bölgesi için ideal duvar yalıtım kalınlığı olan 3 cm kalınlığında XPS malzemesi, tavan ve tabana ise 10 cm kalınlığında taş yünü yalıtımı uygulanmıştır. Tablo 2 ve tablo 3'te ısı yalıtım malzemelerinin program için gerekli termal özellikleri verilmiştir. Modellenen konutun enerji performansı TRNSYS simülasyon yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, bina kabuğunun ısı kayıplarına etkisi, iç ortam sıcaklık değişimleri ve yıllık enerji tüketimi gibi temel performans kriterleri değerlendirilmiştir.

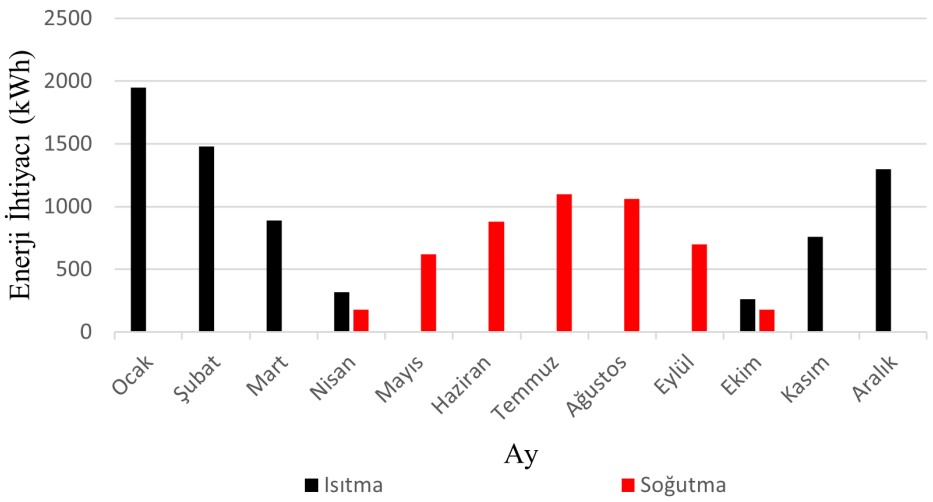
Tablo 2. Bina yapı malzemelerinin teknik özellikleri

Yapı Malzemesi	Kalınlık (m)	K(W/mK)	R(m^2K/W)
İç sıva	0,02	0,87	0,0230
Dış sıva	0,02	0,87	0,0230
Tuğla	0,13	0,45	0,280

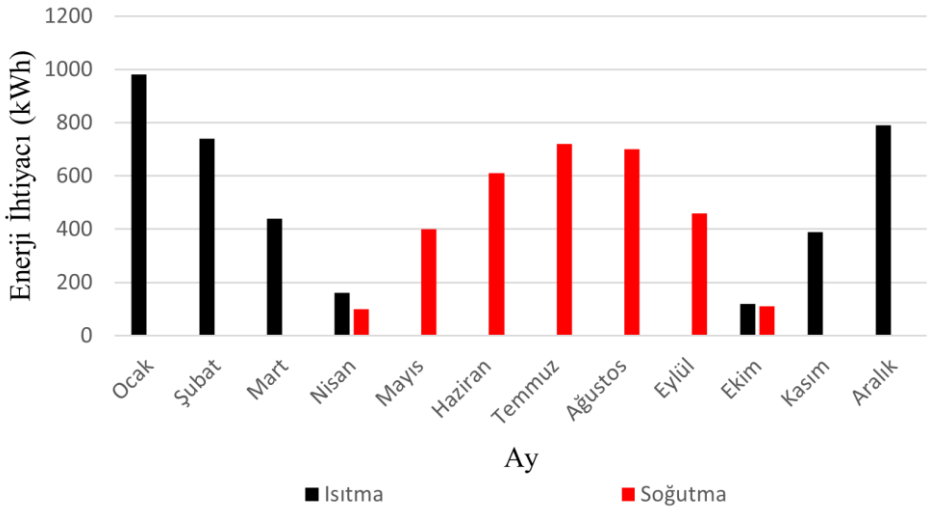
Tablo 3. Isı yalıtım malzemelerinin teknik özellikleri

Isı Yalıtım Malzemesi	K(W/mK)
Taş yünü	0,040
XPS	0,031

Yapılan analizde iç ortam kış aylarında 20 ºC sıcaklıkta ve yaz aylarında ise 24 ºC sıcaklıkta sabit tutulması hedeflenmiştir. Sıcaklık değerleri, TS 825 'Binalarda Isı Yalıtım Kuralları' standardı iç ortam konfor koşullarına dayanmaktadır. Ayrıca, bir malzemenin ısı yalıtım malzemesi olarak kabul edilebilmesi, düşük ısı iletkenlik katsayısına (λ) sahip olması ve ısı kayıplarını azaltmasıyla ilişkilidir. Sıva tabakaları, ısı iletkenlik değerleri yüksek olduğundan, TS 825 kapsamında yalıtım malzemesi olarak değerlendirilmemektedir. Bu nedenle çalışmada, ısı yalıtım malzemesi olarak XPS ve taş yünü kullanılmıştır (TSE, 2008). Yalıtım uygulanmadan önce konutun yıllık toplam enerji ihtiyacı 11.680 kWh olarak belirlenmiş ve Şekil 6'da aylık enerji ihtiyacı verilmiştir. Yalıtım uygulandıktan sonra ise konutun yıllık enerji ihtiyacı 6720 kWh olduğu belirlenmiş ve Şekil 7'de aylık enerji ihtiyacı verilmiştir. Dolayısıyla mevcut konuta yalıtım uygulanması durumunda enerji ihtiyacı %42 oranında azaldığı görülmüştür. Yapının ısıtma ve soğutma yükleri incelendiğinde, en yüksek enerji ihtiyacının kış aylarında olduğu belirlenmiştir. Yaz aylarında ise soğutma ihtiyacının arttığı tespit edilmiştir. Dış ortam ile iç ortamı birbirinden ayıran duvar, çatı, zemin ve pencerelerden oluşan bina kabuğunun ısı geçirgenlik katsayısı (U değeri) dikkate alınarak, duvarlar ve pencerelerin termal performansının enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Örnek yalıtımsız konuta ait aylık enerji ihtiyacı



Şekil 7. Örnek yalıtımlı konuta ait aylık enerji ihtiyacı

Analiz sonuçları, yalıtım malzemelerinin enerji performansı üzerindeki etkisini göstermesinin yanı sıra, bölgesel iklim verilerinin enerji analizlerinde dikkate alınmasının önemini de ortaya koymaktadır. Ayrıca, TRNSYS tabanlı modellemede bina kabuğu bileşenlerinin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi, çalışmayı literatürdeki benzer araştırmalardan ayırmakta ve uygulamaya yönelik karar süreçlerine katkı sunmaktadır.

5. Sonuç

Bina performanslarının analizinde, program ara yüzü ve analiz özelliklerine göre farklı birçok simülasyon programları (yazılımlar) kullanılmaktadır. Bina enerji modellemelerinde programların güvenilirliği ve analiz sonuçlarının doğruluğu, tasarım yönüne rehberlik etmesi ve karar vermeyi desteklemesinden dolayı önemli bir yer tutmaktadır. Enerji simülasyon araçları, belirli bir binanın enerji performansını ve bina sakinleri için termal konforu tahmininin yanı sıra farklı proseslerde performans değerlendirmeleri için de kullanılabilmektedir. Bina özelinde inceleme yapılan simülasyon programları belirli bir binanın belirli kriterlere göre nasıl çalıştığının anlaşılmasını destekler ve farklı tasarım alternatiflerinin karşılaştırılmasını sağlar. Bir simülasyon sonucu, ancak simülasyon için giriş verileri kadar doğru olabilir. Bu noktada simülasyon programlarında veri girişinde hassasiyet gösterilmelidir. Ayrıca, bu çalışmadaki gibi simülasyon süreci tamamlandıktan sonra, simüle edilen binaya program üzerinden ihtiyaca göre yalıtım ve çift cam uygulamaları eklenerek enerji tüketimindeki değişim ortaya çıkarılabilir. Yapılan iyileştirmelerin bina enerji performansına etkisi değerlendirilerek, enerji verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler belirlenebilir. Sonuç olarak, TRNSYS simülasyonları bina enerji performansının değerlendirilmesi ve sürdürülebilir tasarım kararlarının alınması açısından önemli bir araç olduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda farklı iklim senaryoları ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi faktörler de dikkate alınarak ek analizler yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (OKÜBAP) tarafından OKÜBAP-2024-PT2-017 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı OKÜBAP'a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Al-Shargabi AA., Almhafdy A., Ibrahim DM., Alghieth M., Chiclana F. Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics: Research trends, taxonomy, and performance measures. Journal of Building Engineering 2022; 54: 104577.

Azhar S., Carlton WA., Olsen D., Ahmad I. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. Automation in Construction 2011; 20(2): 217-224.

Cao J., Liu J., Man X. A united WRF/TRNSYS method for estimating the heating/cooling load for the thousand-meter scale megatall buildings. Applied Thermal Engineering 2017; 114: 196-210.

de Wilde P. Ten questions concerning building performance analysis. Building and Environment 2019; 153: 110-117.

Duman E., Mentese R. Simulation of heating and cooling processes of a green building. International Journal of Scientific and Technological Research 2017; 3(4).

Eguía P., Granada E., Alonso JM., Arce E., Saavedra A. Weather datasets generated using kriging techniques to calibrate building thermal simulations with TRNSYS. Journal of Building Engineering 2016; 7: 78-91.

Gao M., Zhang L., Zhang H., Wang W. Research on the influence of different heating strategies on energy consumption and carbon emission of a teaching building in Urumqi. Energy Reports 2022; 8: 318-326.

Harputlugil GU. Enerji performansına dayalı tasarımda analiz ve simülasyon. Megaron 2011; 6(1).

Kenai MA., Libessart L., Lassue S., Defer D. Impact of green walls occultation on energy balance: Development of a TRNSYS model on a brick masonry house. Journal of Building Engineering 2021; 44: 102634.

Magni M., Ochs F., de Vries S., Maccarini A., Sigg F. Detailed cross comparison of building energy simulation tools results using a reference office building as a case study. Energy and Buildings 2021; 250: 111260.

Maile T., Fischer M., Bazjanac V. Building energy performance simulation tools-a life-cycle and interoperable perspective. Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper 2007; 107: 1-49.

Muhammad A., Karinka S. Comparative energy analysis of a laboratory building with different materials using eQUEST simulation software. Materials Today: Proceedings 2022; 52: 2160-2165.

Nimlyat PS., Dassah E., Allu E. Computer simulations in buildings: Implications For Building Energy Performance 2014.

Nugraha BY., Pere C., Landrieu J., Nicolle C. A thermal simulation tool for building and its interoperability through the building information modeling (BIM) platform. Buildings 2013; 3(2): 380-398.

Ozalp C., Saydam DB., Çerçi KN., Hürdoğan E., Moran H. Evaluation of a sample building with different type building elements in an energetic and environmental perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019; 115: 109386.

Pisello AL., Taylor JE., Xu X., Cotana F. Inter-building effect: Simulating the impact of a network of buildings on the accuracy of building energy performance predictions. Building and Environment 2012; 58: 37-45.

Renuka SM., Maharani CM., Nagasudha S., Priya RR. Optimization of energy consumption based on orientation and location of the building. Materials Today: Proceedings 2022; 65: 527-536.

Shabunko V., Lim CM., Mathew S. EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. Energy and Buildings 2018; 169: 507-516.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Kamu binalarının enerji verimli yenilenmesine yönelik rehber. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı; 2020.

Türk Standartları Enstitüsü. TS 825: Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. Ankara: TSE; 2008.

Valdiserri P., Biserni C., Tosi G., Garai M. Retrofit strategies applied to a tertiary building assisted by Trnsys energy simulation tool. Energy Procedia 2015; 78: 765-770.

Yang L., He BJ., Ye M. Application research of ECOTECT in residential estate planning. Energy and Buildings 2014; 72: 195-202.

Yu K., Cao Z., Liu Y. Research on the optimization control of the central air-conditioning system in university classroom buildings based on TRNSYS software. Procedia Engineering 2017; 205: 1564-1569.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2464-2482, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2464-2482, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Atangana-Baleanu Kesirli Coupled Burgers Denklemi Üzerine Güçlü Bir Çalışma

Hakkı GÜNGÖR[1*]

[1]Ufuk Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 06800, Ankara

[1]https://orcid.org/0000-0002-9546-665X
*Sorumlu yazar: hakki.gungor@ufuk.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 20.03.2025
Kabul tarihi:15.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Atangana-Baleanu Elzaki dönüşümü
Burgers denklemi
Atangana-Baleanu q-Elzaki homotopi analiz dönüşümü yöntemi

ÖZ

Bu çalışma, Atangana-Baleanu anlamında kesirli türevleri içeren, bağlı Burgers denklemi için oldukça doğru sayısal çözümler elde etmek amacıyla yeni Atangana-Baleanu yönteminin uygulanmasını araştırmaktadır. Bunu başarmak için, Atangana-Baleanu q-Elzaki homotopi analiz dönüşümü yöntemi (ABq-EHATM), sistemi etkili bir şekilde ele almak için bir hesaplama tekniği olarak kullanılmıştır. Bu yöntem, kesirli hesaplamanın avantajlarını q-Elzaki ve homotopi analiz çerçevelerinin esnekliğiyle benzersiz bir şekilde birleştirerek, doğrusal olmayanlıkların ve bellek etkilerinin ele alınması konusunda yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Bu hibrit yaklaşımla elde edilen sayısal çözümlerin ayrıntılı bir incelemesi sunulmakta ve önerilen yöntemin hem hassasiyeti hem de hesaplama verimliliği vurgulanmaktadır. Ayrıca, kesirli mertebeler aralığı için Maple yazılımı kullanılarak sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmekte ve bu da kesirli parametrelerdeki değişimlerin genel sistem dinamiklerini nasıl etkilediğinin kapsamlı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamaktadır. Sonuçlar ABq-EHATM'nin yalnızca etkili ve esnek bir yaklaşım değil, aynı zamanda karmaşık doğrusal olmayan kesirli diferansiyel denklemlerle başa çıkmak için sağlam ve güvenilir bir alternatif olduğunu açıkça göstermektedir. Genel olarak, bu çalışma ABq-EHATM'nin pratik ve yenilikçi bir uygulamasını vurgulayarak potansiyel faydalarını göstermekte ve kesirli diferansiyel denklem modellemesi alanında güçlü bir araç olarak önemini vurgulamaktadır.

A Robust Study on Atangana-Baleanu Fractional Coupled Burgers Equation

Research Article

Article History:
Received: 20.03.2025
Accepted: 15.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Atangana-Baleanu Elzaki transform
Burgers equation
Atangana-Baleanu q-Elzaki homotopy analysis transform method

ABSTRACT

This study explores the application of the novel Atangana–Baleanu method to obtain highly accurate numerical solutions for coupled Burgers equation, which incorporates fractional derivatives in the sense of Atangana–Baleanu. To achieve this, the Atangana–Baleanu q-Elzaki homotopy analysis transform method (ABq-EHATM) is utilized as a computational technique to address the system effectively. This method uniquely combines the advantages of fractional calculus with the flexibility of q-Elzaki and homotopy analysis frameworks, offering a new perspective on handling nonlinearities and memory effects. A detailed investigation of the numerical solutions obtained through this hybrid approach is presented, emphasizing both the precision and computational efficiency of the proposed method. Furthermore, numerical simulations are carried out using Maple software for a range of fractional orders, allowing for a thorough examination of how variations in the fractional parameters influence the overall system dynamics. The results clearly demonstrate that the ABq-EHATM is not only an effective and flexible approach, but also a robust and reliable alternative for tackling complex

nonlinear fractional differential equations. Overall, this study highlights a practical and innovative application of the ABq-EHATM, illustrating its potential benefits and underscoring its significance as a powerful tool in the field of fractional differential equation modeling.

To Cite: Güngör H. A Robust Study on Atangana-Baleanu Fractional Coupled Burgers Equation. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2464-2482.

1. Introduction

Fractional differential equations have recently acquired popularity due to their successful applications in a variety of scientific and engineering domains. For example, a fractional derivative can be used to characterize an earthquake's nonlinear oscillations. In dynamic systems such as earthquakes, which are nonlinear and where past behaviors can influence future responses, fractional derivatives offer a powerful tool to capture this memory dependence. In contrast, partial derivatives generally represent local and instantaneous changes, and thus may fall short in accurately describing systems where historical effects are dominant. In this context, the ability of fractional derivatives to more accurately and realistically model nonlinear oscillations makes them a preferable choice for the mathematical characterization of such physical phenomena. Research on this subject is progressing rapidly, and new applications are being discovered every day. Genetics, medicine, biology, chemistry, geology, economics, statistics, pharmacy, psychology and other fields fall under the umbrella of engineering and physics. It has numerous uses in many fields of science (Miller et al., 1993; Machado et al., 2011; Baleanu et al., 2012; Atangana, 2018; Shah et al., 2022).

Fractional calculus is also applied in domains such as control theory, heat conduction, electricity, mechanics, chaos, and fractals. For example, fractional differentiation is used to generalize Maxwell's equations (Engheta, 1998). Some derivatives, such as the Grünwald, Riemann-Liouville and Caputo definitions, are based on the singular kernel and are discussed in the literature. Recent examples of nonsingular kernels used to define fractional derivatives include the Atangana-Baleanu and Caputo-Fabrizio fractional derivatives (Podlubny, 1999; Kilbas et al., 2006; Caputo and Fabrizio, 2015; Atangana and Baleanu, 2016; Hristov, 2019). This derivative addresses some of the limitations associated with traditional fractional derivatives, such as the singular kernels found in the Riemann-Liouville and Caputo formulations. By employing an exponential kernel, it avoids the singularities present in conventional definitions. The AB derivative is particularly suitable for modeling physical systems that display smoother memory behaviors. In this study, the Caputo derivative is preferred due to its compatibility with classical initial conditions and its suitability for modeling physical problems more effectively. There are a few integral transform approaches available in the literature for solving fractional differential equations. The Elzaki transform (ET) is an important transform in this context. Numerous academics have examined some major techniques for tackling real-world problems, as well as numerical simulations produced by the novel integral transform (Elzaki, 2011).

Burgers equations are applied to products of thermodynamics, gas dynamics, elasticity, diffusion theory, shock wave theory, and turbulence issues.

v is a real constant

$$u_t + uu_x - vu_{xx} = 0 \tag{1}$$

The equation (1), known as the Burgers equation, was first investigated by Bateman (Bateman, 1915). Burger has done substantial research on this equation, particularly as a model of turbulence. As a result, the equation became known as the Burgers equation (Partal, 2011).

The Burgers equation has the following initial and boundary conditions:

$$\begin{cases} u(x,0) = f(x), & a \le x \le b \\ u(a,t) = \alpha, \quad u(b,t) = \beta, & 0 \le t \le T \end{cases} \tag{2}$$

The Burgers equation has similar properties to the Navier-Stokes equation due to the nonlinear convective term ux and the viscosity term vuxx. Therefore, before moving on to the numerical solutions of the Navier-Stokes equation, it is a suitable start to study the simpler model, the Burgers equation. Therefore, the Burgers equation is used as a model to test the stability and accuracy of the numerical solution methods of the Navier-Stokes equation (Jain and Holla, 1978; Uçar et al., 2023).

To date, several scientists have employed various numerical solution approaches to determine the numerical solutions to the Burgers equation. It has been found that numerical solutions to the equation become challenging at very low viscosity values. Jain and Holla investigated the numerical solution of the one and two-dimensional Burgers equations using the finite difference approach and cubic spline functions (Prakasha et al., 2019; Yağmurlu and Gagir, 2022).

The time-fractional coupled Burgers equation is (Esipov, 1995; Liu and Hou, 2011),

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^{\alpha_1} u}{\partial t^{\alpha_1}} = \dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2u\dfrac{\partial^{\alpha_2} u}{\partial x^{\alpha_2}} - \dfrac{\partial(uv)}{\partial x}, \\ \dfrac{\partial^{\beta_1} v}{\partial t^{\beta_1}} = \dfrac{\partial^2 v}{\partial x^2} + 2v\dfrac{\partial^{\beta_2} u}{\partial x^{\beta_2}} - \dfrac{\partial(uv)}{\partial x}, \qquad 0 < \alpha_i, \beta_i < 1, \qquad t > 0. \end{cases} \tag{3}$$

The Burgers turbulence model is a fundamental framework in fluid dynamics, widely used to study shock waves and nonlinear flow behavior. Many researchers have explored its theoretical aspects to better understand physical flow dynamics and assess alternative approximation methods. Eq. (3) offers an advantage over other numerical formulations due to its simplicity in capturing viscous diffusion and nonlinear advection.

In this study the Atangana- Baleanu fractional coupled Burgers equation is examined as (Ahmet et al.,2019);

$$\begin{aligned} {}^{AB}D_t^{\alpha} u(x,y,t) + u(x,y,t)\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial x} + v(x,y,t)\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial y} \\ = \frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial y^2}\right], \end{aligned} \tag{4}$$

$$
{}^{AB}D_t^{\beta} v(x,y,t) + u(x,y,t)\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial x} + v(x,y,t)\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial y}
$$
$$
= \frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2 v(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v(x,y,t)}{\partial y^2}\right],
$$

where $0 < \zeta < 1,\ 0 < \mu < 1,\ 0 < \alpha < 1,\ 0 < \beta < 1, \tau > 0$. Re is Reynolds number. Re represents the Reynolds number. As is well-known, when the Reynolds number is large, a shock wave with a cusp forms, and achieving numerical stability near this shock wave is often challenging. (Yağmurlu and Gagir, 2021).

The coupled Burgers equation is used in a variety of applications and is essential for understanding and modeling nonlinear systems. Solving equations can be quite analytically complex, especially in the coupled case. For this reason, numerical methods are widely used in solving problems (Güngör, 2024).

The conventional Fourier integral serves as the foundation for the Elzaki Transform. The Elzaki transform is mathematically simple and has fundamental features. Tarig Elzaki created the Elzaki transform to make it easier to solve ordinary and partial differential equations in the time domain. Typically, Fourier, Laplace, and Sumudu transforms are useful mathematical tools for solving differential equations; however, the Elzaki transform and some of its essential features are also used (Baleanu, et al., 2022).

The primary objective of this study is to introduce a novel methodological approach, referred to as the Atangana- Baleanu q-Elzaki Homotopy Analysis Transform Method (ABq-EHATM), and to employ it for obtaining innovative numerical solutions to the Atangana- Baleanu fractional coupled Burgers equation. The structure of this paper is systematically organized as follows.

In the second section, the fundamental definitions of fractional derivatives are elaborated, and the Elzaki transform is introduced as a significant tool for their computation. Section three provides a comprehensive exposition of the Atangana- Baleanu q-Elzaki Homotopy Analysis Transform Method (ABq-EHATM), detailing its mathematical formulation and applicability. In section four, numerical solutions to the Atangana- Baleanu fractional coupled Burgers equation are presented, demonstrating the effectiveness and practical implementation of the proposed approach. Finally, the fifth section summarizes the key findings of the study and offers conclusive remarks based on the obtained results.

2. Main definitions and Theorems

In this section, fundamental definitions and key theorems will be presented and discussed.

Definition 2.1. Let $\vartheta(t)$ be a continuously differentiable function. The Caputo derivative of order $\mu > 0$ is mathematically expressed as (Baleanu, et al., 2012);

$$ {}^{C}D_{t}^{\mu}[\vartheta(t)] = \frac{1}{\Gamma(n-\mu)} \int_{0}^{t} \frac{\vartheta^{(n)}(s)}{(t-s)^{1+\mu-n}} ds, \tag{5} $$

$n-1 < \mu \leq n,\ n \in \mathbb{N},\ t > 0,\ \vartheta(t) \in C^{m-1}[0,t],\ s(t) = t^{n-\mu-1}$ is the singular kernel. ${}^{C}D_{t}^{\mu}; t \in \mathbb{Z}, \mu \in \mathbb{R}^{+}$ gives *n* th integer and fractional order derivatives of $\vartheta(t)$(Kürkçü et al., 2019)

Definition 2.2. The fractional derivative of order μ of the function $\vartheta(t)$ is mathematically defined as follows (Anaç, 2022);

$$ D_{t}^{\mu}[\vartheta(t)] = \frac{1}{\Gamma(n-\mu)} \frac{d^{n}}{dt^{n}} \int_{t_0}^{t} (s-t)^{n-\mu-1} [\vartheta_0(s) - \vartheta(s)]\, ds. \tag{6} $$

Definition 2.3. The Atangana-Baleanu (AB) fractional derivative of order $0 < \mu < 1$ for a function $\vartheta(t)$ is defined in terms of the Mittag-Leffler function as follows (Atangana and Baleanu, 2016);

$$ {}^{ABC}D_{t}^{\mu}[\vartheta(t)] = \frac{N(\mu)}{1-\mu} \int_{0}^{t} \vartheta'(\tau)\, E_{\mu}\left[-\frac{\mu(t-\tau)^{\mu}}{1-\mu}\right] d\tau, \qquad 0 < \mu \leq 1, \tag{7} $$

where $N(\mu)$ is the normalization function, which satisfies $N(\mu) = 1$ when $\mu = 0, \mu = 1$ and E_{μ} denotes the Mittag-Leffler function, defined as;

$$ E_{\mu} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\tau^{k}}{\Gamma(\mu k + 1)} $$

This fractional derivative is widely used in modeling complex systems and non-local phenomena due to its non-singular kernel and memory effects.

Definition 2.4

The Caputo-Fabrizio fractional derivative of order $0 < \mu$ for a differentiable function $\vartheta(t)$ is expressed as (Caputo, 1969; Caputo and Fabrizio, 2015);

$$ {}^{CF}D_{0,t}^{\mu}[\vartheta(t)] = \frac{M(\mu)}{1-\mu} \int_{0}^{t} \vartheta'(\tau)\, exp\left[-\frac{\mu(t-\tau)}{1-\mu}\right] d\tau, \qquad t > 0, \tag{8} $$

where $M(\mu)$ is the normalization function such that $M(0) = M(1) = 1$, and $g \in H^{1}(a,b), b > a$. Here, $M(\mu)$ represents a normalization function that ensures the operator satisfies fundamental properties of fractional calculus. The presence of the exponential kernel differentiates this derivative from classical fractional derivatives, as it provides a non-singular memory effect, making it suitable for real-world applications involving systems with smooth fading memory behavior (Alkan and Anaç, 2024).

Definition 2.5 The Elzaki transform applied to the Atangana-Baleanu (AB) fractional derivative of order ${}^{AB}D_t^{\mu}[\vartheta(t)]$ under the Atangana-Baleanu-Caputo (ABC) operator is formulated as follows: (Haroon et al., 2022)

$$ {}^{ABC}E_{\alpha}\left[{}^{ABC}D_t^{\alpha}\vartheta(t)\right] = \frac{N(\alpha)}{\alpha\omega^{\alpha}+1-\alpha}\left[\frac{{}^{ABC}E_{\alpha}\,\vartheta(t)}{\omega} - \omega\vartheta(0)\right]. \tag{9}$$

2.1. The basic principle of the q-homotopy analysis transform method

To illustrate the basic concept of the suggested approach (Veeresha, P et al, 2019; Alkan and Anaç 2024) let's look at the fractional-order nonlinear non-homogeneous partial differential equation:

$$D_t^{\mu}u(x,t) + Ku(x,t) + Su(x,t) = f(x,t), t \in (0,\infty), n-1 < \mu \leq n, \tag{10}$$

Where $D_t^{\mu}u(x,t)$ presents Caputo fractional derivative of the function $u(x,t)$, K and S, respectively, correspond to linear and nonlinear operators, and $f(x,t)$, represent the source term.

Applying the Laplace transform (LT**)** to Equation (10), Equation (11) is obtained as follows:

$$s^{\mu}\mathcal{L}[u(x,t)\,] - \sum_{k=0}^{n-1} s^{\mu-k-1}u^{(k)}(x,0) + \mathcal{L}[Ku(x,t)\,] + \mathcal{L}[Su(x,t)\,] = \mathcal{L}[f(x,t)\,]. \tag{11}$$

Rewriting the Eq. (11), Eq. (12) is obtained by

$$\mathcal{L}[u(x,t)\,] - \frac{1}{s^{\mu}}\sum_{k=0}^{n-1} s^{\mu-k-1}u^{(k)}(x,0) + \frac{1}{s^{\mu}}\{\mathcal{L}[Ku(x,t)] + \mathcal{L}[Su(x,t)\,] - \mathcal{L}[f(x,t)\,]\} = 0. \tag{12}$$

Via the homotopy analysis method, the nonlinear operator of $\psi(x,t;q)$ is described by

$$N[\psi(x,t;q)] = \mathcal{L}[\psi(x,t;q)\,] - \frac{1}{s^{\mu}}\sum_{k=0}^{n-1} s^{\mu-k-1}\psi^{(k)}(x,t;q)(0^{+}) + \frac{1}{s^{\mu}}\{\mathcal{L}[K\psi(x,t;q)] + \mathcal{L}[S\psi(x,t;q)\,] - \mathcal{L}[f(x,t)\,]\},$$

where $q \in \left[0,\frac{1}{n}\right]$, and $\psi(x,t;q)$ is real function of x,t, and q.

A homotopy is generated by

$$(1-nq)\mathcal{L}[\psi(x,t;q) - u_0(x,t)] = hqS[\psi(x,t;q)], \tag{13}$$

where $h \neq 0$ is an auxiliary parameter, and $q \in \left[0,\frac{1}{n}\right], n \geq 1$ is the embedding parameter, $u_0(x,t)$ is an initial guess of $u(x,t)$ and $\psi(x,t;q)$ is an unknown function. By considering the cases $q = 0$ and $q = \frac{1}{n}$, the corresponding solutions of Equation (13) can be determined.

$$\psi(x,t;0) = u_0(x,t), \qquad \psi\left(x,t;\frac{1}{n}\right) = u(x,t),$$

Thus, as q varies from 0 to $\frac{1}{n}$, the solution $\psi(x,t;q)$ gradually approaches $u_0(x,t)$ starting from $u(x,t)$. Expanding around q using Taylor's theorem, the resulting expression is obtained as follows:

$$\psi(x,t;q) = u_0(x,t) + \sum_{i=1}^{\infty} u_m(x,t)q^m, \tag{14}$$

where,

$$u_m(x,t) = \frac{1}{m!}\frac{\partial^m \psi(x,t;q)}{\partial q^m}|_{q=0}.$$

Eq. (14) converges at $q = \frac{1}{n}$ for the convenient $u_0(x,t)$, n and h. Therefore, the numerical solution of the nonlinear equation is obtained as

$$u(x,t) = u_0(x,t) + \sum_{m=1}^{\infty} u_m(x,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m.$$

By differentiating the $0-th$ order deformation Equation (14) $m-$times with respect to q and subsequently dividing by $m!$, we obtain the following expression for $q = 0$:

$$\mathcal{L}[u_m(x,t) - k_m u_{m-1}(x,t)] = h\mathcal{R}_m(\vec{u}_{m-1}),$$

where the vector notation is defined as

$$\vec{u}_m = \{u_0(x,t), u_1(x,t), \dots, u_m(x,t)\}. \tag{15}$$

Applying the inverse ABCET (IABCET) to Equation (15), we derive the following result:

$$u_m(x,t) = k_m u_{m-1}(x,t) + h\mathcal{L}^{-1}[\mathcal{R}_m(\vec{u}_{m-1})],$$

where

$$\mathcal{R}_m(\vec{u}_{m-1}) = \mathcal{L}[u_{m-1}(x,t)] - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right)$$
$$\left(\sum_{k=0}^{n-1} s^{\mu-k-1}u^{(k)}(x,0) + \frac{1}{s^\mu}\mathcal{L}[f(x,t)\,]\right)\frac{1}{s^\mu}\mathcal{L}[\mathcal{R}u_{m-1} + H^*{}_{m-1}],$$

The coefficient k_m is given by

$$k_m = \begin{cases} 0, & m \le 1, \\ n, & m > 1. \end{cases} \tag{16}$$

Here, $H^*{}_m$ represents homotopy polynomials, which are formulated as

$$H^*{}_m = \frac{1}{m!}\frac{\partial^m \psi(x,t;q)}{\partial q^m}|_{q=0}, \psi(x,t;q) = \psi_0 + q\psi_1 + q^2\psi_2 + \cdots. \tag{17}$$

Utilizing Eqs. (16)-(17), one gets

$$u_m(x,t) = (k_m + h)u_{m-1}(x,t) - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right)\mathcal{L}^{-1}\left(\sum_{k=0}^{n-1} s^{\mu-k-1}u^{(k)}(x,0) + \frac{1}{s^\mu}\mathcal{L}[f(x,t)\,]\right)$$

$$+h\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s^\mu}\mathcal{L}[\mathcal{R}u_{m-1} + H^*{}_{m-1}]\right\}$$

Via ABq-EHATM, then it is obtained as

$$u(x,t) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(x,t).$$

3. Analysis of the ABq-EHATM

Now, we proceed with the analysis of the Atangana-Baleanu time fractional partial differential equations (ABTFPDE), which are expressed as follows:

$$^{ABC}D_t^{\alpha} u(x,t) + Kw(x,t) + Sw(x,t) = \zeta(x,t), t \in (0,\infty), n-1 < \alpha \leq n. \tag{18}$$

In this context, K and S correspond to linear and nonlinear operators, respectively, while $\zeta(x,t)$ represents a nonhomogeneous function. Additionally, $^{ABC}D_t^{\alpha}$ denotes the Atangana-Baleanu-Caputo fractional derivative (ABCFD) of order α, which plays a crucial role in the mathematical formulation of fractional differential equations.

By applying the Atangana-Baleanu Elzaki Transform (ABET**)** to Equation (18) and incorporating the initial condition (IC), Equation (19) is obtained as follows:

$$\frac{N(\alpha)}{\alpha\omega^{\alpha}+1-\alpha}\left[\frac{^{ABC}E_{\alpha}\, u(x,t)}{\omega} - \omega u(x,0)\right] + {}^{ABC}E_{\alpha}\,[Ku(x,t) + Su(x,t) - \zeta(x,t)] = 0. \tag{19}$$

Rewriting the Eq. (19), Eq. (20) is obtained by

$$^{ABC}E_{\alpha}\, u(x,t) - \omega^2 u(x,0) + \frac{\alpha\omega^{\alpha+1} + \omega - \omega\alpha}{N(\alpha)} \times {}^{ABC}E_{\alpha}\,[Ku(x,t) + Su(x,t) - \zeta(x,t)] = 0. \tag{20}$$

Via the homotopy analysis method, the nonlinear operator of $\psi(x,t;q)$ is described by

$$N[\psi(x,t;q)] = {}^{ABC}E[\psi(x,t;q)] - \omega^2\psi(x,t;q)(0^+) + \frac{\alpha\omega^{\alpha+1} + w - w\alpha}{N(\alpha)} \times {}^{ABC}E_{\alpha}\,[K\psi(x,t;q) + S\psi(x,t;q) - \zeta(x,t)],$$

where $q \in \left[0, \frac{1}{n}\right]$.

A homotopy is generated by

$$(1-nq)^{ABC}E_{\alpha}\,[\psi(x,t;q) - u_0(x,t)] = hqH^*(x,t)^{ABC}E_{\alpha}\,[\psi(x,t;q)], \tag{21}$$

where $h \neq 0$ serves as an auxiliary parameter, and $^{ABC}E_{\alpha}$ denotes Atangana-Baleanu-Caputo Elzaki Transform (ABCET). By considering the cases $q = 0$ and $q = \frac{1}{n}$, the corresponding solutions of Equation (21) can be determined.

$$\psi(x,t;0) = u_0(x,t), \psi\left(x,t;\frac{1}{n}\right) = u(x,t).$$

Thus, as q varies from 0 to $\frac{1}{n}$, the solution $\psi(x,t;q)$ gradually approaches $u_0(x,t)$ starting from $u(x,t)$. Expanding around q using Taylor's theorem, the resulting expression is obtained as follows:

$$\psi(x,t;q) = u_0(x,t) + \sum_{i=1}^{\infty} u_m(x,t)q^m, \tag{22}$$

where,

$$u_m(x,t) = \frac{1}{m!}\frac{\partial^m \psi(x,t;q)}{\partial q^m}|_{q=0}.$$

Eq. (22) converges at $q = \frac{1}{n}$ for the convenient $u_0(x,t)$, n and h. Therefore, the numerical solution of the nonlinear equation is obtained as

$$u(x,t) = u_0(x,t) + \sum_{m=1}^{\infty} u_m(x,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{23}$$

By differentiating the $0-th$ order deformation Equation (22) $m-$times with respect to q and subsequently dividing by $m!$, we obtain the following expression for $q = 0$:

$${}^{ABC}E_\alpha\,[u_m(x,t) - k_m u_{m-1}(x,t)] = hH^*(x,t)\mathcal{R}_m(\vec{u}_{m-1}),$$

where the vector notation is defined as

$$\vec{u}_m = \{u_0(x,t), u_1(x,t), \ldots, u_m(x,t)\}. \tag{24}$$

Applying the inverse ABCET (IABCET) to Equation (24), we derive the following result:

$$u_m(x,t) = k_m u_{m-1}(x,t) + h\left({}^{ABC}E_\alpha\right)^{-1}[H^*(x,t)\mathcal{R}_m(\vec{u}_{m-1})],$$

where

$$\mathcal{R}_m(\vec{u}_{m-1}) = {}^{ABC}E_\alpha\,[u_{m-1}(x,t)] - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right)\omega^2 u_0(x,t)$$

$$+\frac{\alpha\omega^{\alpha+1} + w - w\alpha}{N(\alpha)}\,{}^{ABC}E_\alpha\,[Ku_{m-1}(x,t) + S_{m-1}(x,t) - \zeta(x,t)].$$

The coefficient k_m is given by

$$k_m = \begin{cases} 0, & m \le 1, \\ n, & m > 1, \end{cases} \tag{25}$$

Here, ${H^*}_m$ represents homotopy polynomials, which are formulated as

$${H^*}_m = \frac{1}{m!}\frac{\partial^m \psi(x,t;q)}{\partial q^m}|_{q=0},$$

and

$$\psi(x,t;q) = \psi_0 + q\psi_1 + q^2\psi_2 + \cdots. \tag{26}$$

Utilizing Eqs. (25)-(26), one gets

$$w_m(x,t) = (k_m + h)w_{m-1}(x,t) - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right)\omega^2 u_0(x,t)$$

$$+h\left({}^{ABC}E_{\alpha}\right)^{-1}\left[\left(\frac{\alpha\omega^{\alpha+1}+w-w\alpha}{N(\alpha)}\,{}^{ABC}E_{\alpha}\left[Ku_{m-1}(x,t)+H^{*}{}_{m-1}(x,t)-\zeta(x,t)\right]\right)\right].$$

Via ABq-EHATM, then it is obtained as

$$u(x,t)=\sum_{c=0}^{\infty}u_{c}(x,t).$$

4. Applications

In the part, the application of the ABq-EHATM to Atangana-Baleanu time-fractional Coupled Burgers equation (ABTFCBE) is presented.

Example 4.1.

Let us analyze the nonlinear ABCTFCBE (Liu and Hou, 2011).

$$\begin{aligned}
&{}^{AB}D_{t}^{\alpha}u(x,y,t)+u(x,y,t)\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial x}+v(x,y,t)\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial y}\\
&\qquad=\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^{2}u(x,y,t)}{\partial x^{2}}+\frac{\partial^{2}u(x,y,t)}{\partial y^{2}}\right],\\
&{}^{AB}D_{t}^{\beta}v(x,y,t)+u(x,y,t)\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial x}+v(x,y,t)\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial y}\\
&\qquad=\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^{2}v(x,y,t)}{\partial x^{2}}+\frac{\partial^{2}v(x,y,t)}{\partial y^{2}}\right],\\
&0<x<1,\qquad 0<y<1,\qquad 0<\alpha<1,\qquad 0<\beta<1,\qquad t>0.
\end{aligned}\tag{27}$$

with ICs

$$\begin{aligned}
u(x,0)&=\frac{3}{4}-\frac{1}{4+4e^{\frac{R(-4x+4y)}{32}}}.\\
v(x,0)&=\frac{3}{4}+\frac{1}{4+4e^{\frac{R(-4x+4y)}{32}}}.
\end{aligned}\tag{28}$$

where, *R* is Reynolds number.

Applying the ABCET to Eqs. (28) and using ICs, then it is found by

$$\begin{aligned}
&\frac{N(\alpha)}{\alpha w^{\alpha}+1-\alpha}\left(\frac{{}^{ABC}\mathbb{E}_{\alpha}[u(x,t)]}{w}-wu(x,0)\right)+{}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\left[u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^{2}u}{\partial x^{2}}+\frac{\partial^{2}u}{\partial y^{2}}\right]\right]\\
&\qquad=0.
\end{aligned}\tag{29}$$

$$\frac{N(\alpha)}{\alpha w^{\alpha}+1-\alpha}\left(\frac{{}^{ABC}\mathbb{E}_{\alpha}[v(x,t)]}{w}-wv(x,0)\right)+{}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\left[u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^{2}v}{\partial x^{2}}+\frac{\partial^{2}v}{\partial y^{2}}\right]=0.\right.\tag{30}$$

Rewriting the Eq. (29-30), then it is obtained as

$$ {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}[u(x,t)] - w^2 u(x,0) + \frac{\alpha w^{\alpha} + 1 - \alpha}{N(\alpha)} \times {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\left[u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right]\right] = 0. \tag{31} $$

$$ {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}[v(x,t)] - w^2 v(x,0) + \frac{\alpha w^{\alpha} + 1 - \alpha}{N(\alpha)} \times {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\left[u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right]\right] = 0. \tag{32} $$

Via the homotopy analysis method, the nonlinear operator of $\varphi(x,t;q), \psi(x,t;q)$ is described by

$$ \begin{aligned} &N^1[\varphi(x,y,\tau;q),\psi(x,y,\tau;q)] = {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}[\varphi(x,y,\tau;q)] - w^2\varphi(x,t;q)(0^+) \\ &+\frac{\alpha w^{\alpha} + 1 - \alpha}{N(\alpha)}\left\{{}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\left[\varphi(x,y,\tau;q)\frac{\partial\varphi(x,y,\tau;q)}{\partial x} + \psi(x,y,\tau;q)\frac{\partial\varphi(x,y,\tau;q)}{\partial y}\right.\right. \\ &\left.\left.-\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2\varphi(x,y,\tau;q)}{\partial x^2} + +\frac{\partial^2\psi(x,y,\tau;q)}{\partial y^2}\right]\right\}, \end{aligned} \tag{33} $$

$$ \begin{aligned} &N^2[\varphi(x,y,\tau;q),\psi(x,y,\tau;q)] = {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}[\psi(x,y,\tau;q)] - w^2\psi(x,t;q)(0^+) \\ &+\frac{\alpha w^{\alpha} + 1 - \alpha}{N(\alpha)}\left\{{}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\left[\varphi(x,y,\tau;q)\frac{\partial\psi(x,y,\tau;q)}{\partial x} + \psi(\zeta,\mu,\tau;q)\frac{\partial\psi(x,y,\tau;q)}{\partial y}\right.\right. \\ &\left.\left.-\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2\psi(x,y,\tau;q)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi(x,y,\tau;q)}{\partial y^2}\right]\right\}, \end{aligned} \tag{34} $$

where $q \in \left[0, \frac{1}{n}\right]$.

By implementing the proposed algorithm, the deformation equation of order $m - th$ is formulated as follows:

$$ {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}[u_m(x,t) - k_m u_{m-1}(x,t)] = h\mathcal{R}_{1,m}(\vec{u}_{m-1}), \tag{35} $$

$$ {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}[v_m(x,t) - k_m v_{m-1}(x,t)] = h\mathcal{R}_{2,m}(\vec{v}_{m-1}), \tag{36} $$

where,

$$ \begin{aligned} \mathcal{R}_{1,m}(\vec{u}_{m-1}) = {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}[u_{m-1}(x,\mathrm{y},t)] - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right)w^2 u_0(x,y,t) + \frac{\alpha w^{\alpha} + 1 - \alpha}{N(\alpha)} \\ {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\left[\sum_{j=0}^{i} u_j(x,\mathrm{y},t)\frac{\partial u_{i-j}(x,\mathrm{y},t)}{\partial x} + \sum_{j=0}^{i} v_j(x,\mathrm{y},t)\frac{\partial u_{i-j}(x,\mathrm{y},t)}{\partial y}\right. \\ \left. -\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2 u_{m-1}(x,\mathrm{y},t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{m-1}(x,\mathrm{y},t)}{\partial y^2}\right]\right. . \end{aligned} \tag{37} $$

$$\mathcal{R}_{2,m}(\vec{v}_{m-1}) = {}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}[v_{m-1}(x,\mathrm{y},t)] - \left(1-\frac{k_m}{n}\right)w^2 v_0(x,y,t) + \frac{\alpha w^{\alpha}+1-\alpha}{N(\alpha)} \tag{38}$$

$${}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\left[\sum_{j=0}^{i} v_j(x,\mathrm{y},t)\frac{\partial v_{i-j}(x,\mathrm{y},t)}{\partial x} + \sum_{j=0}^{i} v_j(x,\mathrm{y},t)\frac{\partial v_{i-j}(x,\mathrm{y},t)}{\partial y}\right.$$

$$\left. -\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2 v_{m-1}(x,\mathrm{y},t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_{m-1}(x,\mathrm{y},t)}{\partial y^2}\right]\right.$$

Implementing the inverse ABCET (IABCET) to Eq. (35-36), then it is acquired by

$$u_m(x,\mathrm{y},t) = k_m u_{m-1}(x,y,t) + h\left({}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\right)^{-1}\left[\mathcal{R}_{1,m}(\vec{u}_{m-1})\right]. \tag{39}$$

$$v_m(x,y,t) = k_m v_{m-1}(x,y,t) + h\left({}^{AB}\mathbb{E}_{\alpha}\right)^{-1}\left[\mathcal{R}_{2,m}(\vec{v}_{m-1})\right]. \tag{40}$$

With ICs, it is obtained by

$$u_0(x,y,t) = \frac{3}{4} - \frac{1}{4+4e^{\frac{R(-4x+4y)}{32}}}. \tag{41}$$

$$v_0(x,y,t) = \frac{3}{4}\frac{3}{4} + \frac{1}{4+4e^{\frac{R(-4x+4y)}{32}}}.$$

Putting the values of $m=1, m=2$ in the Eqs. (39-40), Eqs. (42)-(45) are found as

$$u_1(x,y,t) = \frac{hR\left(1-\alpha+\frac{\alpha t^{\alpha}}{\Gamma(\alpha+1)}\right).e^{-\frac{R(x-y)}{8}}}{128.N(\alpha)\left(1+e^{-\frac{R(x-y)}{8}}\right)^2}. \tag{42}$$

$$v_1(x,y,t) = -\frac{hR\left(1-\beta+\frac{\beta t^{\beta}}{\Gamma(\beta+1)}\right).e^{-\frac{R(x-y)}{8}}}{128.N(\beta)\left(1+e^{-\frac{R(x-y)}{8}}\right)^2}. \tag{43}$$

$$u_2(x,y,t) = \frac{(n+h)hR\left(1-\alpha+\frac{\alpha t^{\alpha}}{\Gamma(\alpha+1)}\right)e^{-\frac{R(x-y)}{8}}}{128N(\alpha)\left(1+e^{-\frac{R(x-y)}{8}}\right)^2}$$

$$+\frac{1}{4096N(\alpha)^2\left(1+e^{-\frac{R(x-y)}{8}}\right)^4 N(\beta)\Gamma(\beta)\Gamma(\alpha)}$$

$$\times\left(h^2e^{-\frac{R(x-y)}{8}}R^2\left((N(\beta)\Gamma(\beta)\left(\frac{\alpha\Gamma(\alpha+1)t^{2\alpha}}{\Gamma(2\alpha+1)}+\Gamma(1-\alpha)t^{\alpha}\right)\right.\right.\right.$$
$$\left.-\left(N(\alpha)\left(\frac{\alpha\Gamma(\beta+1)t^{2\alpha}}{\Gamma(\alpha+\beta+1)}+(1-\alpha)t^{\beta}\right)\right.\right.$$
$$+\Gamma(\beta)\left(N(\beta)\left(1-\alpha+\frac{\alpha t^{\alpha}}{\Gamma(\alpha+1)}\right)(-1+\alpha)-(-1+\beta)N(\alpha)\right)\Gamma(\alpha)\Big)e^{-\frac{R(x-y)}{8}}$$
$$+N(\beta)\Gamma(\beta)\left(e^{-\frac{R(x-y)}{4}}-1\right)\left(-\frac{\alpha\Gamma(\alpha+1)t^{2\alpha}}{\Gamma(2\alpha+1)}\right.$$
$$\left.\left.\left.-(1-\alpha)t^{\alpha}+(-1+\alpha)\left(1-\alpha+\frac{\alpha t^{\alpha}}{\Gamma(\alpha+1)}\right)\Gamma(\alpha)\right)\right)\right). \tag{44}$$

$$v_2(x,y,t)=-\frac{(n+h)hR\left(1-\beta+\frac{\beta t^{\beta}}{\Gamma(\beta+1)}\right)e^{-\frac{R(x-y)}{8}}}{128N(\beta)\left(1+e^{-\frac{R(x-y)}{8}}\right)^2}$$
$$-\frac{1}{4096N(\beta)^2\left(1+e^{-\frac{R(x-y)}{8}}\right)^4N(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(\alpha)}$$
$$\times\left(h^3e^{-\frac{R(x-y)}{8}}R^2\left(\left(\frac{\beta\Gamma(\beta+1)t^{2\beta}}{\Gamma(2\beta+1)}+(1-\beta)t^{\beta}\right)N(\alpha)\Gamma(\alpha)+\Gamma(\beta)\left(-N(\beta)\left(\frac{\beta\Gamma(\alpha+1)t^{\alpha+\beta}}{\Gamma(\alpha+\beta+1)}+(1-\beta)t^{\alpha}\right)\right.\right.\right. \tag{45}$$
$$\times\left(\left((1-\beta)N(\alpha)+N(\beta)(-1+\alpha)\right)\left(1-\beta+\frac{\beta t^{\beta}}{\Gamma(\beta+1)}\right)\Gamma(\alpha)\right)e^{-\frac{R(x-y)}{8}}+\left(\frac{\beta\Gamma(\beta+1)t^{2\beta}}{\Gamma(2\beta+1)}-(1-\beta)\,t^{\beta}\right.$$
$$\left.+\left(1-\beta+\frac{\beta t^{\beta}}{\Gamma(\beta+1)}\right)(1-\beta)\Gamma(\beta)\right)+\left(e^{-\frac{R(x-y)}{4}}-1\right)N(\alpha)\Gamma(\alpha)\Big)\Big).$$

Therefore, the ABq-EHATM solution of Eq. (28) is found as

$$u(x,y,t)=u_0(x,y,t)+\sum_{m=1}^{\infty}u_m(x,y,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{46}$$

$$v(x,y,t)=v_0(x,y,t)+\sum_{m=1}^{\infty}v_m(x,y,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{47}$$

2D graphs for $u(x,y,t),v(x,y,t)$ solution with ABq-EHATM by distinct α,β values are shown in Figure 1.

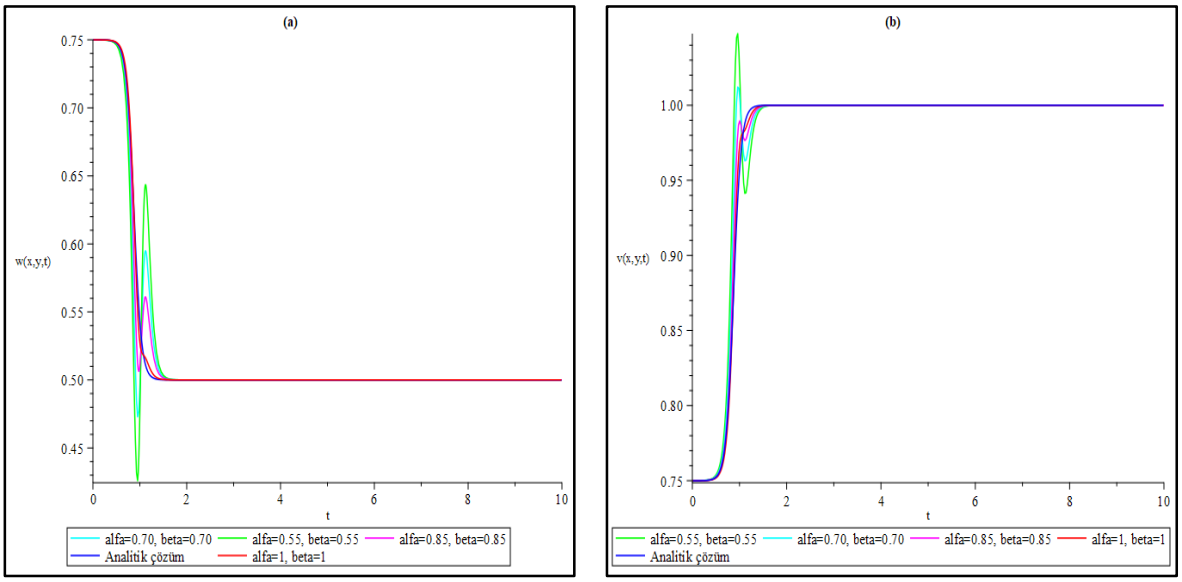


Figure 1. 2D plots of $u(x,y,t), v(x,y,t)$ solutions with ABq-EHATM at $t = 0.5, R = 100, \mathrm{h} = -1, \mathrm{n} = 1$ with distinct α, β.

Figure 2 shows 3D graphs for the $u(x,y,t), v(x,y,t)$ solution of ABq-E

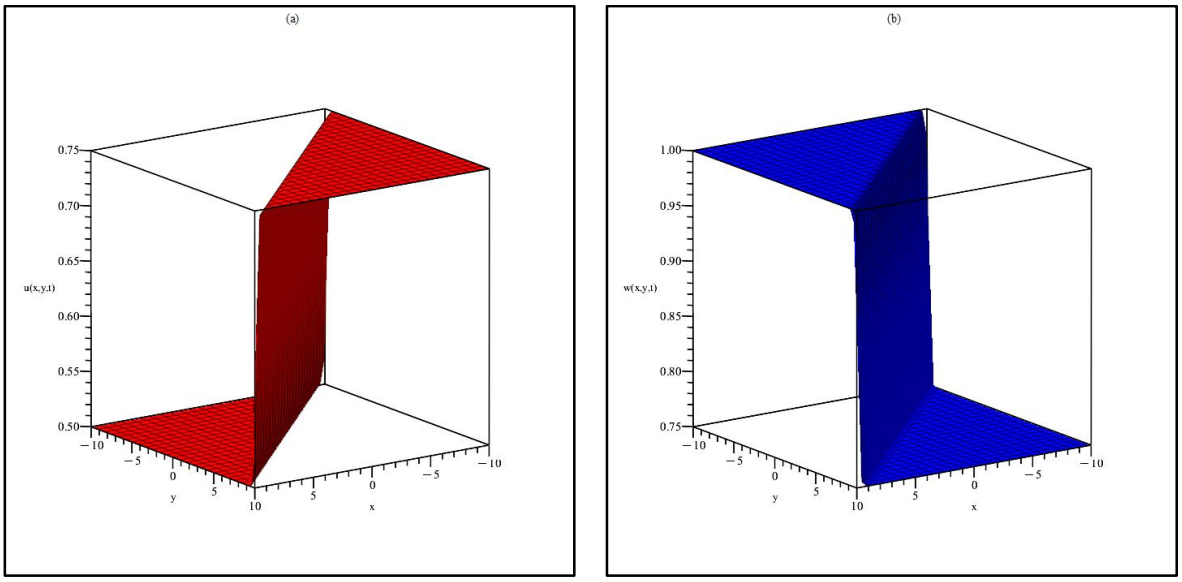


Figure 2. Three-dimensional visual representations of the solutions $u(x,y,t)$, and $v(x,y,t)$ obtained using the ABq-EHATM method for $t = 0.5, R = 100, \mathrm{n} = 1$, and $\mathrm{h} = -1$, considering various values of the fractional parameters α and β.

Table 1 presents the numerical results of the $u(x,y,t)$ obtained using the ABq-EHATM method for different fractional values of α.

Table 1. The numerical values of $u(x, y, t)$ solutions with ABq-EHATM at various fractional values α for $t = 0.5, Re = 100, \mathrm{h} = -1, \mathrm{n} = 1$ ve $\beta = 1$.

x	y	$\alpha = 0.55$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 1$
0.1	0.1	0.5051186770	0.5088260690	0.5166198748	0.5273437500
	0.2	0.5003980018	0.5389457141	0.5712559823	0.5974078528
	0.3	0.6266025790	0.6509116808	0.6704624271	0.6855030474
	0.4	0.7077119587	0.7165529014	0.7235970002	0.7289501769
	0.5	0.7372185060	0.7399346407	0.7420932709	0.7437282216
0.2	0.1	0.5707221498	0.5432957620	0.5260105116	0.5173540324
	0.2	0.5051186770	0.5088260690	0.5166198748	0.5273437500
	0.3	0.5003980018	0.5389457141	0.5712559823	0.5974078528
	0.4	0.6266025790	0.6509116808	0.6704624271	0.6855030474
	0.5	0.7077119587	0.7165529014	0.7235970002	0.7289501769
0.3	0.1	0.5439768322	0.5274194867	0.5162491980	0.5097284239
	0.2	0.5707221498	0.5432957620	0.5260105116	0.5173540324
	0.3	0.5051186770	0.5088260690	0.5166198748	0.5273437500
	0.4	0.5003980018	0.5389457141	0.5712559823	0.5974078528
	0.5	0.6266025790	0.6509116808	0.6704624271	0.6855030474
0.4	0.1	0.5158212171	0.5099438254	0.5059235302	0.5035112213
	0.2	0.5439768322	0.5274194867	0.5162491980	0.5097284239
	0.3	0.5707221498	0.5432957620	0.5260105116	0.5173540324
	0.4	0.5051186770	0.5088260690	0.5166198748	0.5273437500
	0.5	0.5003980018	0.5389457141	0.5712559823	0.5974078528
0.5	0.1	0.5048422224	0.5030509491	0.5018211703	0.5010779842
	0.2	0.5158212171	0.5099438254	0.5059235302	0.5035112213
	0.3	0.5439768322	0.5274194867	0.5162491980	0.5097284239
	0.4	0.5707221498	0.5432957620	0.5260105116	0.5173540324
	0.5	0.5051186770	0.5088260690	0.5166198748	0.5273437500

Table 2 displays the numerical values of $v(x, y, t)$ solutions with ABq-EHATM at various fractional values α.

Table 2. The numerical values of $v(x, y, t)$ solutions with ABq-EHATM at various fractional values α for $t = 0.5, Re = 100, \mathrm{h} = -1, \mathrm{n} = 1$ ve $\beta = 1$.

x	y	$\beta = 0.55$	$\beta = 0.7$	$\beta = 0.85$	$\beta = 1$
0.1	0.1	0.9948813229	0.9911739307	0.9833801252	0.9726562500
	0.2	0.9996019982	0.9610542859	0.9287440177	0.9025921472
	0.3	0.8733974210	0.8490883192	0.8295375729	0.8144969526
	0.4	0.7922880413	0.7834470986	0.7764029998	0.7710498231
	0.5	0.7627814940	0.7600653593	0.7579067291	0.7562717784
0.2	0.1	0.9292778506	0.9567042375	0.9739894880	0.9826459680
	0.2	0.9948813229	0.9911739307	0.9833801252	0.9726562500
	0.3	0.9996019982	0.9610542859	0.9287440177	0.9025921472
	0.4	0.8733974210	0.8490883192	0.8295375729	0.8144969526
	0.5	0.7922880413	0.7834470986	0.7764029998	0.7710498231
0.3	0.1	0.9560231680	0.9725805137	0.9837508017	0.9902715758
	0.2	0.9292778506	0.9567042375	0.9739894880	0.9826459680
	0.3	0.9948813229	0.9911739307	0.9833801252	0.9726562500
	0.4	0.9996019982	0.9610542859	0.9287440177	0.9025921472
	0.5	0.8733974210	0.8490883192	0.8295375729	0.8144969526
0.4	0.1	0.9841787826	0.9900561747	0.9940764696	0.9964887783
	0.2	0.9560231680	0.9725805137	0.9837508017	0.9902715758
	0.3	0.9292778506	0.9567042375	0.9739894880	0.9826459680
	0.4	0.9948813229	0.9911739307	0.9833801252	0.9726562500
	0.5	0.9996019982	0.9610542859	0.9287440177	0.9025921472
0.5	0.1	0.9951577778	0.9969490505	0.9981788296	0.9989220154
	0.2	0.9841787826	0.9900561747	0.9940764696	0.9964887783
	0.3	0.9560231680	0.9725805137	0.9837508017	0.9902715758
	0.4	0.9292778506	0.9567042375	0.9739894880	0.9826459680
	0.5	0.9948813229	0.9911739307	0.9833801252	0.9726562500

5. Results and Discussion

Figure 1 presents the two-dimensional graphical representations of the solutions $u(x, y, t)$ and $v(x, y, t)$ obtained using the Atangana-Baleanu q-Elzaki Homotopy Analysis Transform Method (ABq-EHATM) for various values of the fractional parameter α, specifically $\alpha = 1$ and $\alpha = 0.6, \alpha = 0.7, \alpha = 0.8, \alpha = 0.9$, within the framework of the Atangana-Baleanu-Caputo Time-Fractional Coupled Burgers Equation (ABCTFCBE). Similarly, Figure 2 illustrates the two-dimensional graphs of the function $u(x, t)$,

computed through ABq-EHATM for the same set of fractional values, demonstrating the influence of α on the solution behavior. Additionally, the numerical results corresponding to the computed solutions $u(x,y,t)$ and $v(x,y,t)$ for different values of α (i.e., $\alpha = 0.6, \alpha = 0.7, \alpha = 0.8, \alpha = 0.9,$ and $\alpha = 1$) are systematically tabulated in Tables 1 and 2, providing a comparative analysis of the obtained outcomes.

6. Conclusion

The ABq-EHATM exhibits significant potential as a viable methodology for the resolution of the ABCTFCBE. The method's capacity to decompose intricate equations into more manageable components, in conjunction with its precision and alignment with other numerical approaches, renders it a useful asset in the realm of mathematics. Additionally, the ABq-EHATM presents numerous benefits in comparison to conventional numerical methods, rendering its implementation more straightforward and yielding enhanced precision. The numerical solutions for ABCTFCBE have been rapidly and effectively acquired. Thus, it can be inferred that ABq-FHATM is highly efficient and resilient in generating numerical solutions for a wide range of Atangana-Baleanu fractional partial differential equations. Due to its considerable potential, it is anticipated that this approach will assume a progressively significant role in addressing nonlinear differential equations in the forthcoming years. Consequently, researchers are strongly encouraged to delve deeper into its prospective applications.

Statement of Conflict of Interest

The author declare that there is no conflict of interest.

Author's Contributions

The author declares that he has contributed 100% to the article.

References

Anaç H. Conformable fractional Elzaki decomposition method of conformable fractional space-time fractional Telegraph equations. Ikonion Journal of Mathematics 2022; 4(2): 42-55.

Ahmed HF., Bahgat MSM., Zaki M. Analytical approaches to space-and time-fractional coupled Burgers' equations. Pramana 2019; 92: 1-14.

Alkan A., Anaç H. A new study on the Newell-Whitehead-Segel equation with Caputo-Fabrizio fractional derivative. AIMS Mathematics 2024; 9(10): 27979-27997.

Atangana A., Baleanu D. New fractional derivatives with nonlocal and non-singular kernel: theory and applications to heat transfer model. arXiv preprint arXiv:1602.03408 2016; 20: 763–769.

Atangana A. Non validity of index law in fractional calculus: A fractional differential operator with markovian and non-markovian properties. Physica A: Statistical Mechanics and Its 2018; 505: 688-706.

Baleanu D., Diethelm K., Scalas E., Trujillo JJ. Fractional calculus: Models and Numerical Methods. World Scientific: Singapore 2012; 3: 15.

Baleanu D., Jajarmi A., Mohammadi H., Rezapour S. A new study on the mathematical modelling of human liver with Caputo–Fabrizio fractional derivative. Chaos, Solitons and Fractals 2020; 134: 109705.

Bateman H. Some recent researhes on three motion of fluids. Monthly Weather Review 1915; Rec. 43: 163-170.

Caputo M., Elasticita e dissipazione. Zanichelli, 1969, Bologna.

Caputo M., Fabrizio M. A new definition of fractional derivative without singular kernel. Progress in Fractional Differentiation and Applications 2015; 1(2): 73-85.

Elzaki TM. Application of new transform "Elzaki transform" to partial differential equations. Global Journal of Pure and Applied Mathematics 2011; 7: 65-70.

Elzaki TM. The new integral transform 'Elzaki transform'. Global Journal of Pure and Applied Mathematics 2011; 7: 57-64.

Elzaki TM., Hilal EM. Homotopy perturbation and Elzaki transform for solving nonlinear partial differential equations. Mathematical Theory and Modeling 2012; 2: 33–42.

Engheta N. Fractional duality in electromagnetic theory. Proceeding of the URSI international symposium on electromagnetic theory, Thessaloniki, Greece 1998; 44(4): 554-566.

Esipov SE. Coupled Burgers equations: A model of polydispersive sedimentation. Physical Review E 1995; 52(4): 3711.

Fernandez A., Ozarslan MA., Baleanu D. On fractional calculus with general analytic kernels. Applied Mathematics and Computation 2019; 354: 248–265.

Güngör H. The efficient method to solve the conformable time fractional Benney equation. Journal of Mathematics 2024; 1: 3676521.

Haroon F., Mukhtar S., Shah R. Fractional view analysis of Fornberg–Whitham equations by using Elzaki transform. Symmetry 2022; 14(10): 2118. https://doi.org/10.3390/sym14102118.

Hristov J. On the Atangana–Baleanu derivative and its relation to the fading memory concept: the diffusion equation formulation. In: Trends in theory and applications of fractional derivatives with Mittag–Leffler kernel. AG: Springer Nature 2019, Switzerland.

Jain PC., Holla DN. Numerical solutions of coupled Burgers' equation. International Journal of Non-linear Mechanics 1978; 13: 213-222.

Kilbas AA., Srivastava HM., Trujillo JJ. Theory and applications of fractional differential equations. North-Holland Math. Studies, Elsevier 2006, Netherlands.

Kürkçü ÖK., Aslan E., Sezer M. A novel graph-operational matrix method for solving multidelay fractional differential equations with variable coefficients and a numerical comparative survey of fractional derivative types. Turkish Journal of Mathematics 2019; 43(1): 373-392.

Liu J., Hou G. Numerical solutions of the space-and time-fractional coupled Burgers equations by generalized differential transform method. Applied Mathematics and Computation 2011; 217(16): 7001-7008.

Machado JT., Kiryakova V., Mainardi F. Recent history of fractional calculus. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 2011; 16: 1140–1153.

Miller KS., Ross B. An introductionto fractional calculus and fractional differential equations. A Wiley 1993, New York.

Partal T. Numerical solution of some nonlinear partial differential equations by finite difference method. Firat University, Science İnstitute Master's Thesis 2021, Elazığ.

Podlubny I. Fractional differential equations, mathematics in science and engineering. Academic Press 1999, New York.

Veeresha P., Prakasha DG., Baskonus HM. Solving smoking epidemic model of fractional order using a modified homotopy analysis transform method. Mathematical Sciences 2019; 13: 115-128.

Prakasha DG., Veeresha P., Rawashdeh MS. Numerical solution for (2+1) dimensional time-fractional coupled Burger equations using fractional natural decomposition method. Mathematical Methods in the Applied Sciences 2019; 42(10): 3409-3427.

Qureshi S., Rangaig NA., Baleanu D. New numerical aspects of Caputo- Fabrizio fractional derivative operator. Mathematics 2019; 7(4): 374.

Shah R., Saad AA., Weera W. A semi-analytical method to investigate fractional-order gas dynamics equations by Shehu transform. Symmetry 2022; 14: 1458.

Uçar Y., Yağmurlu NM., Yiğit MK. Numerical solution of the coupled Burgers equation by trigonometric B-spline collocation method. Mathematical Methods in the Applied Sciences 2023; 46(5): 6025-6041.

Yağmurlu M., Gagir A. Numerical simulation of two dimensional coupled Burgers equations by Rubin-Graves type linearization. Mathematical Sciences and Applications E-Notes 2021; 9(4): 158-169.

Yağmurlu M., Gagir A. A finite difference approximation for numerical simulation of 2D viscous coupled burgers equations. Mathematical Sciences and Applications E-Notes 2022; 10(3): 146-158.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2483-2515, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2483-2515, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Türkiye'de Konut Fiyat Endeksi için Hedonik Model Analizi: Osmaniye Örneği

İbrahim ÖZTÜRK[1*], Furkan Sinan GÜRBAZ[2]

[1,2] Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0003-3149-0527
[2]https://orcid.org/0009-0005-3077-0406
*Sorumlu yazar: ibrahimozturk@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 02.02.2025
Kabul tarihi:11.07.2025
Online Yayınlanma: 15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Hedonik fiyat modeli
Konut fiyatı
Osmaniye
Deprem
Ev
Emlak piyasası
Fiyat tahmini
Konut özellikleri

ÖZ

Konut sektör piyasası hem bireylerin yaşam standartlarını hem de ekonomilerin genel sağlığını etkileyen kritik bir piyasadır. Özellikle doğal afetler gibi ani ve büyük ölçekli olaylar, emlak piyasasında önemli yapısal değişikliklere yol açabilmektedir. Gelişmekte olan bir şehir olan Osmaniye de 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler etkisiyle emlak piyasasında belirgin yapısal ve ekonomik değişiklikler yaşamıştır. Bu çalışmanın amacı, Osmaniye ilindeki konut fiyatlarını etkileyen faktörleri ilgili deprem sonrası dönemlerde hedonik fiyat yöntemi ile analiz etmektir. Çalışma kapsamında, Osmaniye iline ait satılık ve kiralık konut ilanlarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu veriler, konut fiyatlarını etkileyen faktörlerin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanımıştır. Bağımlı değişken olarak konut fiyatı, bağımsız değişkenler olarak ise konutun tipi (daire, müstakil ev vb.) ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, net kullanım alanı, oda sayısı, bina yaşı, bulunduğu kat ve yakıt tipi gibi değişkenlerin konut fiyatları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler yarattığı tespit edilmiştir.

Hedonic Analysis for Residential Property Price Index in Türkiye: A Case Study of Osmaniye

Research Article

Article History:
Received: 02.02.2025
Accepted: 11.07.2025
Published online: 15.12.2025

Keywords:
Hedonic price model
Housing price
Osmaniye
Earthquake
House
Real Estate market
Price prediction
House features

ABSTRACT

The housing sector is a critical market that influences both individuals' living standards and the overall health of economies. Sudden and large-scale events, such as natural disasters, can lead to significant structural changes in the real estate market. Osmaniye, a developing province, experienced notable structural and economic changes in its real estate market due to the 2023 Kahramanmaraş-centered earthquakes. The aim of this study is to analyze the factors affecting property prices in Osmaniye during the post-earthquake periods using the Hedonic Pricing Method. Within the scope of the study, data were obtained from sale and rental property listings specific to Osmaniye. These data allowed for a detailed examination of the factors influencing property prices. The dependent variable was defined as the property price, while the independent variables were determined as the type of property (apartment, detached house, etc.) and its physical characteristics. The analysis revealed that variables such as net usable area, number of rooms, building age, floor level, and type of heating system had statistically significant effects on property prices.

To Cite: Öztürk İ., Gürbaz FS. Türkiye'de Konut Fiyat Endeksi için Hedonik Model Analizi: Osmaniye Örneği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2483-2515.

1. Giriş

Konut fiyatları Türkiye'nin makroekonomik yapısıyla yakından ilişkilidir. Fiyatları belirleyen pek çok unsur arasında evin cephesi, konumu, bulunduğu kat, yaşı, oda sayısı gibi konutun fiziki özellikleri yer almaktadır. Bu bağlamda konut için doğru değerleme büyük önem taşımaktadır (Tekin ve Sarı, 2022; Öztürk, 2023). Söz konusu faktörler, yalnızca konut fiyatlarının belirlenmesinde değil, aynı zamanda kullanıcıların konutlar ile olan ilişkilerinde de önemli bir rol oynamaktadır (Dayı ve Gencan, 2024).

İnsanlar, günlük yaşamlarının büyük bir kısmını konutlarında geçirirken, bu mekanlar sakinleriyle sürekli bir etkileşim içinde bulunmaktadır. Değişen yaşam standartları ve koşulları, konut ile kullanıcısı arasındaki ilişkiyi yeniden şekillendirmekte, bu etkileşimi büyük ölçüde fiziksel çevre unsurları yönlendirmektedir (Turgay, 2013; Karagülle, 2024). Günümüz yaşam koşullarındaki değişimle birlikte, konutlarda yaşayan kişi sayısı, oda düzeni ve konutların boyutları da önemli farklılıklar göstermeye başlamıştır (Öztürk ve Yıldırım, 2022). Bu değişimler, mekânın tasarımında kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayacak işlevsel ve estetik çözümler üretilmesini zorunlu kılmaktadır.

Konut kullanıcılarının ihtiyaç ve beklentilerine göre tasarlanan her bir mekânın işlevsel ve estetik kalitesi, bireylerin taleplerini karşılayabilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Mekânın mimari özellikleri, oda sayısı ve boyutları gibi dengeli ve uyumlu bir düzenleme, kullanıcı memnuniyetini artıran temel faktörler arasındadır. İnsan ve mekân arasındaki ilişkiler doğru şekilde tasarlandığında, kullanıcıların yaşam konforu ve kalitesi üzerinde olumlu bir etki oluşturabilmektedir (Yıldırım ve ark., 2020).

Hedonik Fiyat Modeli (HFM), doğrudan bir piyasası bulunmayan ancak piyasa fiyatı belirlenmiş malların fiyat endekslerini oluşturmaya yönelik bir yaklaşımdır (Owusu-Ansah, 2011). Bu model, aynı zamanda bir değerleme yöntemi olup, bir ürünün değerini, içeriğinde barındırdığı çeşitli özellikler üzerinden analiz etme altyapısı da sunabilmektedir. Piyasada yer alan emlak ürünleri genellikle birçok özelliği bir arada bulundurur. Ancak bu özellikler tek tek pazarlanamadığından ürün, bir bütün olarak değerlendirilir. Bu durumda, tüketiciler ürünün sahip olduğu özelliklerin fiyatlarını doğrudan belirleme imkanına sahip olamazlar. Ürünü satın alırken, sunduğu faydanın kendi ihtiyaçlarına uygun olmasını beklerler. Beklenen bu fayda düzeyi ise, ürünün bünyesinde barındırdığı farklı özelliklerin türüne ve miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Çiçek ve Hatırlı, 2015).

Çalışmanın amacı, konutun fiziksel özelliklerinin emlak fiyat endeksindeki değişimine etkisini belirlemek ve bu değişimi Hedonik Fiyat Modeli yardımıyla yordayarak test etmektir. Çalışma kapsamında, evin büyüklüğü, oda sayısı, yaşı ve diğer fiziksel özelliklerinin emlak fiyatı üzerindeki etkileri belirlenecektir. Bu kapsamda, 2023 yılında Kahramanmaraş merkezli meydana gelen depremin etkilerini yakından yaşayan illerden biri olan Osmaniye, analiz için örnek il olarak seçilmiştir. Söz konusu depremin, Osmaniye'nin emlak piyasası üzerinde belirgin etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Depremin yol açtığı yapısal ve ekonomik değişimler, emlak fiyatlarında kayda değer dalgalanmalara neden olmuştur (Doğan ve ark., 2024).

Hedonik fiyat modelinde, analiz edilen verilerin belirli kriterlere göre daraltılması veya filtrelenmesi, modelin doğruluğunu artırarak daha güvenilir ve anlamlı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu nedenle çalışmanın analiz aşamasında; emlak fiyat aralığına uygun olmayan veriler, oda ve salon sayısı bakımından belirlenen kriterlere uymayan konutlar ve analiz kapsamı dışında kalan konut tipleri filtrelenmiştir. Böylece tutarlı ve güvenilir bir veri setinin oluşturulması amaçlanmıştır.

Veri analizi süreçlerinde karşılaşılan önemli sorunlardan biri, eksik veri (missing data) problemidir (Kürşad ve Nartgün, 2015). Eksik ya da tamamlanmamış veri değerlerinin tahmini değerlerle doldurulması süreci ise veri tamamlama (data imputation) olarak adlandırılmaktadır. Bu süreç, analizlerin doğruluğunu artırmak açısından önemli bir adımdır. Bu yöntem, eksikliklerin mevcut verilerle ilişkilendirilebileceği ve bu verilerle anlamlandırılabileceği varsayımına dayanır (Jadhav ve ark., 2019). Eksik verilerin tamamlanmasında, merkezi eğilim ölçüleri (örneğin ortalama, medyan ve mod) ya da istatistiksel modeller (örneğin regresyon, K-ortalamaları, PCA) kullanılabilir (Santos ve Acosta, 2023). Bu çalışmada da eksik veriler, ilgili özelliğin analiz edilen ilanlar veya potansiyel alıcılar için ayırt edici bir öneme sahip olup olmadığı göz önünde bulundurularak doldurulmuştur.

Çalışmada, 2024 yılı temmuz ayında Osmaniye iline ait emlak piyasası verileri analiz edilerek konut fiyatlarını etkileyen faktörler incelenmiştir. Çalışma kapsamında hem satılık hem de kiralık ilanlara ait veriler dikkate alınmıştır. Diğer yandan analizde tutarlılığı sağlamak amacıyla sadece konut tipi "daire" olan veriler kullanılmak üzere bir filtreleme işlemi uygulanmıştır. Bu seçimin nedeni, daire türündeki konutların veri setinde en büyük oranı oluşturması ve diğer konut tiplerinin (örneğin, arsa veya çok katlı villa gibi) fiyat dağılımını önemli ölçüde etkilemesidir. Özellikle, bu tür konutların yüksek fiyat aralıklarına sahip olması, veri dağılımında aşırı uçlara neden olarak analiz sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Araştırma, Osmaniye'nin gelişmekte olan yapısını ve 2023 Kahramanmaraş merkezli depremin ilin emlak piyasasına olan etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, depremden etkilenen bu il, çalışmanın kapsamına dâhil edilmiştir. Deprem sonrası konut özellikleri ve piyasa yapısındaki çeşitlilik, fiyatlara etki eden faktörlerin daha ayrıntılı analiz edilmesine olanak tanımıştır. Bu çeşitlilik, emlak piyasasındaki farklı faktörlerin etkilerinin daha kapsamlı bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada, fiyat bağımlı değişken olarak diğer nitelikler ise bağımsız değişkenler olarak değerlendirilecektir. Bu nitelikler arasında konum (ilçe ve mahalle), fiziksel özellikler (oda ve salon sayısı, brüt/net m², bulunduğu kat, bina yaşı, kat sayısı), donanım (ısınma tipi, eşya durumu, banyo sayısı, yapı tipi ve durumu, kullanım durumu), hukuki ve finansal faktörler (tapu durumu, krediye uygunluk, takas imkânı) ile çevresel özellikler (cephe, site içerisinde olup olmama durumu, yakıt tipi, kira getirisi, aidat ve yetkili ofis bilgisi) yer almaktadır.

Çalışmada, Osmaniye iline ait emlak ilanlarından elde edilen veriler analiz edilerek, konut fiyatlarını etkileyen faktörler incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan yöntemler ve veri işleme adımları, sistematik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Hedonik Fiyat Modeli kullanılarak fiyat analizinde kullanılan

temel metriklerin tanıtımı, analiz performansını iyileştirmek amacıyla uygulanan filtreleme yöntemleri ve son olarak ise eksik veri yönetimi süreçleri ele alınmıştır.

2.1. Veri

Bu çalışmada, Osmaniye iline ait satılık ve kiralık konut ilanlarından elde edilen veriler kullanılarak Housing2024OsmaniyeV1 adlı veri seti oluşturulmuştur. Temmuz 2024 tarihli bu veri seti, toplam 863 emlak ilanını içermektedir.

2.2. Veri Seti

Housing2024OsmaniyeV1 veri seti konut ilan fiyatlarına ek olarak konut ilanlarına ait fiziksel ve konumsal özellikleri barındırmaktadır. Veri setinde yer alan veriler Tablo 1 üzerinde listelenmiştir.

Tablo 1. Veri setinde yer alan değişkenler ve tanımlamaları

Değişken Adı	Veri Tipi	Örnek	Açıklama
Fiyat	Tam Sayı	1200000	Gayrimenkul değeri
Şehir	Metin	Osmaniye	İlanın bulunduğu il
İlçe	Kategorik	Toprakkale	İlanın bulunduğu ilçe
Mahalle	Kategorik	İstiklal	İlanın bulunduğu mahalle
İlan Durumu	Kategorik	Satılık, Kiralık	İlanın satılık/kiralık olma durumu
Konut Tipi	Metin	Daire	İlandaki konutun tipi
Konut Şekli	Kategorik	Daire, Dubleks, Çatı Dubleksi, Bahçe Katı, Müstakil Ev, Ara Kat Dubleks	İlandaki konutun yapı şekli
Oda+Salon Sayısı	Kategorik	1+1,2+1, 3+1,4+1	Oda ve salon kombinasyonu
Brüt/Net m²	Tam Sayı	80, 90, 120	İlandaki konutun toplam ve kullanılabilir net alanı
Bulunduğu Kat	Tam Sayı	1, 2, 3, 4	İlandaki konutun bulunduğu kat
Bina Yaşı	Tam Sayı	1, 2, 3, 4	İlandaki konutun yer aldığı binanın yaşı
Isınma Tipi	Kategorik	Kombi, Klima, Yerden Isıtma, Soba, Doğalgaz Sobası	İlandaki konutun ısınma sistemi
Kat Sayısı	Tam Sayı	1, 2, 3, 4	İlandaki konutun yer aldığı yapının toplam kat adedi

Krediye Uygunluk	Kategorik	Uygun, Uygun değil	İlandaki konutun kredi uygunluk durumu
Eşya Durumu	Kategorik	Eşyalı, Eşyalı Değil	İlandaki konutun eşyalı olup olmadığı
Banyo Sayısı	Tam Sayı	1, 2, 3, 4	İlandaki konutta yer alan banyo sayısı
Yapı Tipi	Kategorik	Betonarme, Taş Bina, Ahşap	İlandaki konutun yapısal tipi
Yapının Durumu	Kategorik	Sıfır, İkinci el	İlandaki konutun yer aldığı yapının genel durumu
Kullanım Durumu	Kategorik	Boş, Mülk Sahibi, Kiracılı, Belirtilmemiş	İlandaki konutun kullanımda olup olmadığı
Tapu Durumu	Kategorik	Kat irtifakı, Kat mülkiyeti, Arsa	İlandaki konutun tapu tipi
Aidat	Tam Sayı	500	İlandaki konutun aidat ücreti
Takas	Kategorik	Evet, Hayır	İlandaki konutun takas durumu
Cephe	Kategorik	Kuzey, Güney, Doğu, Batı	İlandaki konutun cephesi
Yetkili Ofis	Kategorik	Evet, Hayır	İlandaki konut için yetkili emlak ofisi bilgisi
Yakıt Tipi	Kategorik	Doğalgaz, Elektrik, Kömür-Odun	İlandaki konut için ısınmada kullanılan yakıt türü

2.3. Hedonik Fiyat Modeli

Konut fiyatlarını belirlemede kullanılan önemli yaklaşımlardan biri Hedonik Fiyat Modelidir. Hedonik Fiyat Modeli, konutların iç ve dış fiziksel özellikleri ile konumlarını konut fiyatlarıyla ilişkilendirerek fiyatların belirlenmesinde etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Kördiş ve ark., 2014; Yayar ve Karaca, 2014).

Hedonik Fiyat Modeli (Selim ve Demirbilek, 2009), konutun çeşitli özelliklerinin her birinin fiyat üzerindeki tekil etkilerini hesaplayarak, genel fiyat tahminini sağlamaktadır. Bu model, diğer değişkenler sabit tutulduğunda konutun bir veya daha fazla özelliğinin fiyat üzerindeki etkilerini ölçen bir yöntemdir. Yalnızca istatistiksel değil, aynı zamanda tüketici teorisine dayanan teorik bir temele sahiptir (Öztürk, 2023). Hedonik fiyat teorisi, bir malın nitelik veya karakteristik özellikleri ile fiyatı

arasındaki ilişkiyi araştırarak, bu özelliklerin fiyat üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılmaktadır (Üçdoğruk, 2001). Model aşağıdaki gibi karakterize edilebilmektedir:

$$P_i = F(Q_i) \quad (1)$$

$\boldsymbol{P_i}$ konutun piyasa fiyatını, $\boldsymbol{Q_i}$ konutun sahip olduğu çeşitli özelliklerini (örneğin, oda sayısı, konum, bahçe büyüklüğü), **i** veri setindeki her bir gözlemi temsil eden bir numarayı, **F** heterojen özelliklerin (odaların sayısı, konum gibi) konutun fiyatına nasıl dönüştüğünü göstermektedir.

Hedonik Fiyat Modeli yöntemi, konut ve emlak fiyatlarının bağımsız değişkenlerini analiz etmek için regresyon analizlerini kullanır. Lineer regresyon modeli analizi, bağımlı değişken olarak ele alınan varlık fiyatı ile bağımsız değişkenler tarafından temsil edilen çeşitli özellikler arasındaki ilişkiyi incelemektedir (Şevgin, 2023). Hedonik fiyatlandırmanın ana prensibi, tüketicilerin bir ürünün veya hizmetin doğrudan kendisinden ziyade, sunduğu özellikler temelinde değer biçmeleridir. Bu yaklaşım, özellikleri farklılık gösteren bir ürünün her bir özelliğinin fiyat üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir (Kördiş ve ark., 2014).

Veri setinde yer alan fiziksel ve konumsal özellikler, konut fiyatları üzerindeki etkileri analiz edilebilmek amacıyla hedonik fiyat modeline dâhil edilmiştir. Çalışmada, Hedonik Fiyat Modeli kapsamında kullanılan bağımsız değişkenlerin konut fiyatları üzerindeki etkileri değerlendirilirken, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini ölçmek amacıyla performans metrikleri kullanılmıştır. Aşağıda bu metrikler ve değerlendirme kriterleri detaylandırılmaktadır.

2.3.1. Performans ve Değerlendirme

Regresyon analizlerinde kullanılan performans metrikleri, modelin doğruluğunu, modelin performansını ve tahmin başarısını değerlendirmek için önemlidir. Bu metrikler arasında R-Kare (R^2), Ortalama Karesel Hatası (MSE), Kök Ortalama Karesel Hatası (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) yer almaktadır. Performans metrikleri, modelin tahminlerinin ne kadar doğru olduğunu ve gerçek verilerle ne kadar uyumlu olduğunu ölçerek modelin genel performansını değerlendirmektedirler (Şahin ve Çubukçu, 2024).

2.3.1.1. R-Kare (R^2)

Regresyon analizinde hesaplanan R^2 değeri, modelin tahmin ettiği değerlerin gerçek değerlerle ne kadar iyi örtüştüğünü gösterir. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça, modelin veriye ne kadar uyum sağladığını gösterir. Düşük R^2 değerleri ise genellikle modelin açıklayıcılığının sınırlı olabileceğine işaret eder, ancak bu durum her zaman modelin tamamen yetersiz olduğunu göstermez. Bu nedenle, yüksek (1'e yakın) R^2 değeri regresyon modeli için istenen bir çıktı olarak kabul edilmektedir. Bu kriter, regresyon modelinin

veriyle uyumunu ve öngörü kapasitesini ölçmek amacıyla kullanılır. R^2 değerlendirme kriteri Denklem 2 üzerinde verilmiştir (Güler ve Kandemir, 2022).

$$R^2=1-\frac{\sum_{j=1}^{N}(Y_j-\hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N}(Y_j-\hat{Y})^2} \quad (2)$$

$\boldsymbol{R^2}$ modelin bağımlı değişkenin ne kadarını açıkladığını, $\boldsymbol{Y_j}$ gerçek değerleri, $\boldsymbol{\hat{Y}_j}$ tahmin edilen değerleri, $\boldsymbol{\hat{Y}}$ gerçek değerlerin ortalamasını, $\boldsymbol{j}$ veri setindeki her bir gözlemi ve $\boldsymbol{N}$ toplam örnek sayısını göstermektedir.

R-kare, regresyon analizlerinde bağımsız değişkenin bağımlı değişkendeki varyansı ne kadar iyi açıkladığını ölçen bir metriktir. Yorumlanabilirliği kolaylaştırmak adına genellikle yüzde formatında da ifade edilir. 0 olması, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki varyansı açıklamada yetersiz kaldığını, yani modelin başarısız olduğunu gösterir. 1 olması ise bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki tüm varyasyonu eksiksiz açıkladığını belirtir. (Gider ve Budak, 2024).

2.3.1.2. Ortalama Karesel Hata (MSE)

Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error - MSE), bir tahmin modelinin hata oranını ve başarımını hataların karelerinin ortalamasıyla değerlendiren bir metriktir. MSE, gerçek değerlerle tahmin edilen değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasını ifade eder. Gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki fark ne kadar küçükse, model o kadar başarılı tahmin yapmış olur. MSE değeri sıfıra yaklaştığında, tahminlerin doğruluğu artar. Modelin performansı daha yüksek olarak değerlendirilir (Tatachar, 2021). MSE kriteri Denklem 3 üzerinde verilmiştir (Güler ve Kandemir, 2022):

$$MSE=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}(Y_j-\hat{Y}_j)^2 \quad (3)$$

MSE, tahminler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasını, **N** veri kümesindeki toplam örneklem sayısını, $\mathbf{Y_j}$ gerçek değerleri, j veri setindeki her bir gözlemi, $\boldsymbol{\hat{Y}_j}$ ise tahmin edilen değerleri ifade etmektedir.

MSE değeri her zaman pozitif olup, negatif işaretlerin etkisini ortadan kaldırmak için hata karelerinin alınmasıyla hesaplanır. MSE sıfıra ne kadar yakın olursa model tahminlerinin o kadar doğru olduğunu gösterir (Güler ve Kandemir, 2022).

2.3.1.3. Kök Ortalama Karesel Hatası (RMSE)

Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error - RMSE), tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki hata karelerinin ortalamasının karekökü alınarak hesaplanır. RMSE değerlendirme kriteri Denklem 4 üzerinde verilmiştir. Gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki hata

büyüklüğünü ölçen bir performans metriğidir. RMSE değeri, tahminlerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu gösterir ve model performanslarını karşılaştırmak için sıklıkla kullanılmaktadır (Akdere ve ark., 2023).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} \frac{(\hat{Y}_j - Y_j)^2}{N}} \quad (4)$$

RMSE, hata büyüklüğünü değerlendiren hata metriği, **N** veri kümesindeki toplam örnek sayısını, **j** veri setindeki her bir gözlemi, $\boldsymbol{Y_j}$ gerçek değerleri, $\boldsymbol{\hat{Y}_j}$ tahmin edilen değerleri gösterir.

RMSE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların (yani tahmin hatalarının) standart sapmasını ölçer. Böylelikle tahmin hatalarının regresyon modelinin veri noktalarına ne kadar uzaklıkta olduğunu ve bu hataların ne derece yayıldığını gösterir. RMSE değeri, 0'dan sonsuza kadar geniş bir aralıkta olabilir; 0 olan RMSE değeri, modelin hiç hata yapmadığını ve mükemmel bir tahmin performansı sergilediğini ifade eder (Özen ve ark., 2021).

2.3.1.4. Ortalama Mutlak Hatası (MAE)

Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE), regresyon analizlerinde sıkça tercih edilen bir değerlendirme ölçütüdür. Gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasını hesaplamaktadır. MAE, her bir gözlemi eşit derecede değerlendirerek küçük hataları da büyük hatalar kadar dikkate alır. MAE değeri 0'dan başlayarak pozitif sonsuza kadar değişebilir (Sayraç ve Yalçın, 2024). MAE sıfıra yaklaştığında, modelin tahminleri gerçek değerlere daha yakın hale gelir. Böylelikle modelin daha başarılı olduğunu gösterir. Ayrıca, MAE hataların karelerinin değil mutlak değerlerinin dikkate alınması nedeniyle, uç değerlerden daha az etkilenir. Bu durum, veri setlerinde aşırı büyük hataların model performansını bozmasını önler (Akdere ve ark., 2023). MAE değerlendirme kriteri Denklem 5 üzerinde verilmiştir:

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} |Y_j - \hat{Y}_j| \quad (5)$$

MAE, tahminler ile gerçek değerler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasını, **N** veri kümesindeki toplam örnek sayısını, **j** veri setindeki her bir gözlemi, $\boldsymbol{Y_j}$ gerçek değerleri, $\boldsymbol{\hat{Y}_j}$ tahmin edilen değerler, $|\boldsymbol{Y_j} - \boldsymbol{\hat{Y}_j}|$ ise her bir gözlem için gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki mutlak farkı ifade eder. Sadece farkın büyüklüğüne bakılır. Bu mutlak farkların ortalaması alınarak modelin tahmin performansı değerlendirilir. Farkın küçük olması durumunda tahminlerin gerçeğe yakın olduğunu ve modelin iyi bir performans sergilediğini gösterir (Akdere ve ark., 2023).

Model performansını değerlendirmek için R^2, MSE, RMSE, MAE metriklerinin kullanılabildiği gösterilmiştir. Bu metrikler, modelin tahmin doğruluğunu ve hata büyüklüğünü farklı açılardan

inceleyerek genel performans hakkında bilgi sağlamaktadır. R-Kare (R^2 modelin bağımlı değişkendeki varyansı ne kadar iyi açıkladığını gösterir. Ortalama Mutlak Hata (MAE), tahminlerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu mutlak farklar üzerinden ölçer. Ortalama Karesel Hatası (MSE), tahmin hatalarının karelerinin ortalamasını alarak hata büyüklüğünü daha belirgin hale getirir ve büyük hataların etkisini artırır. RMSE ise MSE'nin karekökünü alarak tahmin hatalarının standart sapmasını hesaplar ve hata büyüklüğünü orijinal veri birimleriyle ifade eder. Bu metrikler, modelin performansını çeşitli açılardan değerlendirir: R-Kare modelin uyumunu, MAE ve RMSE tahminlerin doğruluğunu, MSE ise hata büyüklüğünü ölçer.

Modelin performans değerlendirmesinin ardından, analiz sürecinin bir sonraki aşaması olan veri filtreleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, analiz için uygun olmayan veya eksik değerlere sahip veriler ayıklanarak modelleme sürecine uygun bir veri seti oluşturulmuştur.

2.4. Filtreleme

Bu bölümde, çalışmada kullanılan veri setinin analize uygun hale getirilmesi amacıyla uygulanan filtreleme yöntemleri açıklanmıştır. Filtreleme, veri setini analiz için uygun hale getirme sürecidir. Çalışmada bu aşama, veri setindeki hatalı, aşırı uçlara sahip veya analizle doğrudan ilişkili olmayan verileri elemek amacıyla uygulanmıştır. Filtreleme işlemleri, analiz sonuçlarının doğruluğunu ve tutarlılığını sağlamak, yanıltıcı etkilerden kaçınmak ve verilerin homojenliğini artırmak için kritik bir aşamadır.

Bu kapsamda, veri seti çeşitli kriterlere göre incelenmiş ve belirli sınırlar dahilinde düzenlenmiştir. Öncelikle, çalışmanın odak noktası olan "daire" tipi konutlar dışındaki diğer konut tipleri veri setinden çıkarılmıştır. Ardından, fiyat verilerinde hem alt hem de üst eşikler belirlenerek, bu sınırların dışında kalan uç değerler analiz dışında bırakılmıştır. Ayrıca, oda ve salon sayıları gibi özelliklerde yaygın olmayan ve potansiyel veri hatası içeren kayıtlar da filtrelenmiştir.

Filtreleme işlemleri, veri setini daha güvenilir ve tutarlı hale getirerek analiz sürecinin temelini oluşturmuştur. Bu süreçte alınan kararlar ve uygulanan yöntemler, çalışmanın bilimsel bütünlüğünü koruma amacı taşımaktadır.

2.4.1. Konut Tipi Filtresi

Çalışmada, analizde tutarlılığı sağlamak amacıyla sadece konut tipi "daire" olan veriler kullanılmak üzere bir filtreleme işlemi uygulanmıştır. Bu seçimin nedeni, Osmaniye ilinde daire türündeki konutların veri setinde en büyük oranı oluşturması ve diğer konut tiplerinin (örneğin, çiftlik evi veya çok katlı villa gibi) fiyat dağılımını önemli ölçüde etkilemesidir. Özellikle, bu tür konutların yüksek fiyat aralıklarına sahip olması, veri dağılımında aşırı uçlara neden olarak analiz sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu doğrultuda, veri setinde toplam 209 adet (%19,49) daire dışı konut tipi analiz dışı tutulmuş, analizler yalnızca "daire" tipi olan 863 veri (%80,50) ile gerçekleştirilmiştir. Konut tipi sayılarının dağılımı Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Filtre öncesi konut tiplerinin sayısal dağılımı

Konut Tipi	Adet	Oran (%)
Daire	863	80,51
Müstakil Ev	171	15,95
Yazlık	18	1,68
Villa	9	0,84
Köy Evi	4	0,37
Çiftlik Evi	4	0,37
Bina	3	0,28
Toplam	**1072**	**100,00**

2.4.2. Fiyat Filtresi

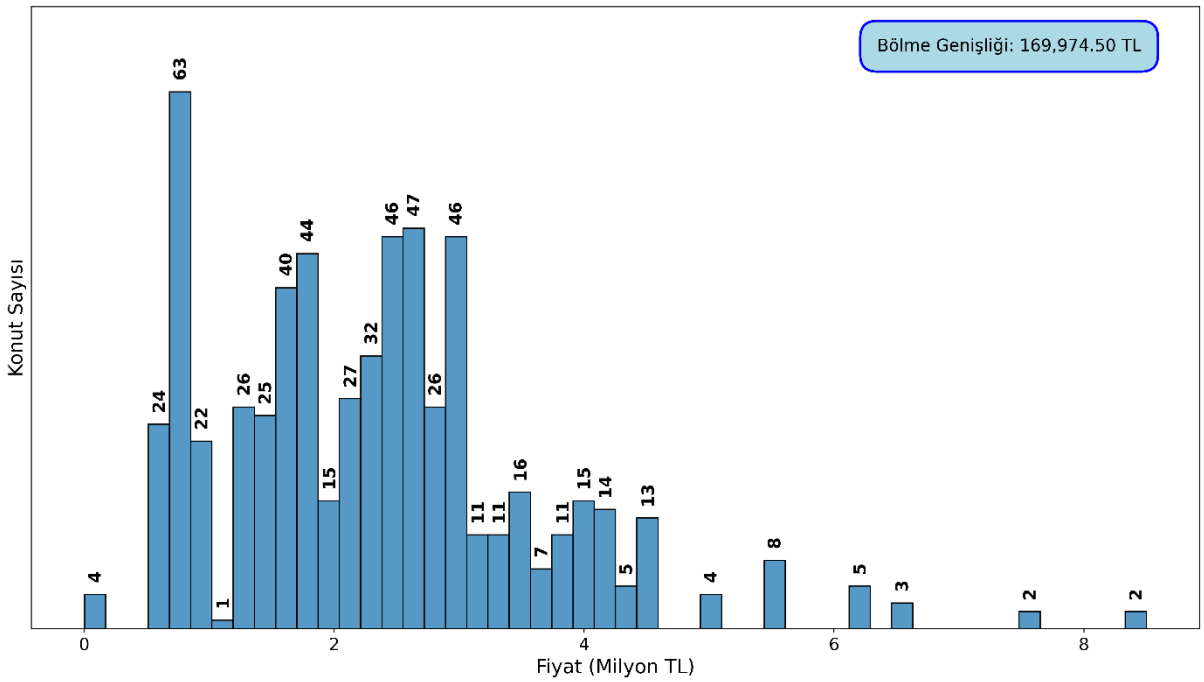
Fiyat filtresi hem satılık hem de kiralık daire ilanlar için 2'ye ayrılmıştır.

2.4.2.1 Satılık İlanlarda Fiyat Filtresi

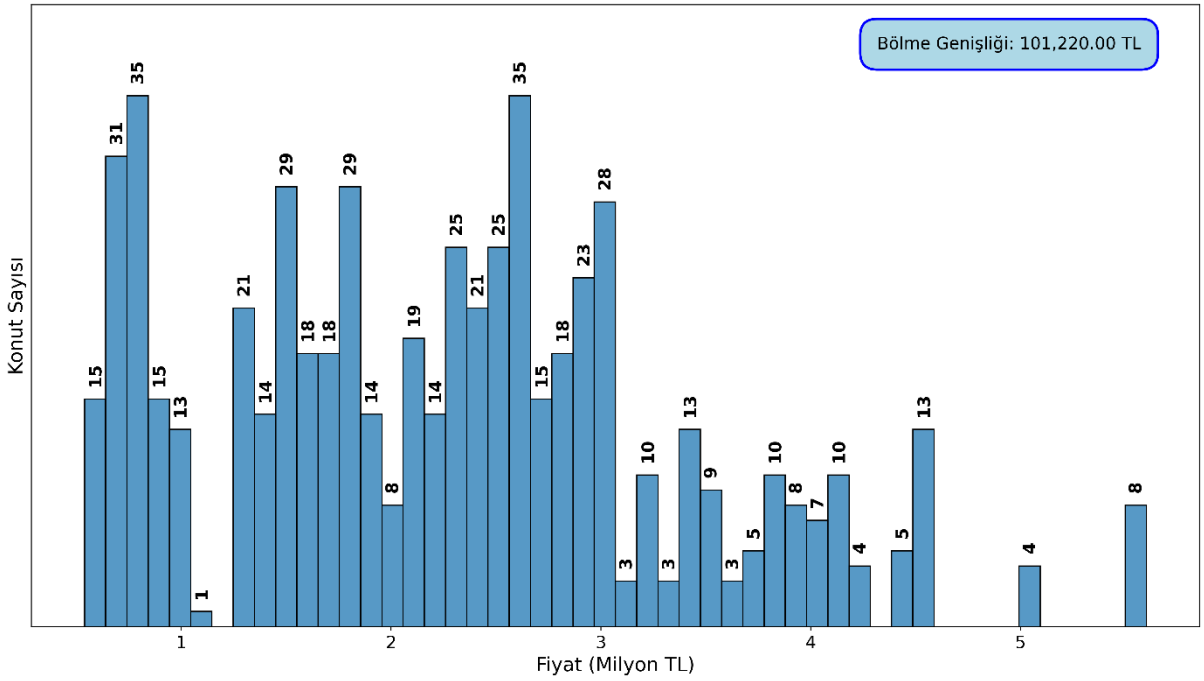
Sadece "daire" tipi konutlar için yapılan analizde, satılık ilanlarda Tablo 3'te gösterildiği gibi, 6 milyon TL fiyat eşiği belirlenmiştir. Bu sınırın amacı, fiyat dağılımındaki aşırı uçları kontrol ederek analizin doğruluğunu korumaktır. Belirlenen bu eşik sayesinde, eşik üstü fiyatlandırılan toplam 12 (%1,95) ilan ve alt eşik olan 500 bin TL altında fiyatlandırılan 4 (%0,65) ilan veri setinden çıkarılmıştır. Şekil 1, fiyat filtresi uygulanmadan önceki fiyat dağılımını ve konut sayısı ilişkisini görselleştirirken, Şekil 2, fiyat filtresi uygulandıktan sonraki dağılımını göstermektedir. Sonuç olarak, satılık daire ilanlarında kalan veri sayısı 599 olup, bu da toplam verilerin %97,40'ını oluşturmaktadır.

Tablo 3. Fiyat filtresi uygulanmadan önce satılık dairelerin fiyat aralıklarına göre dağılımı

Fiyat Aralığı (TL)	Adet	Oran (%)
Fiyat < 500 Bin	4	0,65
500 Bin < Fiyat < 6 Milyon	599	97,40
6 Milyon < Fiyat	12	1,95
Toplam	**615**	**100,00**



Şekil 1. Fiyat filtresi uygulanmamış satılık dairelerde fiyat dağılımı ve konut sayısı ilişkisi



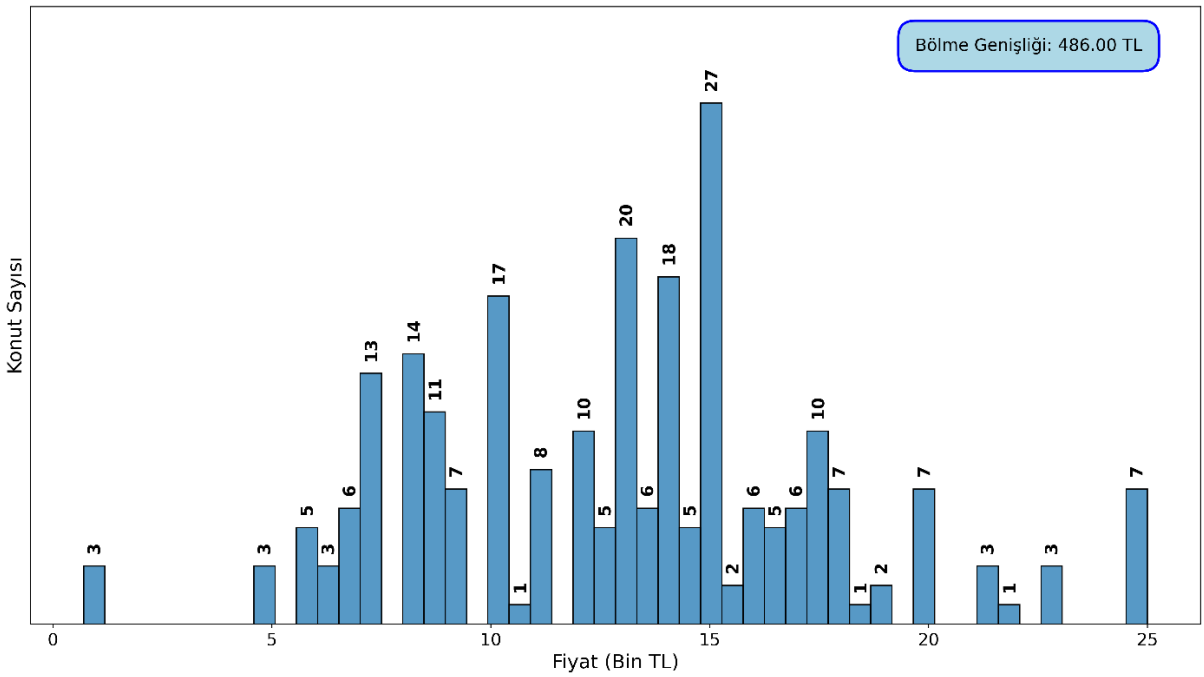
Şekil 2. Fiyat filtresi uygulanmış satılık dairelerde fiyat dağılımı ve konut sayısı ilişkisi

2.4.2.2. Kiralık İlanlarda Fiyat Filtresi

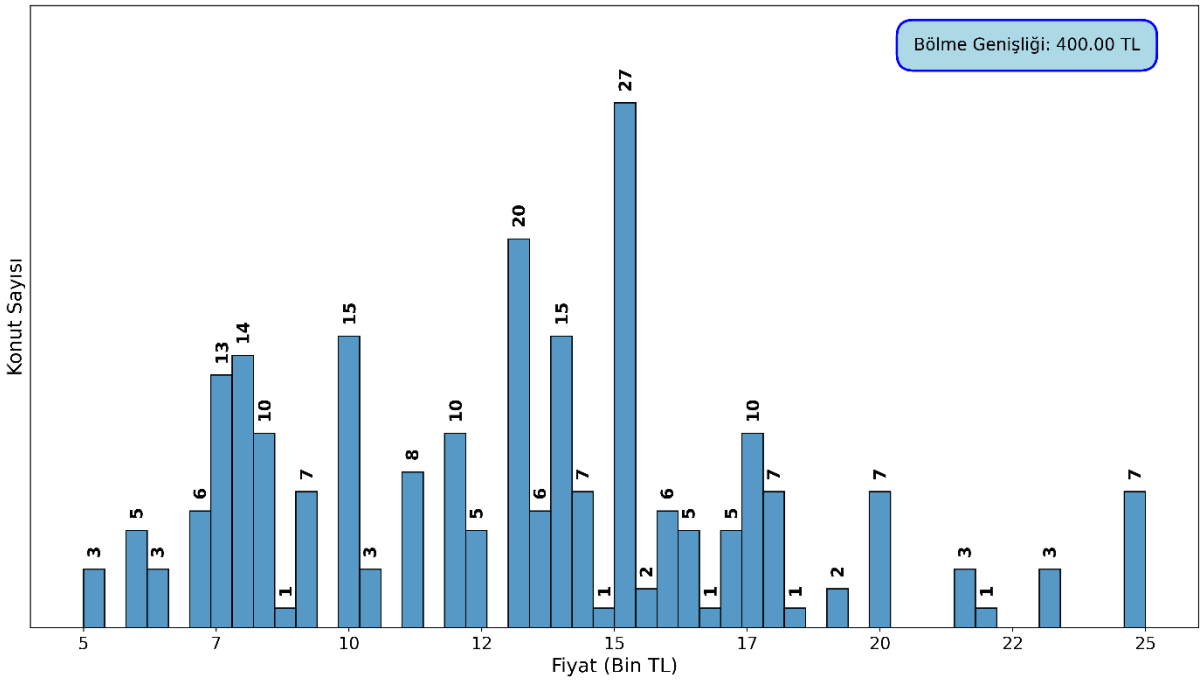
Sadece "daire" tipi konutlar için yapılan analizde kiralık ilanlar için, yıllık kira ve aylık kira tutarlarının karışmasını önlemek amacıyla, Tablo 4'te gösterildiği gibi, alt eşik 5 bin TL üst eşik 25 bin TL belirlenmiştir. Bu sınırlar sayesinde, yüksek fiyatlı ve düşük fiyatlı kira ilanlarının veri dağılımını bozması engellenmiştir. Şekil 3, fiyat filtresi uygulanmadan önceki kiralık daire fiyat dağılımını ve fiyat aralıklarına göre ilan sayısını görselleştirmektedir. Fiyat filtresi uygulandıktan sonra, bu eşiğin üzerinde ve altında olan toplam 9 (%3,63) ilan çıkarılmış, kalan 239 kiralık daire ilanı (%96,37) analizde kullanılmak üzere veri setine dahil edilmiştir. Şekil 4'te yeni fiyat dağılımı ve konut sayısı ilişkisi sunulmuştur.

Tablo 4. Fiyat filtresi uygulanmadan önce kiralık dairelerin fiyat aralıklarına göre dağılımı

Fiyat Aralığı (TL)	**Adet**	**Oran (%)**
Fiyat < 5 Bin	3	1,21
5 Bin <= Fiyat <= 25 Bin	239	96,37
25 Bin < Fiyat	6	2,42
Toplam	**248**	**100,00**



Şekil 3. Fiyat filtresi uygulanmadan önce kiralık dairelerin fiyat aralıklarına göre dağılımı



Şekil 4. Fiyat filtresi uygulanmış kiralık dairelerde fiyat dağılımı ve konut sayısı ilişkisi

2.4.3. Oda + Salon Sayıları Filtresi

Sadece 'daire' tipi konutlar arasındaki oda + salon sayılarının dağılımı tablo ve grafikle sunulmuştur. Analiz sürecinde bazı oda + salon sayılarının çoğunlukla hatalı şekilde işlendiği gözlemlenmiştir. Analizlerin doğruluğunu iyileştirmek amacıyla, Tablo 5'te yer alan 3+1, 2+1, 1+1 ve 4+1 oda dağılımlarının dışındaki 38 (%4,40) ilan veri setinden çıkarılmıştır. Çıkarılan oda + salon dağılımları

arasında 4+2, 3+2, 5+1, 2+0, 2+2, 5+2, 8+1 ve 3+0 sıra dışı oda + salon kombinasyonları bulunmaktadır. Bu verilerin çıkartılmasıyla, analizde kullanılan toplam veri sayısı 825 (%95,6) olarak güncellenmiştir.

Tablo 5. Oda + salon filtresi öncesi dairelerin oda + salon sayısı dağılımı

Oda + Salon Sayısı	Adet	Oran (%)
3 + 1	378	43,80
2 + 1	201	23,30
1 + 1	101	11,70
4+1	145	16,80
Diğerleri	38	4,40
Toplam	**863**	**100,00**

2.5. Eksik Veri (Missing Data)

Bu bölümde, emlak ilanlarında tespit edilen eksik verilerin nasıl ele alındığı detaylandırılmıştır. Eksik verilerin doldurulmasında, eksik bir özelliğin, ilanı inceleyen veya mülkü almayı düşünen kişiler için ayırt edici bir niteliğe sahip olup olmadığı dikkate alınmıştır. Genel yaklaşım olarak, eğer eksik özellik fiyatı pozitif yönde etkileyen veya ilanı ön plana çıkaracak bir nitelik olsaydı, bu özellik ilanda belirtilmiş olurdu varsayımı benimsenmiştir. Bu doğrultuda, eksik bilgilerin, ilgili özelliğin konutun cazibesini veya değerini olumlu yönde etkileyeceği düşünüldüğünde, özellikle belirtileceği kabul edilerek hareket edilmiştir. Bu yaklaşıma göre, önemli bir etkiye sahip olmayan ya da fiyat üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı düşünülen özellikler, genel ilan özelliklerine uygun şekilde doldurulmuştur. Eksik verilerin etiketlenmesinde bu yöntem uygulanmıştır. Tablo 6, yalnızca "konut tipi daire" olan ilanlardaki eksik veri sayısını ve bu eksikliklerin doldurulma durumunu detaylı bir şekilde göstermektedir.

Tablo 6. Konut tipi daire olan ilanlardaki eksik içerik sayısı

Sütun	Eksik Emlak Sayısı (Missing Values)	Veri Doldurma (Data imputation)
Fiyat	0	
Şehir	0	
İlçe	0	
Mahalle	0	
İlan Durumu	0	
Konut Tipi	0	
Oda + Salon Sayısı	0	
Brüt m²	0	
Net m²	0	
Bina Yaşı	0	
Isınma Tipi	0	
Kat Sayısı	0	

Banyo Sayısı	3	√
Eşya Durumu	101	√
Kullanım Durumu	87	√
Cephe	320	√
Bulunduğu Kat	310	√
Krediye Uygunluk	187	√
Konut Şekli	351	√
Yakıt Tipi	352	√
Yapının Durumu	368	√
Yapı Tipi	405	√
Tapu Durumu	369	√
Takas	349	√
Yetkili Ofis	472	√
Aidat	621	√
Toplam	**4295**	√

2.5.1. Yakıt Tipi

Tablo 7'de görüldüğü üzere, "Yakıt Tipi" sütununda *"Doğalgaz"*, *"Elektrik"*, ve *"Kömür-Odun"* değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler ise "Isınma Tipi" bilgisine bakılarak doldurulmuştur.

Tablo 7. Sadece daire tipindeki düzenleme öncesi yakıt tipi ve eksik veri dağılımı

Yakıt Tipi	Adet	Oran (%)
Doğalgaz	326	37,80
Elektrik	182	21,08
Kömür-Odun	3	0,34
Eksik	352	40,78
Toplam	**863**	**100,00**

Tablo 7'de yakıt tipi bilgisi eksik olan 352 ilan için bu eksik değerler, mevcut ısınma tipi bilgisi temel alınarak mantıksal bir yaklaşımla tamamlanmıştır. Eksik verilerin doldurulmasında, ısınma tipinin kullandığı enerji kaynağının, yakıt tipini en iyi temsil eden ve ona en yakın seçenek olduğu varsayılmıştır. Bu doğrultuda, her bir ısınma tipine karşılık gelen uygun yakıt tipi, mantıklı bir şekilde belirlenip Tablo 8'de gösterildiği gibi atanmıştır.

Tablo 8. Yakıt tipi girilmeyen eksik değerlerin ısınma tipi karşılığına göre dağılımı

Isınma Tipi	Eksik Yakıt Tipi Adedi	Atanan Yakıt Tipi
Kombi	260	Doğalgaz
Klima	44	Elektrik
Isıtma Yok	25	Elektrik
Belirtilmemiş	3	Elektrik
Yerden Isıtma	16	Elektrik
Soba	1	Kömür-Odun
Doğalgaz Sobası	3	Doğalgaz
Toplam	**352**	

Tablo 9. Düzenleme sonrası yakıt tipi dağılımları

Yakıt Tipi	Güncellenen Adet			Güncellenen Oran %)
	Önce	Eksik	Sonra	
Doğalgaz	326	263	589	68,25
Elektrik	182	88	270	31,29
Kömür-Odun	3	1	4	0,46
Toplam	**511**	**352**	**863**	**100,00**

Tablo 9'da düzenleme sonrası eksik verilerin tamamlanmasının ardından yakıt tipindeki değerlerin eksiksiz dağılımını göstermektedir.

2.5.2. Krediye Uygunluk

Tablo 10'da görüldüğü üzere, "Krediye Uygunluk" sütununda *"Uygun"*, *"Uygun Değil"* ve *"Bilinmiyor"* değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler, "Bilinmiyor" olarak doldurulmuştur. Krediye uygunluk, alıcı için önemli ve ayırt edici bir özellik olduğundan, eğer mülk krediye uygun olsaydı bu bilginin büyük olasılıkla kaydedilmiş olacağı varsayılmaktadır. Bu nedenle, eksik değerler "Bilinmiyor" olarak doldurulmuştur. Tablo 10 düzenleme sonrası eksik verilerin tamamlanmasının ardından krediye uygunluk durumundaki değerlerin eksiksiz dağılımını göstermektedir.

Tablo 10. Düzenleme öncesi ve sonrası krediye uygunluk dağılımları

Krediye uygunluk	Adet			Oran (%)
	Önce	Eksik	Sonra	
Uygun	503	0	503	58,29
Uygun Değil	164	0	164	19,00
Bilinmiyor	9	187	196	22,71
Toplam	**676**	**187**	**863**	**100,00**

2.5.3. Eşya Durumu

Tablo 11'de görüldüğü üzere, "Eşya Durumu" sütununda *"Eşyalı"* ve *"Eşyalı Değil"* değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler ise "Eşyalı Değil" olarak doldurulmuştur. Bu varsayım, mülk eşyalı olsaydı bunun alıcı ve satıcı için ayırt edici bir özellik olması ve genellikle ilanda özellikle belirtilmesi

gerektiği düşüncesine dayanmaktadır. Dolayısıyla, eksik verilerin "eşyalı değil" olarak doldurulması, bu durumun daha yaygın olması ve ilanda belirtilmemiş olabileceği varsayımına dayanmaktadır.

Tablo 11. Düzenleme öncesi ve sonrası eşya durumu dağılımları

Eşya Durumu	**Adet**			**Oran (%)**
	Önce	Eksik	Sonra	
Eşyalı Değil	585	101	686	79,49
Eşyalı	177	0	177	20,51
Toplam	762	101	863	100,00

2.5.4. Banyo Sayısı

Tablo 12'de görüldüğü üzere, "Banyo Sayısı" sütununda *"1", "2", "3"* ve *"4"* değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler ise çoğunlukla "1 Odalı" konutlar olarak varsayılmıştır. Varsayımımız, birden fazla banyosu olan bir konut olması durumunda bu bilginin ilanda mutlaka belirtilmiş olacağı yönündedir. Bu nedenle, eksik banyo sayısı değerleri, 1 Odalı konut kategorisine eklenmiştir.

Tablo 12. Düzenleme öncesi ve sonrası banyo sayıları dağılımları

Banyo Sayısı	**Adet**			**Oran (%)**
	Önce	Eksik	Sonra	
1 Odalı	424	3	427	49,48
2 Odalı	430	0	430	49,83
3 Odalı	5	0	5	0,58
4 Odalı	1	0	1	0,11
Toplam	**860**	**3**	**863**	**100,00**

2.5.5. Konut Şekli

Tablo 13'te görüldüğü üzere, "Konut Şekli" sütununda *"Daire", "Dubleks", "Çatı Dubleksi", "Bahçe Katı", "Ara Kat Dubleks"* ve *"Müstakil Ev"* değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler ise "Daire" olarak doldurulmuştur. Eksik değere sahip mülklerin ayırt edici bir konut şekline (örneğin, dubleks veya çatı dubleksi) sahip olması durumunda bu özelliklerin ilanda mutlaka belirtilmiş olacağı varsayılmıştır. Bu nedenle, konut şekli belirtilmeyen veya boş bırakılan kayıtlar "daire" olarak doldurulmuştur.

Tablo 13. Konut tipi daire olanların konut şekli önceki ve sonraki dağılımlar

Konut Şekli	Adet			Oran (%)
	Önce	Eksik	Sonra	
Daire	472	351	823	95,37
Dubleks	18	0	18	2,09
Çatı Dubleksi	3	0	3	0,35
Bahçe Katı	8	0	8	0,93
Müstakil Ev	8	0	8	0,93
Ara Kat Dubleks	3	0	3	0,34
Toplam	**512**	**351**	**863**	**100,00**

2.5.6. Bulunduğu Kat

Tablo 14'te görüldüğü üzere, "Bulunduğu Kat" sütunundaki eksik 310 veri, eksiksiz verileri olan kat sayısı ve konut şekline göre tahmin edilerek doldurulmuştur. Bu tahmin yöntemi aşağıdaki temellere dayanmaktadır:

- Dubleks, Çatı Dubleksi: Bu konut türlerinde, "Bulunduğu Kat" değeri olarak kat sayısının en üst katı atanmıştır.
- Müstakil ve Bahçe Katı: Bu konut türlerinde kat sayısı en fazla 3 olarak varsayılmış ve "Bulunduğu Kat" değeri 1 olarak doldurulmuştur.
- Ara Kat Dubleks: Bu konut türünde "Bulunduğu Kat" değeri, kat sayısının giriş katı yani 1.Kat olarak atanmıştır. (Bu tür konutların genellikle apartmanlarda yer aldığı düşünülmektedir.)
- Daire:
    - Eğer kat sayısı 0 ile 5 arasındaysa, "Bulunduğu Kat" değeri olarak 3. kat atanmıştır.
    - Kat sayısı 5 ile 10 arasındaysa, "Bulunduğu Kat" değeri olarak 7. kat atanmıştır.
    - Kat sayısı 10'un üzerindeyse, "Bulunduğu Kat" değeri 10. kat atanmıştır.

Tablo 14. Bulunduğu kat eksik verilerinin konut şekillerine göre dağılımı

Konut Şekli	Adet	Atanan Bulunduğu Kat
Daire	246	3, 7 veya 10
Dubleks	8	Dairenin Kat Sayısı
Bahçe Katı	8	1
Müstakil Ev	8	1
Eksik	40	
Toplam	**310**	

2.5.7. Aidat

Aidat özelliği için diğer özelliklerde olduğu gibi varsayımsal bir doldurma yapılmamıştır. Bunun nedeni, %71,95 gibi yüksek bir orana denk gelen 621 eksik veri bulunması ve aidat bilgisinin model

performansını etkileyebilecek kritik bir parametre olarak değerlendirilmemesidir. Bu nedenle, aidat sütunu veri setinden çıkarılmıştır.

2.5.8. Cephe

Cephe açısından, güneş alan yön olan güney cephesi daha ayrıcalıklı kabul ediliyor. Bu nedenle, eğer bir daire güney cepheye sahipse, genellikle bu bilgi doğrudan "güney cephe", "güneydoğu" veya "güneybatı" olarak belirtilir. Ancak, diğer cepheler, özellikle kuzey gibi yönler, daireye olumsuz bir etki katabileceğinden genellikle belirtilmez. Bu durumda, eğer cephe verisi eksikse, bunun güney cephe olmadığını varsayarak eksik değerler kuzey, doğu ve batıdan rastgele bir yön seçilip atanacaktır.

2.5.9. Tapu Durumu

Tablo 15'te görüldüğü üzere, "Tapu Durumu" sütunundaki eksik değerler, "kat mülkiyeti" olarak doldurulmuştur. Bu varsayım, tapu durumu "kat mülkiyeti" dışında bir seçenek olduğunda bunun alıcı ve satıcı için ayırt edici bir özellik olması ve genellikle ilanda özellikle belirtilmesi gerektiği düşüncesine dayanmaktadır. Dolayısıyla, eksik verilerin "kat mülkiyeti" olarak doldurulması, bu durumun daha yaygın olmasına ve belirtilmeyebileceği varsayımına dayanmaktadır.

Tablo 15. Tapu durumu dağılımı

Tapu Durumu	**Adet**			**Oran (%)**
	Önce	Eksik	Sonra	
Kat Mülkiyeti	180	369	549	63,62
Kat İrtifakı	309	0	309	35,81
Arsa	5	0	5	0,57
Toplam	**494**	**369**	**863**	**100,00**

2.5.10. Yapı Tipi

Tablo 16'da görüldüğü üzere, "Yapı Tipi" sütununda "Betonarme", "Taş Bina" ve "Ahşap" değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler ise "Betonarme" olarak doldurulmuştur. Bu varsayım, Türkiye'de konut projelerinde en yaygın kullanılan yapı tipinin betonarme olması ve farklı bir yapı tipi mevcutsa bu bilginin ilanda mutlaka belirtilmiş olacağı düşüncesine dayanmaktadır. Dolayısıyla, eksik veriler, en yaygın yapı tipi olan "betonarme" olarak kabul edilmiştir.

Tablo 16. Yapı tipi dağılımı

Yapı Tipi	**Adet**			**Oran (%)**
	Önce	Eksik	Sonra	
Betonarme	454	405	859	99,54
Taş Bina	3	0	3	0,35
Ahşap	1	0	1	0,11
Toplam	**458**	**405**	**863**	**100,00**

2.5.11. Yapının Durumu

Tablo 17'de görüldüğü üzere, "Yapının Durumu" sütununda "İkinci El" ve "Sıfır" değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler ise, eksik verisi bulunmayan bina yaşına göre tahmin edilerek doldurulmuştur. Bu tahmin yöntemi aşağıdaki kurallara dayanmıştır:

- Bina yaşı sıfır ise eksik değer sıfır ile dolduruldu.
- Bina yaşı sıfırdan farklı ise ikinci el ile dolduruldu

Tablo 17. Yapının durumuna göre verinin dağılımı

Yapının Durumu	Adet	Oran (%)
İkinci El	418	48,44
Sıfır	77	8,92
Eksik	368	42,64
Toplam	**863**	**100,00**

2.5.12. Kullanım Durumu

Tablo 18'de görüldüğü üzere, "Kullanım Durumu" sütununda "Kiracılı", "Boş", "Mülk Sahibi" ve "Belirtilmemiş" değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler ise, dairenin boş olduğu varsayımıyla "Boş" olarak doldurulmuştur. Bu varsayım, eğer dairede kiracı veya ev sahibi bulunuyorsa bu bilginin genellikle ilanda doğrudan belirtilmesi gerektiği düşüncesine dayanmaktadır, çünkü kullanım durumu hem alıcı hem de ilanı veren kişi için önemli ve ayırt edici bir özelliktir. Dolayısıyla, kullanım durumu belirtilmemiş ilanlarda dairenin boş olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 18. Kullanım durumu dağılımı

Kullanım Durumu	Adet	Oran (%)
Boş	551	63,85
Mülk Sahibi	101	11,70
Kiracılı	118	13,67
Eksik	87	10,09
Belirtilmemiş	6	0,69
Toplam	**863**	**100,00**

2.5.13. Takas Durumu

Tablo 19'da görüldüğü üzere, "Takas Durumu" sütununda "Hayır" ve "Evet" değerleri bulunmaktadır. Eksik değerler ise varsayımsal olarak "Hayır" olarak doldurulmuştur. Bu varsayım, takas imkânı bulunan mülklerde bu bilginin genellikle ilanda belirtilmesi gerektiği düşüncesine dayanmaktadır, çünkü takas durumu hem alıcı hem de ilanı veren için önemli ve ayırt edici bir özelliktir. Dolayısıyla, "Takas Durumu" belirtilmemiş ilanlarda takas seçeneği olmadığı kabul edilerek "Hayır" değeri atanmıştır.

Tablo 19. Takas durumu dağılımı

Takas Durumu	Adet	Oran (%)
Hayır	347	40,21
Eksik	349	40,44
Evet	167	19,35
Toplam	**863**	**100,00**

2.5.14. Yetkili Ofis Durumu

Tablo 20'de görüldüğü üzere, "Yetkili Ofis Durumu" sütununda yalnızca "Evet" değeri bulunmaktadır. Eksik değerler ise varsayımsal olarak "Hayır" olarak doldurulmuştur. Bu varsayım, ilanların bir emlakçı tarafından girilmiş olması durumunda "Yetkili Ofis" bilgisinin genellikle "Evet" olarak belirtilmesi gerektiği düşüncesine dayanmaktadır. Bu nedenle, "Yetkili Ofis Durumu" belirtilmeyen ilanlar için "Hayır" değeri atanmıştır.

Tablo 20. Yetkili ofis durumu dağılımı

Yetkili Ofis Durumu	Adet	Oran (%)
Evet	391	45,31
Eksik	472	54,69
Toplam	**863**	**100,00**

2.6. Yarı Logaritmik Modelin Oluşturulması

Analizde kullanılan yarı-logaritmik modelin matematiksel ifadesi denklem 6'da sunulmuştur.

$$\ln y_i = \beta_0 + x_i\beta_i + \varepsilon_i \tag{6}$$

$\ln y_i$, i numaralı konutun satış fiyatının doğal logaritmasıdır. β_0 Sabit terimdir. $X_1, X_2, \ldots, X_i$ Konutun fiziksel özelliklerini temsil eden bağımsız değişkenlerdir (örneğin; brüt alan, bina yaşı, oda sayısı vb.). $\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_i$ İlgili bağımsız değişkenlerin katsayılarını ifade eder. ε_i Hata terimidir; modele dâhil edilmeyen diğer faktörlerin etkisini yansıtır. i = 1, 2, ..., N Gözlem sayısını temsil eder.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, değişkenler arasındaki çoklu doğrusal bağlantının (multicollinearity) varlığı varyans enflasyon faktörü (VIF) testi ile incelenmiş; ardından, hata terimlerinin sabit varyansa sahip olup olmadığı heteroskedastisite testi ile değerlendirilmiş ve daha genel bir heteroskedastisite testi olan White testi uygulanarak modelin güvenilirliği açısından önemli bir kontrol gerçekleştirilmiştir. Son olarak, modellerin performansları ve değişkenlerin fiyat üzerindeki etkileri detaylı şekilde ele alınmıştır.

3.1. Varyans Enflasyon Faktörü (VIF) Testi

Regresyon analizinde bağımsız değişkenler arasındaki yüksek korelasyon, çoklu doğrusal bağlantı sorununa neden olabilir. Bu durumu tespit etmek için kullanılan yöntemlerden biri Varyans Şişirme Faktörü'dür (VIF - Variance Inflation Factor) (Çelik ve Hepşen, 2024).

Başlangıçta, ham verilerle tüm değişkenlerin değiştirilmeden kullanıldığı modelde, çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) sorununu tespit etmek amacıyla VIF (Variance Inflation Factor) testi yapılmıştır. Yapılan test sonucunda bazı değişkenlerin VIF değerlerinin 10'un üzerinde olduğu, bazı değişkenlerin ise infinity değeri aldığı belirlenmiştir. Bu yüksek VIF değerlerine sahip değişkenler, Tablo 21'de sunulmuştur. VIF değerinin 10 ya da daha fazla olması, bağımsız değişkenler arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunduğunu gösterir (Albayrak, 2005). Bu durum, ilgili değişkenlerin modelin istatistiksel tutarlılığını olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, bu değişkenler ayrı olarak ele alınmış ve gerekli düzeltmeler yapılmıştır.

Tablo 21. (6) Numaralı model için VIF istatistikleri

Değişken	VIF	Değişken	VIF	Değişken	VIF
Brüt M2	24,668	Mahalle_Yarpuz	∞	Mahalle_Dere	∞
Net M2	32,150	Mahalle_Çamlıkevler	∞	Mahalle_Fatıh Sultan Mehmet	∞
Oda + Salon Sayısı_ 3 + 1	12,163	Mahalle_Şehit Kansu Küçükateş	∞	Mahalle_Kışla	∞
Oda + Salon Sayısı_ 4 + 1	11,095	Tapu Durumu_Kat Mülkiyeti	∞	Mahalle_Cengiz Topel	∞
İlçe_Düziçi	31,418	Tapu Durumu_Kat İrtifakı	∞	Kullanım Durumu_Boş	55,618
İlçe_Kadirli	∞	Isınma Tipi_Klima	22,664	Kullanım Durumu_Kiracılı	35,636
İlçe_Merkez	49,429	Isınma Tipi_Kombi	53,243	Kullanım Durumu_MülkSahibi	30,782
İlçe_Toprakkale	∞	Cephe_Kuzey	17,928	Mahalle_Cemalpaşa	∞
Konut Şekli_Daire	13,475	Yakıt Tipi_Elektrik	18,660		

3.1.1. Çoklu Doğrusal Bağlantının Giderilmesine Yönelik Yapılan Düzenlemeler

Modeldeki Tablo 21'de gösterilen bazı bağımsız değişkenlerin VIF değerlerinin 10'un oldukça üzerinde çıkması nedeniyle, çoklu doğrusal bağlantı problemini azaltmak ve modelin güvenilirliğini artırmak amacıyla aşağıdaki düzenlemeler yapılmıştır:

- Brüt m²: Net m² ile yüksek korelasyon gösterdiği için çıkarılmıştır.
- İlçe: "Merkezilçe" ve "Merkezilçedeğil" olarak iki kategoriye ayrılmıştır.
- Mahalle değişkenleri: Çok sayıda mahalle bulunması ve çoğunun VIF değerinin ∞ olması nedeniyle çıkarılmıştır.
- Konut şekli: "Daire" ve "Dairedeğil" olarak gruplandırılmıştır.
- Cephe: "Güney" yönündeki konutlar "cephegüney", diğerleri "cephegüneydeğil" olarak yeniden gruplandırılmıştır.
- Tapu durumu: "Kat Mülkiyeti" olanlar "hazırtapu", diğerleri "hazırolmayantapu" olarak yeniden gruplandırılmıştır.

- Isınma tipi: “Kombi” ve “Doğalgaz” olanlar “doğalgazlı”, diğerleri “doğalgazlı değil” olarak gruplandırılmıştır.
- Kullanım durumu: “Boş” ve eksik veriler “kullanımıboş”, diğerleri “kullanımıdolu” olarak yeniden gruplandırılmıştır.

Değişkenlerden bazıları çıkarılmış, bazıları ise yukarıda belirtilen şekilde gruplandırılarak yeni değişkenler oluşturulmuştur. Ardından, yarı logaritmik model yeniden uygulanmıştır. Değişkenlerde yapılan bu değişikliklerin ardından, yeni modelde tekrar VIF testi yapılmış ve elde edilen yeni VIF değerleri Tablo 22’de sunulmuştur. Tablo 22’deki tüm değişkenler incelendiğinde, VIF değerlerinin 10’un altına düştüğü ve kabul edilebilir seviyelere indiği gözlemlenmektedir. Böylece, yüksek VIF değerine sahip bazı değişkenler (Tapu Durumu, Isınma Tipi, Kullanım Durumu, İlçe, Konut Şekli, Cephe) gruplama işlemiyle ve bazıları ise (Mahalle) çıkarılarak modellenmiştir. Yapılan bu işlemler sonrasında, VIF değerlerinin istenilen sınır olan 10’un altında olduğu Tablo 22’de gösterilmiştir. Sonuç olarak, modeldeki çoklu doğrusal bağlantı sorunu büyük ölçüde giderilmiştir.

Tablo 22. Değişken değişikliği sonrası yeni bütün VIF değerleri

Değişken	**VIF**	**Değişken**	**VIF**
Net M2	4,863	Krediye Uygunluk_Uygun	5,927
Bulunduğu Kat	1,582	Krediye Uygunluk_Uygun değil	2,945
Bina Yaşı	2,140	İlçe_Merkez_merkezilçedeğil	1,221
Kat Sayısı	1,872	Konut_Şekli_Grup_dairedeğil	1,188
Oda + Salon Sayısı_2 + 1	2,873	Yapının Durumu_İkinci El	1,932
Oda + Salon Sayısı_3 + 1	8,406	Banyo Sayısı_2	3,469
Oda + Salon Sayısı_4 + 1	7,875	Banyo Sayısı_3	1,042
Eşya Durumu_Eşyalı Değil	2,139	Takas_Hayır	1,289
İlan Durumu_Satılık	4,292	Cephe_Grup_cephegüneydeğil	1,219
Yakıt Tipi_Elektrik	4,640	Isınma_Grup_doğalgazlıdeğil	3,879
Yakıt Tipi_Kömür-Odun	1,253	Kullanım_Grup_Dolu	1,352
Tapu_Grup_hazırtapu	1,448	Yetkili Ofis_Hayır	1,390

Çalışmada kullanılan veriler yatay kesit niteliği taşıdığından, Durbin-Watson (DW) istatistiği klasik anlamda otokorelasyonu ölçen bir test olarak değil, model kalıntılarında belirgin bir bağımlılık olup olmadığını genel hatlarıyla gözlemlemek amacıyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, DW istatistiğinin yaklaşık 1,5 ile 2,5 aralığında olması durumunda ciddi bir bağımlılık probleminin bulunmadığı kabul edilmektedir (Gönüllü, 2018). Bu çalışmada elde edilen DW değeri, Tablo 23’te gösterildiği üzere 1,929 olup, söz konusu aralık içerisinde yer almakta ve kalıntılarda belirgin bir yapısal bağımlılık olmadığını işaret etmektedir.

Tablo 23. Regresyon analizi bulguları

Değişken	Katsayı	Std Hata	t-değeri	p-değeri
Sabit	9,129	0,059	154,084	**0,000**
Net M2	0,005	0,000	12,614	**0,000**
Bulunduğu Kat	0,011	0,006	1,980	**0,048**
Bina Yaşı	-0,007	0,002	-3,654	**0,000**
Kat Sayısı	-0,020	0,006	-3,177	**0,002**
Oda + Salon Sayısı_2 + 1	0,101	0,031	3,208	**0,001**
Oda + Salon Sayısı_3 + 1	0,309	0,046	6,712	**0,000**
Oda + Salon Sayısı_4 + 1	0,421	0,059	7,142	**0,000**
Eşya Durumu_Eşyalı Değil	-0,022	0,029	-0,744	0,457
İlan Durumu_Satılık	4,898	0,037	133,240	**0,000**
Krediye Uygunluk_Uygun	-0,002	0,039	-0,057	0,954
Krediye Uygunluk_Uygun değil	-0,124	0,034	-3,602	**0,000**
İlçe_Merkez_merkezilçedeğil	-0,038	0,036	-1,045	0,296
Konut_Şekli_Grup_dairedeğil	0,019	0,046	0,409	0,682
Yapının Durumu_İkinci El	-0,245	0,027	-9,158	**0,000**
Banyo Sayısı_2	0,083	0,030	2,821	**0,005**
Banyo Sayısı_3	-0,278	0,229	-1,213	0,226
Takas_Hayır	-0,130	0,023	-5,602	**0,000**
Cephe_Grup_cephegüneydeğil	-0,051	0,018	-2,882	**0,004**
Yakıt Tipi_Elektrik	-0,104	0,037	-2,798	**0,005**
Yakıt Tipi_Kömür-Odun	-0,974	0,126	-7,734	**0,000**
Tapu_Grup_hazırtapu	0,064	0,020	3,221	**0,001**
Isınma_Grup_doğalgazlıdeğil	-0,017	0,032	-0,527	0,598
Kullanım_Grup_Dolu	-0,024	0,021	-1,137	0,256
Yetkili Ofis_Hayır	0,119	0,019	6,318	**0,000**
R^2	0,991022			
Düzeltilmiş R^2	0,990744			
F İstatistiği	3573,471			
F İstatistiği p-değeri	0			
Durbin-Watson	1,929283			

Modelin geçerliliğini pekiştirmek ve OLS sonuçlarının güvenilirliğini artırmak amacıyla, varyans homojenliğinin sağlanıp sağlanmadığını test etmek üzere heterokedastisite ve White testi gibi ek tanısal testler uygulanmıştır.

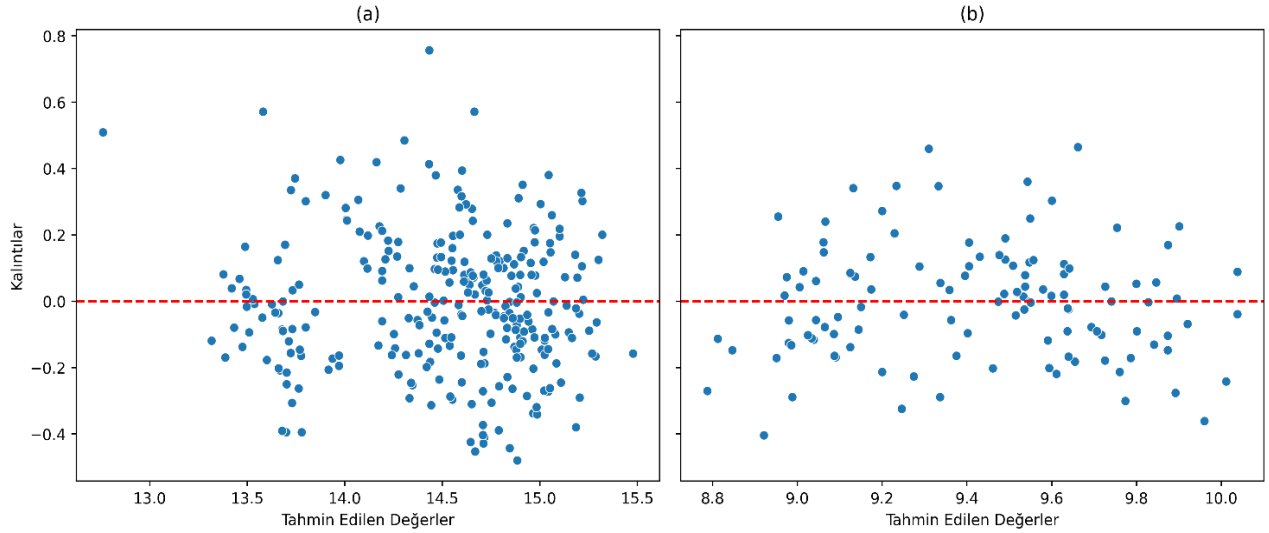
3.2. Varyans Homojenliği (Heteroskedastisite) Testi

Modelin doğruluğunu test etmek amacıyla, ilk olarak yarı logaritmik modelin kalıntı analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, varyans homojenliğini (heteroskedastisiteyi) ve kalıntıların normal dağılıma uygunluğunu değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

3.2.1. Kalıntıların Dağılımı

Şekil 5'te sunulan satılık ve kiralık ilanlara ait kalıntılar – tahmin edilen değerler grafikleri incelendiğinde, kalıntıların sıfır çizgisi etrafında rastgele ve simetrik dağıldığı, ortalama hataların sıfıra yakın seyrettiği görülmektedir. Her iki grafikte de sistematik bir desenin bulunmaması, doğrusal regresyon varsayımlarının ve modelin fonksiyonel formunun genel olarak sağlandığını göstermektedir. Ancak satılık ilanlarda yüksek tahmin edilen değerler bölgesinde kalıntı yayılımında hafif bir artış

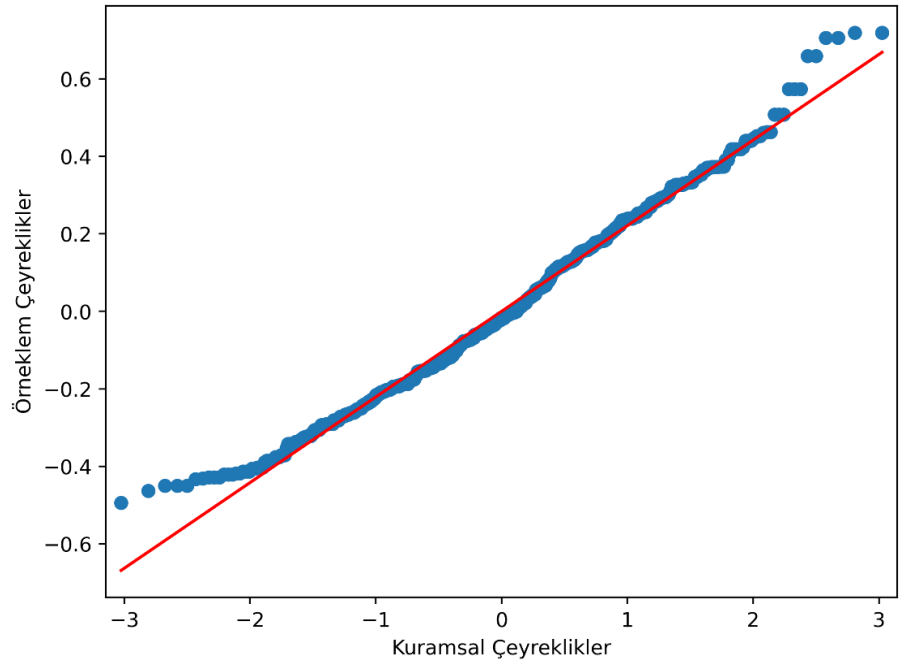
gözlenmiş, bu da düşük düzeyde heteroskedastisite olasılığına işaret etmektedir. Bu nedenle, olası sapmaları minimize etmek için robust standart hata kullanımı tercih edilmiştir.



Şekil 5. Kalıntılar ve tahmin edilen değerler grafikleri. (a) Satılık konutlar için, (b) Kiralık konutlar için

3.2.2. Q-Q Grafiği (Quantile-Quantile Plot)

Kalıntıların teorik normal dağılıma uygunluğunu değerlendirmek için Q-Q grafiği kullanılmıştır. Şekil 6'da sunulan grafikte, kalıntıların büyük ölçüde diyagonal referans çizgisi boyunca hizalandığı görülmektedir. Bu durum, kalıntıların normal dağılım varsayımını genel olarak sağladığını göstermektedir. Her ne kadar uç noktalarda (hem sol hem sağ uçlarda) hafif sapmalar gözlense de bu taşkın kuyruklara işaret eden küçük sapmalar modelin güvenilirliğini ciddi biçimde etkilememektedir.



Şekil 6. Türetilmiş kalıntıların normal dağılım uyum grafiği (Q-Q)

Grafiksel analizler modelin genel olarak doğrusal varsayımlara uyduğunu ve ciddi bir heteroskedastisite sorunu olmadığını gösterse de daha sağlam ve kesin bir değerlendirme yapabilmek amacıyla istatistiksel bir test olan White testi uygulanmıştır.

3.3. White Testi

Modelde heteroskedastisite varlığının sistematik bir şekilde test edilmesi amacıyla White testi uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 24'te sunulmuştur.

Tablo 24. White test sonuçları

Test Adı	**Değer**
LM İstatistiği	668,9234
LM-Testi Anlamlılık (p) Değeri	1,37E-42
F İstatistiği	11,89067
F-Testi Anlamlılık (p) Değeri	1,2E-125

Modelde heteroskedastisite varlığının sistematik bir şekilde test edilmesi amacıyla White testi uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 24'te sunulmuştur. White testi kapsamında hesaplanan LM istatistiği, gözlem sayısı ile çarpılmış R^2 (obs*R-squared) değerine karşılık gelmekte olup, bu değer ki-kare (χ^2) dağılımı altında değerlendirilmektedir.

White testi sonuçlarına göre, hem LM-Test hem de F-Test'e ait p-değerlerinin 0,05'ten oldukça küçük olması, modelde istatistiksel olarak anlamlı bir heteroskedastisite varlığına işaret etmektedir. Ancak, Şekil 5'te yer alan kalıntılar – tahmin edilen değerler grafiği incelendiğinde, kalıntılarda belirgin bir

heteroskedastisite görünümü gözlemlenmemiştir. Bu durum, modelde heteroskedastisitenin var olmakla birlikte etkisinin sınırlı düzeyde olabileceğini düşündürmektedir.

Bu nedenle model analizinde heteroskedastisiteye karşı dayanıklı (robust) standart hatalar kullanılmış ve daha güvenilir tahmin sonuçlarına ulaşılmıştır. Robust standart hatalarla yeniden tahmin edilen model sonuçları Tablo 25'te sunulmuştur.

Hedonik Fiyat Modeli kullanılarak yapılan analizlerde, White testi sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda Robust analiz yöntemi uygulanmış ve bu analizler, söz konusu faktörlerin konut fiyatları üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.

Tablo 25, analiz sonuçlarını ve bağımsız değişkenlerin konut fiyatları üzerindeki etkilerini ilgili metrikler aracılığıyla ayrıntılı olarak özetlemektedir. Tablodaki p değerleri 0,05'ten küçük olan değişkenler, istatistiksel açıdan anlamlı olarak değerlendirilmiştir ve bu değişkenler tabloda koyu şekilde işaretlenmiştir.

Tablo 25. Robust analizi tablosu

Değişken	Katsayı	Robust Std Hata	Robust t-değeri	Robust p-değeri
Sabit	9,129	0,074	124,027	**0,000**
Net M2	0,005	0,000	12,757	**0,000**
Bulunduğu Kat	0,011	0,005	2,070	**0,038**
Bina Yaşı	-0,007	0,002	-3,566	**0,000**
Kat Sayısı	-0,020	0,007	-2,730	**0,006**
Oda + Salon Sayısı_2 + 1	0,101	0,035	2,861	**0,004**
Oda + Salon Sayısı_3 + 1	0,309	0,047	6,555	**0,000**
Oda + Salon Sayısı_4 + 1	0,421	0,059	7,128	**0,000**
Eşya Durumu_Eşyalı Değil	-0,022	0,03	-0,713	0,476
İlan Durumu_Satılık	4,898	0,04	122,145	**0,000**
Krediye Uygunluk_Uygun	-0,002	0,044	-0,051	0,959
Krediye Uygunluk_Uygun değil	-0,124	0,038	-3,251	**0,001**
İlçe_Merkez_merkezilçedeğil	-0,038	0,052	-0,725	0,468
Konut_Şekli_Grup_dairedeğil	0,019	0,040	0,473	0,636
Yapının Durumu_İkinci El	-0,245	0,028	-8,652	**0,000**
Banyo Sayısı_2	0,083	0,030	2,776	**0,005**
Banyo Sayısı_3	-0,278	0,051	-5,444	**0,000**
Takas_Hayır	-0,130	0,021	-6,190	**0,000**
Cephe_Grup_cephegüneydeğil	-0,051	0,018	-2,817	**0,005**
Yakıt Tipi_Elektrik	-0,104	0,042	-2,461	**0,014**
Yakıt Tipi_Kömür-Odun	-0,974	0,161	-6,048	**0,000**
Tapu_Grup_hazırtapu	0,064	0,020	3,188	**0,001**
Isınma_Grup_doğalgazlıdeğil	-0,017	0,034	-0,494	0,621
Kullanım_Grup_Dolu	-0,024	0,021	-1,147	0,252
Yetkili Ofis_Hayır	0,119	0,018	6,552	**0,000**
R^2	0,991022			
Düzeltilmiş R^2	0,990744			
F İstatistiği	13841,93			
F İstatistiği p-değeri	0			
Durbin-Watson	1,929283			

Analiz sonuçları, heteroskedastisiteye karşı White testiyle değerlendirilmiş ve robust standart hatalarla yorumlanmıştır. Tablo 25'te, Tablo 23'te anlamsız olan "Banyo Sayısı_3" değişkeni robust analizi ile anlamlı hale gelmiştir. Katsayı yönleri teoriyle örtüşmekte, çok sayıda değişken anlamlılık

göstermektedir. Robust standart hatalar sayesinde model güvenilirliği artırılmıştır. Modelin performans göstergeleri Tablo 26'da gösterilmiştir.

Tablo 26. Hedonik model performansının R-Kare, MSE, RMSE, MAE üzerinden değerlendirilmesi

R^2	Düzeltilmiş R^2	MSE	RMSE	MAE	Anlamlılık Düz. (P) (F-istatistiği)
0,991	0,990	0,0488	0,2209	0,1805	0,000

Tablo 26'da yer alan hedonik model performans sonuçları incelendiğinde, modelin oldukça yüksek bir açıklayıcılığa sahip olduğu görülmektedir. R-Kare değeri 0,991 ve düzeltilmiş R-Kare değeri 0,990 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki (logaritmik konut fiyatı) değişimin yaklaşık %99'unu açıkladığını göstermektedir. Modelin hata ölçümleri incelendiğinde, ortalama karesel hata (MSE) 0,0488, kök ortalama karesel hata (RMSE) 0,2209 ve ortalama mutlak hata (MAE) 0,1805 olarak elde edilmiştir. Benzer çalışmalarda elde edilen hata metrikleriyle kıyaslandığında, bu çalışmada elde edilen hata değerlerinin görece düşük olduğu görülmektedir. Örneğin, (Sevgen ve Tanrıvermiş, 2024) tarafından yürütülen çalışmada yarı logaritmik model için RMSE 1945, MAE ise 1321 olarak raporlanmıştır. Yine (Altun, 2022) tarafından yapılan bir çalışmada yarı logaritmik modelin RMSE değeri 0,2252 olarak bulunmuştur. Bu kıyaslamalar dikkate alındığında, bu çalışmada elde edilen değerlerin daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bu düşük hata değerleri, modelin tahmin performansının oldukça iyi olduğunu ve tahmin edilen fiyatların gerçek değerlere oldukça yakın olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, modelin genel anlamlılığını test eden F-istatistiği için elde edilen olasılık değeri ($p < 0,01$) modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Tüm bu sonuçlar, kurulan hedonik modelin konut fiyatlarını açıklamada güçlü ve güvenilir bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışmada kullanılan yarı logaritmik regresyon modelinde yer alan kategorik değişkenler ve bunlara ait referans kategoriler Tablo 27'de sunulmuştur.

Tablo 27. Kategorik değişkenler için referans kategoriler

Değişken	Referans Kategori	Değişken	Referans Kategori
Oda + Salon Sayısı	1+1	Banyo Sayısı	1
Eşya Durumu	Eşyalı	Takas	Evet
İlan Durumu	Kiralık	Cephe (Grup)	Güney Cephe
Krediye Uygunluk	Bilinmiyor	Yakıt Tipi	Doğalgaz
İlçe_Merkez	Merkez İlçe	Tapu (Grup)	Hazır olmayan tapu
Konut Şekli (Grup)	Daire	Isınma Tipi (Grup)	Doğalgazlı
Yapı Tipi	-	Kullanım Durumu (Grup)	Boş
Yapının Durumu	Sıfır	Yetkili Ofis	Evet

Aşağıda, Tablo 25'te yer alan ve robust standart hatalarla tahmin edilen model kapsamında, değişkenlerin konut fiyatları üzerindeki etkileri referans kategorilere göre kıyaslanarak analiz edilmiştir. Konut büyüklüğü arttıkça fiyatların da anlamlı bir şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Net kullanım alanı (Net M2) arttıkça fiyatlar artmakta olup, her bir metrekarelik artış fiyatlarda yaklaşık %0,5'lik bir yükselişe yol açmaktadır ($\beta = 0{,}005$, $p < 0{,}01$).

Bulunduğu kat değişkeni incelendiğinde, dairenin katı yükseldikçe fiyatların hafif şekilde arttığı görülmektedir ($\beta = 0{,}0113$, $p < 0{,}05$). Buna karşılık, bina kat sayısının artması konut fiyatlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Kat sayısı yüksek binalarda fiyatlar yaklaşık %2 oranında daha düşük gerçekleşmektedir ($\beta = -0{,}0202$, $p < 0{,}01$).

Bina yaşının artması da fiyatlar üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Her bir yıllık yaş artışı konut fiyatlarında yaklaşık %0,71'lik bir düşüşe sebep olmaktadır ($\beta = -0{,}0071$, $p < 0{,}01$).

Oda sayısına göre, 2+1, 3+1 ve 4+1 daireler, 1+1 dairelere kıyasla sırasıyla %10,1, %30,9 ve %42,1 oranında daha yüksek fiyatlara sahiptir ($\beta = 0{,}101$; $0{,}309$; $0{,}421$, $p < 0{,}01$). Bu bulgu, oda ve salon sayısının artmasının konut değerini anlamlı şekilde artırdığını göstermektedir.

Eşya durumuna bakıldığında, eşyalı olmayan konutların fiyatlarının eşyalı konutlara kıyasla daha düşük olduğu görülse de bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0{,}05$).

İlan durumu açısından, satılık konutların kiralık konutlara göre fiyatlarının anlamlı şekilde daha yüksek olduğu belirlenmiştir ($\beta = 4{,}898$, $p < 0{,}01$).

Krediye uygunluk durumunda ise, krediye uygun olmayan konutların, krediye uygunluğu bilinmeyen konutlara göre fiyatlarının %12,4 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir ($\beta = -0{,}124$, $p < 0{,}01$).

Yapının durumuna göre yapılan incelemede, ikinci el konutların sıfır konutlara göre fiyatlarının %24,5 oranında daha düşük olduğu görülmüştür ($\beta = -0{,}245$, $p < 0{,}01$). Bu sonuç, yeni binaların piyasada önemli bir değer artışına sahip olduğunu göstermektedir.

Banyo sayısı bakımından, 2 banyolu konutların fiyatları 1 banyolu konutlara göre yaklaşık %8,3 daha yüksek iken ($\beta = 0{,}083$, $p < 0{,}01$), 3 banyolu konutların fiyatlarının ise %27,8 oranında daha düşük olduğu bulunmuştur ($\beta = -0{,}278$, $p < 0{,}01$).

Takas seçeneği sunulmayan konutların fiyatları, takasa açık konutlara kıyasla %13 civarında daha düşük bulunmuştur ($\beta = -0{,}130$, $p < 0{,}01$).

Cephe yönüne bakıldığında, güney cephe harici cephelere bakan konutların fiyatlarının yaklaşık %5 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir ($\beta = -0{,}051$, $p < 0{,}01$).

Yakıt tipi açısından, elektrikle veya kömür-odunla ısınan konutların fiyatları doğalgazla ısınan konutlara kıyasla sırasıyla %10,4 ve %97,4 oranında daha düşük bulunmuştur ($\beta = -0{,}104$ ve $\beta = -0{,}974$, $p < 0{,}01$).

Tapu durumunda, hazır tapusu bulunan konutların fiyatlarının hazır tapusu olmayan konutlara göre yaklaşık %6,4 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir ($\beta = 0{,}064$, $p < 0{,}01$).

Kullanım durumu incelendiğinde ise, dolu konutların boş konutlara göre fiyat farklılığı istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0{,}05$).

Son olarak, yetkili ofis aracılığıyla satışı yapılmayan konutların, yetkili ofisle satışı yapılan konutlara göre %11,9 oranında daha yüksek fiyatlarla listelendiği görülmüştür ($\beta = 0{,}119$, $p < 0{,}01$).

4. Sonuç

Bu çalışmada, Osmaniye ili konut piyasasında fiyatlar üzerinde etkili olan unsurların analiz edilmesi amacıyla Hedonik Fiyat Modeli kullanılmıştır. Araştırma başlangıçta 863 konut ilanına ait verileri içermekte olup, fiyat düzeyi ile oda ve salon sayılarına yönelik yapılan filtrelemeler sonucunda geçerli gözlem sayısı 802'ye düşmüş ve analizler bu 802 ilan üzerinden gerçekleştirilmiştir. Modelde, bağımlı değişken olarak konut fiyatlarının logaritması (Log Fiyat) kullanılmış; bağımsız değişkenler olarak ise konutun fiziksel özellikleri, bulunduğu lokasyon, yapısal durumu ve diğer nitelikleri modele dahil edilmiştir. Toplamda 24 bağımsız değişkenin yer aldığı modelin analiz sonuçları, bazı değişkenlerin konut fiyatları üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Analiz bulgularına göre, net m² değişkeni konut fiyatları üzerinde pozitif ve anlamlı bir etkiye sahiptir. Bina yaşı ile konut fiyatları arasında negatif yönlü ve anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir; bu durum, yeni konutların daha yüksek fiyatlara sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bulunduğu kat sayısının ve bina toplam kat sayısının da fiyat üzerinde anlamlı etkiler yarattığı gözlemlenmiştir.

Konutun oda sayısı arttıkça (özellikle 3+1 ve 4+1 dairelerde), fiyatlarda da belirgin artışlar olduğu görülmektedir. Bunun yanında, banyo sayısının artması da pozitif etki yaratmaktadır. Diğer yandan, ikinci el konutların fiyatlarının sıfır konutlara göre daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, takas seçeneğinin olmaması, güney cepheye sahip olmama, elektrik veya kömür-odun gibi alternatif yakıt tipleri, hazır tapulu olması ve yetkili emlak ofisi aracılığıyla satış yapılmaması gibi değişkenlerin de fiyat üzerinde anlamlı etkiler yarattığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen model sonuçları, büyük ölçüde alan yazındaki bulgularla uyum göstermektedir. Örneğin, konutun büyüklüğü ile fiyatı arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki olduğu yönündeki bulgu ($\beta = 0{,}005$, $p < 0{,}01$), (Muti ve Dursun, 2022), (Yeşil ve Güzel, 2021) ve (Çorum, 2020) 'un çalışmalarında da vurgulanmıştır. (Çorum, 2020) 'un çalışmasında konutun metrekaresinin fiyat üzerindeki en etkili değişken olduğu, (Yeşil ve Güzel, 2021)'in analizinde ise net kullanım alanının fiyat üzerinde % 74,6 oranında etkili olduğu ifade edilmiştir. Benzer şekilde, bina yaşının fiyatlar üzerindeki negatif etkisi bu çalışmada da gözlemlenmiş ($\beta = -0{,}0071$, $p < 0{,}01$) ve bu sonuç (Muti ve Dursun, 2022), (Yeşil ve Güzel, 2021) ve (Selim, 2008) 'in ulaştığı bulgularla tutarlıdır. Oda sayısının fiyatı artırıcı etkisi de birçok çalışmada desteklenmektedir; örneğin, (Muti ve Dursun, 2022)'un çalışmasında oda sayısındaki her bir artışın fiyatları % 18 oranında artırdığı belirtilmiş, bu çalışmada da benzer şekilde 3+1 ve 4+1 gibi daha büyük dairelerin fiyatlarının anlamlı şekilde yüksek olduğu ($\beta = 0{,}309$ ve $\beta = 0{,}421$, $p < 0{,}01$) bulunmuştur. Dairenin bulunduğu katın fiyatlar üzerindeki pozitif etkisi sınırlı olmakla birlikte anlamlı bulunmuş ($\beta = 0{,}0113$, $p < 0{,}05$), bu da özellikle 2. bölgelerde üst katların tercih edildiği (Çorum, 2020)'un çalışmasıyla benzerlik göstermektedir. Isıtma türü açısından, doğalgazla ısınan konutların daha yüksek fiyatlara sahip olduğu yönündeki bulgu da (Selim, 2008) 'in

doğalgaz ve merkezi ısıtmanın fiyat artırıcı etkisine dair bulgularıyla örtüşmektedir. Tüm bu karşılaştırmalar, elde edilen sonuçların genel olarak alan yazındaki bulgularla paralellik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, konut fiyatlarının belirleyicilerine ilişkin literatüre birkaç açıdan katkı sunmaktadır. Öncelikle, depremden etkilenen Osmaniye ili özelinde gerçekleştirilen bu analizde, afet sonrası dönemde konut fiyatlarını etkileyen yapısal ve fiziksel faktörler detaylı şekilde incelenmiştir. Ayrıca, veri setinde yer alan ilanlar üzerinde uygulanan dikkatli filtreleme süreci sayesinde, istatistiksel analizlerin güvenilirliğini olumsuz etkileyebilecek uç değerler ve tutarsız gözlemler veri setinden çıkarılmıştır. Bu yönüyle çalışma hem yöntemsel titizlik açısından hem de tek bir il özelinde odaklanması bakımından literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Sonuçlar, Osmaniye ilinde konut fiyatlarını etkileyen faktörlerin anlaşılmasına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Bu kapsamda, özellikle Osmaniye gibi bölgesel konut piyasalarında fiyat oluşum dinamiklerini daha iyi anlamak için, hedonik fiyat modeli gibi yöntemlerin kullanılabileceği gösterilmiştir. Gelecekteki çalışmalar, farklı şehirlerin karşılaştırmalı analizini yaparak bölgesel farklılıkların konut fiyatları üzerindeki etkisini inceleyebilir. Ayrıca, modelde kullanılan değişken seti genişletilerek sosyo-ekonomik faktörlerin veya doğal afet sonrası yeniden inşa süreçlerinin fiyatlar üzerindeki etkisi daha detaylı olarak araştırılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi tarafından desteklenen, "Emlak Fiyat Endeksinde Evin Fiziksel Özelliklerine Göre Fiyat Değişiminin İncelenmesi ve Hedonik Fiyat Modeli ile Test Edilmesi" başlıklı ve 2024-PT2-042 numaralı BAP projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışma süresince sağladıkları desteklerinden dolayı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi'ne ve tüm ilgili paydaşlara teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça

Akdere R., Kılıç E., Keçecioğlu ÖF. Kısmi gölgelenme koşullarındaki FV sistemlerin derin öğrenme tabanlı maksimum güç noktası tahmini. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 26(3): 589-603.

Albayrak AS. Çoklu doğrusal bağlantı halinde enküçük kareler tekniğinin alternatifi yanlı tahmin teknikleri ve bir uygulama. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi 2005; 1(1): 105-126

Altun Ö. Kamu konutu fiyatlarını belirleyen faktörlerin hedonik fiyat modeliyle analizi. Sosyoekonomi 2022; 30(52): 349-378.

Çelik E., Hepşen A. Vergisiz ortamda sermaye yapısını etkileyen faktörler: Türkiye gayrimenkul yatırım ortaklıkları. Doğuş Üniversitesi Dergisi 2024; 25(1): 317-340.

Çiçek U., Hatırlı SA. Isparta ilinde konut fiyatlarını etkileyen faktörlerin hedonik fiyat modeli ile analizi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2015; 1(13): 98-114.

Çorum A. Konut fiyatını belirleyen regresyon denklemi: Maltepe ilçesi örneği. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences 2020; 32(1): 57-67.

Dayı F., Gencan MY. Konut fiyatlarını etkileyen faktörlerin incelenmesi: Samsun örneği. Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2024; 15(2): 348-364.

Doğan S., Genç L., Yücebaş SC., Uşaklı M., Dumlu C. Determination of the relationship between housing characteristics and housing prices before and after the Kahramanmaraş earthquake using machine learning: a case study of Adana, Türkiye. Megaron: Yıldız Technical University Faculty of Architecture E-Journal 2024; 19(2): 259-274.

Gider V., Budak C. Drug solubility prediction: a comparative analysis of GNN, MLP, and traditional machine learning algorithms. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology 2024; 12(1): 164-175.

Gönüllü O. Birleşme ve devralma işlemlerinin yarattığı paydaş değeri üzerinde etkili olan faktörler: borsa istanbul üzerine bir uygulama. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi 2018; 14(1): 233-256.

Güler E., Kandemir SY. Lineer ve kübik regresyon analizleri kullanılarak OECD ülkelerinin CO2 emisyonlarının tahminlemesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2022; (34): 175-180.

Jadhav A., Pramod D., Ramanathan K. Comparison of performance of data imputation methods for numeric dataset. Applied Artificial Intelligence 2019; 33(10): 913-933.

Karagülle C. Konut kullanıcısı bakış açısından ideal konut kriterleri üzerine bir araştırma. YDÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi 2024; 6(2): 34-55.

Kördiş G., Işık S., Mert M. Antalya'da konut fiyatlarını etkileyen faktörlerin hedonik fiyat modeli ile tahmin edilmesi. Akdeniz İİBF Dergisi 2014; 14(28): 103-132.

Kürşad MŞ., Nartgün Z. Kayıp veri sorununun çözümünde kullanılan farklı yöntemlerin ölçeklerin geçerlik ve güvenirliği bağlamında karşılaştırılması. Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology 2015; 6(2): 254-267.

Muti A., Dursun A. Konut fiyatlarına etki eden faktörlerin hedonik fiyat modeli ile belirlenmesi: Erzurum ili örneği. Bingöl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2022; 6(2): 349-380.

Owusu-Ansah A. A review of hedonic pricing models in housing research. Journal of International Real Estate and Construction Studies 2011; 1(1): 19-38.

Özen NS., Saraç S., Koyuncu M. COVID-19 vakalarının makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmini: Amerika Birleşik Devletleri örneği. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; (22): 134-139.

Öztürk M., Yıldırım K. Konut büyüklükleri ve oda sayısı ilişkisi üzerine bir araştırma. 5. Uluslararası Sosyal Bilimler ve İnovasyon Kongresi, 13 Kasım 2022, sayfa no:613-621, Ankara.

Öztürk TY. İstanbul'da konut fiyatlarını etkileyen faktörlerin hedonik fiyatlama modeli ile incelenmesi: 2022 yılı örneği. Journal of Research in Business 2023; 8(1): 343-355.

Santos F., Acosta N. An approach based on web scraping and denoising encoders to curate food security datasets. Agriculture 2023; 13(5): 1015.

Sayraç M., Yalçın E. Yapay zeka ile termal etkilerin kuantum kuyularındaki lineer olmayan özellikler üzerindeki etkisinin incelenmesi. International Scientific Research and Innovation Congress, 5-6 Haziran 2024, sayfa no:237-245, Ankara.

Selim S. Determinants of house prices in Turkey: A hedonic regression model. Doğuş Üniversitesi Dergisi 2008; 9(1): 65-76.

Selim S., Demirbilek A. Türkiye'deki konutların kira değerinin analizi: hedonik model ve yapay sinir ağları yaklaşımı. Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2009; 1(1): 73-90.

Sevgen SC., Tanrıvermiş Y. Comparison of machine learning algorithms for mass appraisal of real estate data. Real Estate Management and Valuation 2024; 32(2): 100-111.

Şahin O., Çubukçu B. Mobilya sektöründe satış tahmini: yinelemeli sinir ağı modellerinin karşılaştırmalı analizi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2024; 12(4): 686-706.

Şevgin F. Gayrimenkul piyasasında regresyon yöntemleri ile veri madenciliği. Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2023; 4(2): 20-28.

Tatachar AV. Comparative assessment of regression models based on model evaluation metrics. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2021; 8(9): 853-860.

Tekin M., Sarı İU. Real estate market price prediction model of Istanbul. Real Estate Management and Valuation 2022; 30(4): 1-16.

Turgay O. Mekânların "arayüz" nitelikleri bağlamında gündelik yaşantıdaki kalıcılığı. Beykent University Journal of Science and Engineering 2013; 6(1): 27-46.

Üçdoğruk Ş. İzmir ilinde emlak fiyatlarına etki eden faktörler-hedonik yaklaşım. Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2001; 16(2): 149-161.

Yayar R., Karaca SS. Konut fiyatlarına etki eden faktörlerin hedonik modelle belirlenmesi: TR83 Bölgesi örneği. Ege Akademik Bakış 2014; 14(4): 509-518.

Yeşil P., Güzel M. Giresun kent merkezi'nde konut fiyatlarına etki eden yapısal ve çevresel etkenlerin belirlenmesi. Akademik Ziraat Dergisi 2021; 10(2): 305-316.

Yıldırım K., Günçıktı M., Yazıcıoğlu NMÇ. Investigation of change process of interior equipment elements of housing users with different socio-economic status (SES). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 2020; 8(1): 40-50.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2516-2528, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2516-2528, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Türkiye' de Yetiştirilen Havuçların Kimyasal ve Biyoaktif Bileşimlerinin Belirlenmesi

Duygu KESER[1*]

[1]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, 80000, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0003-2741-2024
*Sorumlu yazar: duygukeser@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 16.09.2025
Kabul tarihi: 09.11.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Havuç
Karotenoid
Fenol
Antioksidan
Kaşınhanı
Beypazarı

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye' nin önemli havuç üretim merkezlerinden olan Konya ve Ankara illerinden temin edilen havuçların kimyasal ve biyoaktif bileşimlerini belirlemek amacıyla ele alınmıştır. Havuç örneklerinin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla nem, kül, yağ, protein, karbonhidrat ve mineral içerikleri incelenmiş; biyoaktif bileşimlerinin belirlenmesi için ise *β*-karoten ve toplam fenolik miktarı ile DPPH testi kullanılarak antioksidan aktiviteleri ölçülmüştür. Konya ve Ankara yöresi havuçlarının mineral bileşikleri arasında Mg (sırasıyla 1145 ve 1033 mg/kg), P (sırasıyla 2250-3844 mg/kg), Mn (sırasıyla 15,4 ve 5,84 mg/kg), Zn (sırasıyla 14,8 ve 21,1 mg/kg) K (sırasıyla 26100 ve 26888 mg/kg) ve Fe (sırasıyla 26,0 ve 29,2) bakımından anlamlı farklılıklar olduğu görülmüştür. Konya havuçları toplam fenolik bileşik miktarı ve antioksidan kapasite değeri bakımından daha yüksek bulunurken (sırasıyla 7,71 mg/100 g taze havuç ve %33,5 inhibisyon), Ankara havuçları *β*-karoten miktarı (12,6 mg/100 g taze havuç) açısından öne çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar, bölgesel farklılıkların havuçların besin ve biyoaktif bileşik içerikleri üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Determination of Chemical and Bioactive Compositions of Carrots Grown in Türkiye

Research Article

Article History:
Received: 16.09.2025
Accepted: 09.11.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Carrot
Carotenoid
Phenol
Antioxidant
Kaşınhanı
Beypazarı

ABSTRACT

This study aimed to determine the chemical and bioactive compositions of carrots obtained from Konya and Ankara, two major carrot-producing regions in Türkiye. Moisture, ash, fat, protein, carbohydrate, and mineral contents were examined to determine the chemical composition of carrot samples. To determine their bioactive composition, *β*-carotene and total phenolic contents were measured, as well as antioxidant activity using the DPPH assay. Significant differences were found in the mineral compositions of Konya and Ankara regions' carrots in terms of Mg (1145 and 1033 mg/kg, respectively), P (2250 and 3844 mg/kg, respectively), Mn (15,4 and 5,84 mg/kg, respectively), Zn (14,8 and 21,1 mg/kg, respectively), K (26100 and 26888 mg/kg, respectively), and Fe (26.0 and 29,2 mg/kg, respectively). Konya carrots were found to have higher total phenolic compound and antioxidant capacity (respectively 7,71 mg/ 100 g fresh carrot and %33,5 inhibition), while Ankara carrots were more prominent in *β*-carotene content (12,6 mg/100 g fresh carrot). The results suggest that regional differences significantly influence the nutritional and bioactive profiles of carrots.

To Cite: Keser D. Türkiye' de Yetiştirilen Havuçların Kimyasal ve Biyoaktif Bileşimlerinin Belirlenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2516-2528.

1. Giriş

Gelişmekte olan ülkelerde toplumun büyük bir kesimi tahıl temelli beslenmektedir. Bu kısıtlı beslenme şekli kişilerde mineral ve vitamin eksikliklerine neden olmaktadır. Beslenmede çeşitliliğin yetersiz olması ve gerekli besin öğelerinin alınamaması, toplumun büyük bir kesimini besin öğesi eksikliklerine açık hale getirmektedir (Purewal ve ark., 2023). Bu sebeple, besleyici değeri yüksek gıda ürünlerinin tüketimi büyük önem taşımaktadır.

Havuç (*Daucus carota* L.) Apiaceae familyasında yer alan iki yıllık otsu bir türdür (Que ve ark., 2019). Zengin besin içeriği ve mor, kırmızı, turuncu gibi farklı renk varyasyonlarına sahip olması hem insan beslenmesinde hem de gıda endüstrisinde havucu değerli bir hammadde hâline getirmektedir. Havuç aynı zamanda yemek, çorba, salata, tatlı, reçel ve fermente içecekler (örneğin şalgam) gibi çeşitli gıda ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ergun ve Süslüoğlu, 2018; Nagraj ve ark., 2020; Keser ve ark., 2020; Sitkey ve ark., 2024). Havuçlar doğu ve batı havuçları olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğu havucu, Orta ve Kuzey Asya'ya kadar yayılmış kırmızı-mor renge sahip havuçlardır. Batı havuçları ise Avrupa ve Amerika'da yaygın olan sarı-turuncu renge sahip olan havuçlardır (Leja ve ark., 2013).

Türkiye' de havuç üretim miktarı 788.578 ton olarak bildirilmiştir (TÜİK, 2023). Konya ve Ankara, Türkiye'deki havuç üretiminin büyük bir kısmını karşılamakta olup, sırasıyla en fazla üretime sahip ilk iki il konumundadır. Havuç, içerdiği vitaminler ve karotenoidler sayesinde besin değeri yüksek bir sebzedir. Aynı zamanda havuçlar antioksidan görevi gören fenolik bileşikler içermesi sebebiyle önemli bir fitobesin kaynağıdır. Fenolik bileşiklerin bilinen herhangi bir besleyici işlevi yoktur, ancak sahip olduğu antioksidan özellikleri nedeniyle insan sağlığı için önemli bileşiklerdir (Sharma ve ark., 2012). Fenolik bileşikler fenilpropanoid metabolizması yoluyla fenilalaninden türetilen bitki bileşenleridir. Havuçlardaki fenolikler köklerde bulunmaktadır, ancak periderm adı verilen dış yüzey katmanında yoğun halde bulunmaktadır (Arafa ve ark., 2015). Ayrıca havuç göz sağlığını desteklemesi, kolesterol seviyesini düşürücü etkisi ve sindirim sistemi fonksiyonlarını desteklemesi gibi özellikleriyle insan sağlığı üzerinde önemli faydalar sağlamaktadır. Yapılan araştırmalar, havucun tek başına günlük A vitamini ihtiyacının yaklaşık %17'sini karşılayabildiğini göstermektedir (Koley ve ark., 2014; Byrstricka ve ark., 2015; Aina ve ark., 2025). Bunun yanı sıra havuç; kalsiyum, fosfor, demir ve magnezyum gibi temel mineraller açısından da değerli bir kaynaktır (Bozalan ve Karadeniz, 2011; Keskin ve ark., 2021; Purewal ve ark., 2023).

Literatürde, Türkiye'nin önde gelen havuç üretim merkezleri arasında yer alan Konya ve Ankara yöresinde yetiştirilen havuçlara dair yapılan kapsamlı çalışmaların sınırlı olması, bu araştırmanın temel çıkış noktasını oluşturmuştur. Bu çalışma, Türkiye'nin önde gelen havuç üretim bölgelerinden Konya ve Ankara yöresinde yetiştirilen havuçların kimyasal ve biyoaktif bileşimlerini belirlemeyi amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan havuç örnekleri 2025 yılında Konya (Kaşınhanı) ve Ankara (Beypazarı) illerinde bulunan semt pazarlarından 3' er kg olarak temin edilmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Nem Tayini

Laboratuvara getirilen havuçlar bol su ile yıkanarak fazla nemi alındıktan sonra bekletilmeden nem analizine alınmıştır. Nem içeriği, infrared nem tayin cihazı (Adam, PMB53, USA) kullanılarak 105°C'de belirlenmiştir.

2.2.2. Kül Tayini

Kül tayini analizinde, CARBOLITE marka ELF11/6B model kül fırını kullanılmıştır. Öncelikle kurutulmuş ve darası alınmış krozelere yaklaşık 2,5 gram numune tartılmıştır. Numuneler, manyetik karıştırıcılı ısıtıcı üzerinde 300°C sıcaklıkta, dumanlanma sona erene kadar ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Ardından, örnekler kül fırınına alınarak 500°C'de beş saat yakılmıştır. Yakma işlemi tamamlandıktan sonra krozeler desikatörde soğutulmuş ve son tartımları yapılmıştır. Başlangıçta yapılan tartım (kroze darası + numune) ile işlem sonrası elde edilen tartım arasındaki fark kullanılarak kül yüzdesi hesaplanmıştır.

2.2.3. Yağ Tayini

Yağ ekstraksiyonunda çözücü destekli yarı sürekli bir yöntem olan Soxhlet ekstraksiyonu tercih edilmiştir. Bu analizde GERHARDT markasına ait SOX416 model yağ tayin cihazı kullanılmıştır. Yaklaşık 30 gram numune tartıldıktan sonra filtre kağıdına sarılarak selülozik kartuşa yerleştirilmiştir. Ekstraksiyon işlemi, üzerine 150 mL hekzan eklenerek ve 200°C sıcaklıkta hekzan tamamen uzaklaşana kadar sürdürülmüştür. Ekstraksiyonun ardından, kartuşlar cam tüpler içerisinde 100°C'de iki saat bekletilerek kalan hekzanın tamamının giderilmesi sağlanmıştır. Desikatörde soğutulan cam tüpler tartılmış, daraları ile elde edilen değerler arasındaki farktan yararlanılarak numunelerin yüzde yağ değerleri hesaplanmıştır.

2.2.4. Protein Analizi

Protein miktarı, Kjeldahl yöntemiyle belirlenen toplam azot miktarına dayanarak hesaplanmıştır. Bu analizde BEHR marka, INKJEL 625M model azot tayin cihazı kullanılmıştır. Numune, potasyum sülfat ve bakır sülfat katalizörlerinin varlığında, konsantre sülfürik asit ile parçalanarak azot bileşikleri amonyum sülfata dönüştürülmüştür. Sonrasında, bu karışım sodyum hidroksit ile reaksiyona sokularak oluşan ürünler, seyreltik sülfürik asit ile titre edilmiştir. Titrasyonda harcanan seyreltik sülfürik asit miktarı, örnekteki toplam azot içeriğinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Elde edilen toplam azot

değeri 6,25 dönüşüm katsayısı ile çarpılarak numunenin protein içeriği belirlenmiştir (AOAC 920.123, 2005).

2.2.5. Toplam Karbonhidrat Analizi

100 mg yağsız örnek üzerine 5 mL 2.5 N HCL ilave edilmiştir. Ardında örnekler 100 ºC 'de kaynayan suda 3 saat bekletilmiştir. Oda sıcaklığına gelene kadar soğutulan örnekler üzerine doygun sodyum karbonat çözeltisi eklenerek nötralize edilmiştir. Örnekler 100 mL'lik balon jojelere filtre edilerek alınmış ve saf su ile hacimleri tamamlanmıştır. Homojenize edilen örneklerden tüplere 0.1 mL, ayrı tüplere ise glikoz standart çözeltisinden (100 mg/L) 0 (kör), 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1 mL alınmış ve tüm tüplerin hacimleri saf su ile 1 mL' ye tamamlanmıştır. Tüplere sırasıyla 1 mL fenol çözeltisi (%5) ilave edilmiş ve karıştırılmış, ardından 5 mL derişik sülfürik asit cam bir pipet yardımıyla ilave edilmiş ve tekrar karıştırılmıştır. Isınan örnekler soğuması için 20 dakika bekletilmiştir. Oluşan sarı-turuncu rengin absorbansı spektrofotometrede (V-730 JASCO, Japonya) 490 nm'de köre karşı okunmuştur. Sonuçlar glikoz standart çözeltisinin dilüsyonları ile hazırlanan kalibrasyon eğrisi yardımıyla hesaplanmıştır (Masuko ve ark., 2005). Sonuçların hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$\text{Toplam karbonhidrat} = \left(\frac{\text{kalibrasyon denklemi ile elde dilen konsantrasyon}}{\text{analizde kullanılan örnek miktarı}} \text{ x Seyreltme faktörü}\right) \quad (1)$$

2.2.6. Mineral Madde Analizi

Mineral madde analizi Kaçar ve İnal (2008)' e göre yapılmıştır. Yaklaşık 0,5-1 gr öğütülmüş numune porselen krozeye tartılıp, kül fırınında 550°C' de 5 saat yakma işlemine tabi tutulmuştur. Yakma işlemi sonunda desikatörde soğutulan numunelerin üzerine 5 mL 2 N HCl eklenip ve plastik bir çubuk ile karıştırılarak 15-20 dakika bekletilip, ardından hacim 50 mL' ye tamamlanmıştır. 30 dakika bekledikten sonra whatman filtre kâğıdı ile süzülüp elde edilen ekstrakt atomik absorbsiyon cihazında okutulmuştur. Atomik absorbsiyon cihazında her bir mineralin kalibrasyon eğrisi kendi standardı kullanılarak hazırlanmıştır. Cihaz olarak AGILENT marka 240FSAA model atomik absorbsiyon cihazı kullanılmıştır. Numuneler potasyum (K), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), demir (Fe), bakır (Cu), mangan (Mn), çinko (Zn) ve fosfor (P) mineral maddeleri için analiz edilmiştir.

2.2.7. Toplam Karotenoid Analizi

Havuç örnekleri yıkanıp temizlendikten sonra küçük parçalara bölünmüş, Memmert marka UN110 model etüvde 40°C' de 48 saat boyunca kurutulup toz haline getirilerek karotenoid ekstraksiyonuna hazır hale getirilmiştir. Beta karoten ekstraksiyonu için 0,5 g havuç oda sıcaklığında ve karanlık bir ortamda 25 mL aseton ile 30 dk boyunca manyetik olarak karıştırılmıştır. Ekstrakt santrifüj edilerek havuç numunesi tamamen renksiz hale gelene kadar işlem tekrarlanmıştır. Hacim ekstraksiyon

çözücüsü ile 50 mL' ye tamamlanmış ve UV-VIS (V-730 JASCO, Japonya) ile 453 nm'de ölçümleri yapılmıştır. Kalibrasyon eğrisi beta karoten standardı (Sigma) kullanılarak 0,1-12 µg/mL aralığında çizilmiştir (Hagos ve ark., 2022). Sonuçların hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$Toplam\ karoten\ miktarı = \frac{\text{kalibrasyon denklemiyle elde edilen konsantrasyonx çözelti hacm}}{100xkullanılan\ örnek\ miktarı} \quad (2)$$

2.2.8. Antioksidan Kapasitenin Belirlenmesi

DPPH Testi

Antioksidan kapasite DPPH (2,2-difenil-1-pikrilhidrazil) testi kullanılarak belirlenmiştir (Davarcı ve ark., 2019). 0,1 mL fenolik ekstrakt 3,9 mL DPPH (6×10^{-5} M) çözeltisine eklenip oda sıcaklığında ve karanlıkta 30 dakika bekletilmiştir. Elde edilen çözeltinin absorbansı 515 nm'de UV-VIS (V-730 JASCO, Japonya) spektrofotometresi ile ölçülmüştür. Okunan absorbanslar, Trolox standardı ile elde edilen kalibrasyon eğrisi kullanılarak µmol/100 g Trolox eşdeğerlerine çevrilmiştir. Numunenin radikal süpürme kapasitesi (% inhibisyon) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$\%DPPH = \left((\mathrm{AK} - \mathrm{AN}) \div \mathrm{AK}\right) \times 100 \quad (3)$$

AK: Kontrol absorbans değeri

AN: Numune absorbans değeri

2.2.9. Toplam Fenolik Madde Miktarı Analizi

Havuçların toplam fenolik bileşik miktarı Folin-Ciocalteu yöntemi ile belirlenmiştir (Singleton ve Rossi, 1965). Her numune için 25 ml' lik balon jojelere sırasıyla 100 µl fenolik ekstrakt ve 15 ml distile su eklenmiştir. Ardından, 1,25 ml Folin-Ciocalteu reaktifi eklenip karışım oda sıcaklığında 3 dakika bekletilmiş ve üzerine 3,75 ml doymuş Na_2CO_3 çözeltisi eklenmiştir. 120 dakika oda sıcaklığında ve karanlıkta bekletilen numunelerin absorbansları UV-VIS (V-730 JASCO, Japonya) ile 720 nm'de okunmuştur. Kalibrasyon eğrisinin hazırlanmasında standart olarak gallik asit (Sigma) kullanılmıştır. Sonuçlar mg GAE/100 g taze numune olarak ifade edilmiştir. Analizler Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi' nde yapılmıştır.

2.2.10. İstatistiksel Analiz

Elde edilen bulgular SPSS 18.0 İstatistik Paket Programı kullanılarak bağımsız örneklem t-testine tabi tutulmuştur. Analizler üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ortalama ± standart hata şeklinde verilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Konya ve Ankara illerinden temin edilen havuçların kimyasal bileşimlerine ait sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre Konya ve Ankara yöresi havuçlarının ortalama nem içeriği sırasıyla %88,8 ve %88,7 olarak belirlenmiştir. Yüksek nem içeriği, özellikle küf gelişimi gibi mikrobiyal bozulmalara elverişli bir ortam oluşturarak gıdalarda raf ömrünün kısalmasına neden olmaktadır (Boadi ve ark., 2021). Bu çalışmada elde edilen nem oranları ile Sharma ve ark. (2012) tarafından havuçların kimyasal bileşimi üzerine yapmış oldukları çalışmada belirttikleri %86–89 nem oranı ile benzerlik göstermektedir. Yine benzer şekilde, Tian ve ark. (2024) tarafından kurutma işlemlerinin havuç aroması üzerine etkilerini inceleyen araştırmada da benzer nem oranları tespit edilmiştir.

Kül içeriği, gıdaların inorganik bileşenlerini oluşturmakta ve gıda maddelerinde bulunan mineral elementlerin çeşitliliği hakkında bilgi vermektedir (Olalude ve ark., 2015). Bu çalışmada havuçların ortalama kül miktarları Konya havuçları için %1,31, Ankara havuçları için %0,74 olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Bu değerler, Slovakya'da 24 farklı çeşit havucun morfolojik özelliklerinin incelendiği çalışmada (Sitkey ve ark., 2024) bildirilen %0,69–1,66 aralığı ve yine benzer şekilde Nagraj ve ark. (2020) tarafından bildirilen %0,97'lik ortalama kül miktarı ile uyum içindedir. Çalışmada Konya ve Ankara yöresinden temin edilen havuçlara ait kül miktarlarına uygulanan t-testine göre kül miktarları arasında genel olarak istatiksel açıdan önemli farklılıklar (p<0.001) bulunduğu belirlenmiştir. Kül içeriğindeki farklılıklar; toprak ve yetiştirme koşulları, yağış miktarı, hasat zamanı, depolama koşulları, gübreleme gibi tarım uygulamaları ve diğer bölgesel etmenlerle ilişkilendirilmektedir (Wierzbowska ve ark., 2017; Aina ve ark., 2025).

Havuç, düşük miktarda yağ ve protein içeren bir sebze olarak bilinmektedir. Konya ve Ankara yöresi havuçlarının ortalama yağ miktarı her iki havuç için %0,13 olarak belirlenirken, ortalama protein miktarı sırasıyla %0,75 ve %0,85 olarak belirlenmiştir (Tablo 1). Havuçlarla ilgili yapılmış önceki çalışmalar da düşük yağ ve protein sonuçlarını desteklemektedir (Azam ve ark., 2013; Aderinola ve ark., 2019; Tian ve ark., 2024). Havuç, fruktoz, glikoz ve sükroz gibi basit şekerlerin yanı sıra, az miktarda nişasta ve diyet lifi içeriğiyle önemli bir karbonhidrat kaynağıdır (Yusuf ve ark., 2021). Çalışmada kullanılan havuçların karbonhidrat içeriklerine bakıldığında, Konya havuçlarında %9,50, Ankara havuçlarında ise %8,50 oranında karbonhidrat tespit edilmiştir (Tablo1). Benzer şekilde Gana'da en fazla tüketilen üç farklı çeşit havucun besin bileşimleri ve antioksidan kapasiteleri incelenmiştir. Araştırmacılar karbonhidrat miktarının %6,25-8,39 arasında değiştiğini belirtmişlerdir (Boadi ve ark., 2021). Yine havucun kimyasal bileşimin incelendiği bir başka çalışmada da karbonhidrat miktarının %6-10,6 arasında değiştiği ifade edilmiştir (Sharma ve ark., 2012). Havuçların kimyasal bileşimindeki farklılıklar; çeşit, çevresel faktörler ve depolama sürecindeki değişkenler ile ilişkilendirilmektedir (Mandrich ve ark., 2023; Tian ve ark., 2024).

Mineral madde içeriği bakımından havuç, oldukça zengin bir sebzedir. Havuçta insan sağlığı açısından önemli olan kalsiyum, demir, fosfor, potasyum, magnezyum gibi çeşitli faydalı mineraller bulunmaktadır (Tian ve ark., 2024). Mineral madde içeriği, sebzelerin kalitesini belirlenmesinde

önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir (Mandrich ve ark., 2023). Bu çalışmada kullanılan havuçların mineral madde miktarları Tablo 1'de verilmiştir. Konya ve Ankara yöresi havuçlarının mineral madde miktarları sırasıyla K (26100 ve 26888 ppm), Ca (4700 ve 4525 ppm), Mg (1145 ve 1033 ppm), P (2250 ve 3844 ppm), Cu (4,95 ve 5,34 ppm), Mn (15,4 ve 5,84 ppm), Fe (26,0 ve 29,2 ppm) ve Zn (14,8 ve 21,1 ppm) olarak belirlenmiştir. Havuç örneklerinde Ca, miktar olarak en fazla bulunan mineral olarak öne çıkarken, bunu K ve P takip etmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda da Ca, K ve P major mineraller olarak ifade edilmektedir (Yusuf ve ark., 2021; Conversa ve ark., 2022; Aina ve ark., 2025). Çalışmada kullanılan havuçlarda en az miktarda bulunan mineral ise Cu olmuştur. Havuçların mineral miktarları arasında istatistiksel olarak Mg, P, Mn ve Zn için $p<0.001$; K ve Fe için $p<0.01$; Ca için ise $p<0.05$ oranında önemli farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar tarımsal uygulamalar, çeşit ve hammaddenin büyüklüğü gibi farklılıklar ile ilişkilendirilmektedir (Lisiewska ve ark., 2006; Singh ve ark., 2012; Aina ve ark., 2025).

Tablo 1. Havuç örneklerinin genel kimyasal bileşimi

Analiz		**Konya**	**Ankara**	**Önemlilik Düzeyi**
Nem (%)		88,8±0,43	88,7±0,33	ö.d.
Kül (%)		1,31^{a}±0,02	0,74^{b}±0,00	***
Yağ (%)		0,13±0,05	0,13±0,05	ö.d.
Protein (%)		0,75^{b}±0,03	0,85^{a}±0,04	*
Karbonhidrat (g glikoz/100 g yağsız yer fıstığı)		9,50±1,51	8,50±1,05	ö.d.
Mineral (mg/kg kuru madde)	K	26100^{b}±50,0	26888^{a}±163	**
	Ca	4700^{a}±75,0	4525^{b}±50,0	*
	Mg	1145±2,50	1033±12,5	***
	P	2250^{b}±62,5	3844^{a}±31,3	***
	Cu	4,95±0,53	5,34±0,39	ö.d.
	Mn	15,4±0,02	5,84±0,19	***
	Fe	26,0^{b}±1,14	29,2^{a}±0,30	**
	Zn	14,8^{b}±0,01	21,1^{a}±0,13	***

Aynı satırda farklı harflerle gösterilen değerler arasındaki fark istatistiksel açıdan önemlidir (*: %5, **: %1, ***: %0.1, ö.d: önemli değil)

Karotenoidler, A vitamininin öncüsü olmaları sebebiyle insan sağlığı açısından önemli mikro besin kaynaklarıdır (Singh ve ark., 2012; Arafa ve ark., 2015). Çalışmada Konya ve Ankara yöresi havuçlarının toplam *β*-karoten miktarları sırasıyla 11,4 mg/100 g ve 12,6 mg/100 g taze ağırlık olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Sharma ve ark. (2012), havucun kimyasal bileşimini inceledikleri çalışmalarında toplam *β*-karoten miktarının 6–54 mg/100 g arasında değiştiğini bildirmiştir. Benzer şekilde Choi ve ark. (2024), havuç ve havuç sularında yaptıkları incelemede havuçlar için toplam *β*-karoten miktarını 7,88 mg/100 g olarak bildirmişlerdir. Matejkova ve Petrikova (2010), iki farklı yıl (2004–2005) ve altı farklı çeşit havuç üzerinde yaptıkları çalışmada, karoten miktarının 6–14 mg/100 g arasında değiştiğini ve depolamaya bağlı karoten miktarının farklılık gösterdiğini ifade etmişlerdir. Çalışmamızda Konya ve Ankara yöresi havuçlarının karoten miktarları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p<0,05$).

Tablo 2. Havuçların karoten miktarları

	Konya	**Ankara**	**Önemlilik Düzeyi**
***β*-Karoten** (mg/100 g yaş havuç)	$11,4^{b}\pm0,70$	$12,6^{a}\pm0,59$	*

Aynı satırda farklı harflerle gösterilen değerler arasındaki fark istatistiksel açıdan önemlidir (*: %5, **: %1, ***: %0.1, ö.d.: önemli değil)

Havuçlarda karotenin yansıra önemli bir diğer biyoaktif bileşik grubu fenollerdir (Bonasia ve ark., 2021). Çalışmada kullanılan havuçların toplam fenolik bileşik miktarları Tablo 3'te verilmiştir. Konya havucunun toplam fenolik bileşik miktarı 7,71 mg/100 g taze ağırlık olurken; Ankara havucunun 6,45 mg/100 g taze ağırlık olmuştur. Elde edilen fenolik bileşik miktarları, literatürde belirtilen aralık ile (7,3–224 mg/100 g taze ağırlık) uyum içindedir (Mandrich ve ark., 2021; Yusuf ve ark., 2021; Tian ve ark., 2024). Konya havucunun Ankara havucuna kıyasla daha yüksek miktarda fenolik bileşik içerdiği görülmektedir (Tablo 3). Yapılan t-testine göre havuçların toplam fenolik bileşik miktarları arasında fark istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($p<0.05$). Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre 1929-2024 yılları arasında Konya'nın ortalama yıllık yağış miktarı 327,6 mm, Ankara'nın ise 392,3 mm'dir. Bu durum, daha az yağış alan bölgede yetişen havuçların daha yüksek fenolik içeriğine sahip olduğu görüşünü desteklemektedir. Literatürde, bitkilerin su stresi gibi abiyotik stres koşullarında fenolik bileşik üretimini arttırdığı ifade edilmektedir. Örneğin, amarant bitkisinde yapılan bir çalışmada, kuraklık stresine maruz bırakılan bitkilerde toplam fenolik içeriği ve antioksidan kapasitenin anlamlı şekilde arttığı bildirilmiştir (Sarker ve ark., 2018). Benzer şekilde, zeytin bitkilerinde su kısıtı uygulandığında oleuropein ve benzeri fenolik bileşiklerin miktarında önemli artışlar olduğu ifade edilmiştir (Mechri ve ark., 2020). Fenolik bileşikler, bitkinin oksidatif strese karşı savunma mekanizmasının bir parçası olarak sentezlenmekte ve bu bileşiklerin sentezinde görev alan fenilpropanoid yolunun kuraklık gibi stres koşullarında aktive olduğu bilinmektedir (Chaves ve ark.,

2009; Sharma ve ark., 2019). Bu bağlamda, Konya havuçlarında gözlenen yüksek fenolik bileşik içeriği, bölgedeki daha düşük yağış koşullarının oluşturduğu çevresel stresin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca havuçların yetişme bölgeleri ve tarım uygulamalarındaki (gübreleme gibi) farklılıkların da fenolik içerikler arasındaki farklılıkta etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Ahmad ve ark., 2019).

Antioksidanlar, kanser, kardiyovasküler hastalıklar ve çeşitli kronik rahatsızlıkların gelişiminde rol oynayan reaktif oksijen türlerini etkisiz hale getirerek bu hastalıkların önlenmesine katkıda bulunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, bitkilerin antioksidan özellikleri onları gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir gıda maddesi haline getirmektedir. Havuç, insan beslenmesinde besinsel antioksidanlar olarak önemli olan fenolik bileşikler ve karotenoidler gibi fitokimyasallar açısından zengindir (Yusuf ve ark., 2021; Arslan ve ark., 2025). Konya ve Ankara yöresi havuçlarından elde edilen ekstraktlara serbest radikalleri inhibe etme kapasitelerini ölçen DPPH testi uygulanılarak örneklerin antioksidan kapasiteleri belirlenmiştir. Çalışmada standart olarak Trolox kullanılmıştır. DPPH sonuçları ise Tablo 3'te yer almaktadır. Konya ve Ankara yöresi havuçlarının DPPH testi sonuçlarına göre inhibisyon yüzdeleri sırasıyla 33,5±0,80 ve 27,2±1,04 olmuştur. İki havuç arasında inhibisyon yüzdesi daha yüksek olan %33,5±0,80 ile Konya havucu olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, havuçların sahip olduğu antioksidan aktivite değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmüştür (p<0.01). Havuçların DPPH inhibisyonlarının trolokstan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum havuçların antioksidan kapasitelerinin trolokstan daha yüksek olduğunu göstermektedir (Wanna, 2019). Benzer şekilde turuncu, mor ve kırmızı renkli havuçların antioksidan kapasitelerinin belirlenmesini optimize etmek amacıyla farklı çözücüler ile çalışan Purewal ve ark. (2023), turuncu havuçlar için yüzde inhibisyon oranının %28,21-29,10 arasında değiştiğini ifade etmiştir. Yine benzer şekilde Perez ve ark. (2023) 27 adet mor, bir adet turuncu ve bir adet sarı havucun antioksidan kapasitelerini DPPH testi kullanarak incelemişler ve araştırmacılar çalışma sonunda turuncu havucun en düşük (<100mmol Troloks/kg taze ağırlık) antioksidan kapasiteye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 3. Havuçların toplam fenolik bileşi miktarları ve DPPH testi sonuçları

	Konya	**Ankara**	**Önem Düzeyi**
Toplam Fenolik Bileşik (mg/100 g taze havuç)	7,71^{a}±0,66	6,45b±1,49	*
DPPH Testi (% İnhibisyon)	33,5^{a}±0,80	27,2^{b}±1,04	**

Aynı satırda farklı harflerle gösterilen değerler arasındaki fark istatistiksel açıdan önemlidir (*: %5, **: %1, ***: %0.1, ö.d.: önemli değil)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Türkiye'nin önde gelen havuç üretim merkezlerinden olan Konya ve Ankara illerinden temin edilen havuçların kimyasal ve biyoaktif bileşimleri incelenmiştir. Havuçlar arasında mineral, *β*-karoten, fenolik bileşik ve antioksidan kapasite açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar saptanmıştır. Ankara havuçları *β*-karoten açısından, Konya havuçları ise fenolik bileşik ve antioksidan kapasite bakımından daha zengin bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, çevresel koşullar ve tarımsal uygulamaların havuçların kimyasal ve biyoaktif bileşimi üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. İleriye dönük çalışmalarda daha geniş örneklem ve farklı bölgelerin incelenmesi, havuçların besin değerlerini optimize etmeye yönelik önemli bilgiler sağlayabilir. Elde edilen bulgular, çevresel faktörlerin (iklim, toprak yapısı) ve tarımsal uygulamaların (gübreleme, sulama, yetiştirme teknikleri) havuçların besin ve biyoaktif bileşimleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bu durum, bölgesel üretim stratejilerinin ve tarımsal yönetim uygulamalarının havuçların besin değerini artırmak için optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. İleriye dönük çalışmalarda, farklı üretim bölgelerinden ve değişik ekolojik koşullardan daha geniş örneklem alınarak, havuç çeşitlerinin besin ve biyoaktif içeriklerinin kapsamlı bir haritasının çıkarılması önerilmektedir. Ayrıca, tarımsal uygulamaların (gübreleme, sulama, organik vs. konvansiyonel üretim) havuç kalitesi üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

Ahmad T., Cawood M., Iqbal Q., Arino A., Batool A., Tariq RMS., Azam T., Akhtar S. Phytochemicals in *Daucus carota* and their health benefits review article. Foods 2019; 8: 424.

Aina OE., Mugivhisa LL., Olowoyo JO., Obi LC. Evaluation of mineral contents of lettuce and carrot harvested from soil treated with organic and ınorganic fertilizers. Agriculture 2025; 15: 656.

AOAC., 2005 Official Method 960.09. In ‘‘Official methods of analysis of the AOAC international’’, G. W. Latimer and W. Horwitz (Eds.), 18th edn. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD.

AOAC, Official Method 960.09: Fat (Crude) in Meat. In: Latimer, G.W., Horwitz, W. (Eds.), Official Methods of Analysis of the AOAC International; AOAC: Gaithersburg, MD, USA, 2005; 18th ed.

Arafa NM., Ibrahim MM., Aly UI. Evaluation of total phenolic contents and antioxidant activity of carrot callus extracts as affected by phenylalanine precursor. Plant Tissue Culture and Biotechnology 2015; 25(2): 207-221.

Arslan A., Çeliktaş N., Soysal Y., Keskin M. Comparison of total phenolic content in organic and conventional carrot under different drying conditions using non-destructive analysis techniques. Microchemical Journal 2025; 208: 112279.

Azam A., Khan I., Mahmood A., Hameed A. Yield, chemical composition and nutritional quality responses of carrot, radish and turnip to elevated atmospheric carbon dioxide. Journal of the Science of Food and Agriculture 2013; 93: 3237–3244.

Boadi NO., Badu M., Kortei NK., Saah SA., Annor B., Mensah MB., Okyere H., Fiebor A. Nutritional composition and antioxidant properties of three varieties of carrot (*daucus carota*). Scientific African 2021; 12: e00801.

Bonasia A., Conversa G., Lazzizera C., Gambacorta G., Elia A. Morpho-biometrical, nutritional and phytochemical characterization of carrot landraces from puglia region (Southern Italy). Sustainability 2021; 13: 3940.

Bozalan NK., Karadeniz F. Carotenoid profile, total phenolic content, and antioxıdant activity of carrots. International Journal of Food Properties 2011; 14: 1060-1068.

Byrstricka J., Kavalcova P., Musilova J., Vollmannova A., Toth T., Lenkova M. Carrot (*daucus carota* l. *s*sp. *sativus* (hoffm.) arcang.) as source of antioxidants. Acta Agriculturae Slovenica 2015; 105(2):303-311.

Chaves MM., Flexas J., Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. Annals of Botany 2009; 103: 551-560.

Choi M., Baek J., Park E. Comparative bioavailability of *β*-carotene from raw carrots and fresh carrot juice in humans: a crossover study. Nutrition Research and Practice 2024; 19(2): 215-224.

Conversa G., Bonasia A., Natrella G., Lazzizera C., Elia A. Peeling affects the nutritional properties of carrot genotypes. Foods 2022; 11: 45.

Davarcı A., Kadiroğlu P., Dıblan S., Selli S., Kelebek H. ınfluence of processing steps on phenolic composition of clarified and unclarified pomegranate juices as characterized by LC-DAD-ESI-MS/MS. Journal of Food Processing Preservetion 2019; 43: e14018.

Ergun M., Süslüoğlu Z. Evaluating carrot as a functional food. Middle East Journal of Science 2018; 4(2): 113-119.

Hagos M., Redi AM., Chandravanshi BS., Yaya E. Development of analytical methods for determination of *β*-carotene in pumpkin (*cucurbitamaxima*) flesh, peel, and seed powder samples. Hindawi International Journal of Analytical Chemistry 2022; 9363692.

Kaçar B., İnal A. Plant analysis. Nobel Pres 2008; 1241: 891.

Keser D., Güçlü G., Kelebek H., Keskin M., Soysal Y., Şekerli YE., Arslan A., Selli S. Characterization of aroma and phenolic composition of carrot (*daucus carota* ‘nantes’) powders

obtained from ıntermittent microwave drying using GC–MS and LC–MS/MS. Food and Bioproducts Processing 2020; 119: 350-359.

Keskin M., Güçlü G., Şekerli YE., Soysal Y., Selli S., Kelebek H. Comparative assessment of volatile and phenolic profiles of fresh black carrot (*daucus carota* l.) and powders prepared by three drying methods. Scientia Horticulturae 2021; 287: 110256.

Koley TK., Singh S., Khemariya P., Sarkar A., Kaur C., Chaurasia SNS., Naik PS. Evaluation of bioactive properties of ındian carrot (*daucus carota* l.): a chemometric approach. Food Research International 2014; 60: 76-85.

Leja M., Kaminska I., Kramer M., Kaul AM., Kammerer D., Carle R., Baranski R. The content of phenolic compounds and radical scavenging activity varies with carrot origin and root color. Plant Foods Human Nutrition 2013; 68: 163-170.

Lisiewska Z., Kmiecik W., Gebezynski P. Effects on mineral content of different methods of preparing frozen root vegetables. Food Science and Technology 2006; 12(6): 497-503.

Mandrich L., Esposito AV., Costa S., Caputo E. Chemical composition, functional and anticancer properties of carrot. Molecules 2023; 28: 7161.

Masuko T., Minami A., Iwasaki N., Majima T., Nishimura SI., Lee, YC. Carbohydrate analysis by a phenol–sulfuric acid method in microplate format. Analytical Biochemistry 2005; 339(1): 69-72.

Matejkova J., Petrikova K. Variation in content of carotenoids and vitamin C in carrots. Notulae Scientia Biologicae 2010; 2(4): 88-91.

Mechri B., Tekaya M., Hammami M., Chehab H. Effects of drought stress on phenolic accumulation in greenhouse-grown olive trees (*olea europaea*). Biochemical Systematics and Ecology 2020; 92: 104112.

Meteroloji Genel Müdürlüğü, 2024. Resmi İklim İstatistikleri Ulaşım tarihi: 14 Eylül 2025. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx

Nagraj GS., Jaiswal S., Harper N., Jaiswal AK. Carrot. Nutritional composition and antioxidant properties of fruits and vegetables. Scientific African 2020; 12: e00801.

Olalude CB., Oyedeji FO., Adegboyega AM. Physicochemical analysis of *daucus carota* (carrot) juice for possible ındustrial applications. Journal of Applied Chemistry 2015; 8(8): 110-113.

Oue F., Hou XL., Wang GL., Xu ZS., Tan GF., Li T., Wang YH., Khadr A., Xiong AS. Advances in research on the carrot, an important root vegetable in the apiaceae family. Horticulture Research 2019; 6: 69.

Purewal SS., Verma P., Kaur P., Sandhu KS., Singh RS., Kaur A., Salar RK. A Comparative study on proximate composition, mineral profile, bioactive compounds and antioxidant properties in diverse carrot (*daucus carota* l.) flour. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 2023; 48: 102640.

Sarker U., Oba S. Drought stress enhances nutritional and bioactive compounds, phenolic acids and antioxidant capacity of amaranthus leafy vegetable. BMC Plant Biology 2018; 18: 258.

Sharma A., Shahzad B., Rehman A., Bhardwaj R., Landi M., Zheng, B. Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. Molecules 2019; 24: 2452.

Sharma KD., Karki S., Thakur NS., Attri S. Chemical composition, functional properties and processing of carrot-a review. Hournal of Food Science And Technology 2012; 49(1): 22-32.

Singh DS., Beloy J., Mclnerney JK., Day L. Impact of boron, calcium and genetic factors on vitamin C, carotenoids, phenolic acids, anthocyanins and antioxidant capacity of carrots (*Daucus carota*). Food Chemistry 2012; 132: 1161-1170.

Singleton VL., Rossi JA. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic–phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 1965; 16(3): 144–158.

Sitkey V., Cicova I., Docolomansky P., Havrlentova M., Ivanisova E., Belajova E. Comparison of the chemical composition and morphological characteristics of different carrot varieties. Journal of Micobiology, Biotevhnology and Food Siences 2024; 14(2): 10779.

Tian Z., Dong T., Wang S., Sun J., Chen H., Zhang N., Wang S. A comprehensive review on botany, chemical composition and the ımpacts of heat processing and dehydration on the aroma formation of fresh carrot. Food Chemistry 2024; 22: 101-201.

Wanna C. Free radical scavenging capacity and total phenolic contents in peel and fleshy crude extracts of selected vegetables. Pharmacogn Journal 2019; 11(6): 1351-1358.

Wierzbowska J., Cwalina-Ambroziak B., Zalewska M. Cultivation system versus the content of minerals in carrot (*daucus carota* l.) roots. Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus 2017; 16(6): 111-123.

Yusuf E., Tkacz K., Turkiewicz IP., Wojdylo A., Nowicka P. Analysis of chemical compounds' content in diferent varieties of carrots, including qualifcation and quantifcation of sugars, organic acids, minerals, and bioactive compounds by UPLC. European Food Research and Technology 2021; 247: 3053-3062.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2529-2545, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2529-2545, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Havacılıkta Görev Ortaklığı Çağı: İnsanlı/İnsansız Uçuş Konsepti ve Uygulamaları

İhsan KOCA[1], Yıldız BEKTAŞ BİRCAN[2], Serdar GÖKDEMİR[3]*

[1,2,3] Türk Havacılık ve Uzay Sanayii Fethiye Mah. Havacılık Bulvarı No: 17, Kahramankazan, Türkiye

[1]https://orcid.org/0009-0003-0183-0110
[2]https://orcid.org/0009-0006-3359-2593
[3]https://orcid.org/0009-0003-2474-1794
*Sorumlu yazar: gokdemirserdarr@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 27.06.2025
Kabul tarihi 04.12.2025
Online Yayınlanma: 15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
MUM-T
İnsansız sistemler
Harp sahası
Otonomi

ÖZ

Teknolojinin harp alanına entegrasyonu ile modern harp sahasında önemli bir değişim/dönüşüm yaşanmaktadır. "Havacılık ve Uzay" alanında çalışılan en güncel konulardan birisi olan İnsanlı/İnsansız Uçuş Konseptinin (MUM-T) operasyonel kabiliyeti arttırma, çoklu hedeflere eşzamanlı müdahale edebilme ve maliyet-etkin çözümleriyle harp teknolojisinin merkezine yerleşeceği öngörülmektedir. Dünyanın önde gelen ülkeleri bu alanda çalışmalar yapmakta ve sonuçlarını paylaşmaktadır. Bu çalışmada; insansız sistemlerin operasyonel kabiliyetleri üzerinde durulmuş, MUM-T konsepti faydaları ve riskleri ile ele alınmış, otonomi kavramına değinilmiş ve çeşitli otonomi ölçekleri anlatılmış, en son 4 farklı konsept/senaryo oluşturulmuş ve senaryoların içerikleri özetle anlatılmıştır. Çalışmanın temel amacı MUM-T uçuş konseptini incelemek ve olası kullanım alanlarıyla ilgili değerlendirmelerde bulunmaktır.

The Era of Mission Partnership in Aerospace: Applications of Manned/Unmanned Teaming

Research Article

Article History:
Received: 27.06.2025
Accepted: 04.12.2025
Published online: 15.12.2025

Keywords:
MUM-T
Unmanned systems
Warfare field
Autonomy

ABSTRACT

With the integration of technology into the warfare field, a significant change/transformation is taking place in the modern warfare field. The Manned-Unmanned Flight Concept (MUM-T), which is one of the most popular topics studied in Aerospace field, will probably be at the center of warfare technology with its ability to increase operational capability, simultaneous operations to multiple targets and cost-effective solutions. The leading countries of the world work in this field and share their results. In this study; the operational capabilities of unmanned systems are studied, the meaning of the MUM-T concept is emphasized, the concept is discussed with its benefits and risks, the concept of autonomy is mentioned and various autonomy scales are discussed, finally, 4 different MUM-T scenarios/concepts are created and the contents of the scenarios are discussed in summary. The main purpose of the study is to examine the MUM-T flight concept and make comments about its areas of use.

To Cite: Koca İ., Bektaş Bircan Y., Gökdemir S. Havacılıkta Görev Ortaklığı Çağı: İnsanlı/İnsansız Uçuş Konsepti ve Uygulamaları. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2529-2545.

1. Giriş

Yakın gelecekte, geleneksel askeri faaliyetlerin yerini insanlı ve insansız hava araçlarının birlikte rol aldığı ve görev dağılımlarının olduğu uçuş konsepti alacaktır. Hava araçlarının birbirleriyle haberleştiği, gelişmiş otonom sistemlerin ve yapay zekâ algoritmalarının devrede olduğu bir teknoloji ortamında büyük bir değişim yaşanmaktadır. MUM-T konsepti her ne kadar askeri teknoloji alanında daha çok gündeme geliyor olsa da sivil alanda da geniş kullanım potansiyeline sahiptir.

Bu çalışmada, öncelikli olarak insansız sistemlerin operasyonel kabiliyetleri ile MUM-T konseptinin muhtemel fayda ve riskleri ele alınmakta; otonomi seviyeleri ve görev paylaşımı hususunda insanlı/insansız iş birliğinin çerçevesi çizilmektedir. Ayrıca afet ve acil durum yönetimi, düşman hava savunma sistemlerinin baskılanması, KBRN keşif, derin taarruz ve müşterek kara/deniz harekâtları gibi farklı senaryolar üzerinden MUM-T ve sürü uçuş konseptlerinin uygulama örnekleri tartışılmaktadır. Son olarak, İHA tehdidine karşı geliştirilen yöntemler üzerinde durulmaktadır. Çalışma neticesinde MUM-T konseptinin hem askeri hem de sivil kullanım senaryo/konsept örnekleri incelenmektedir.

2. İnsansız Sistemlerin Operasyonel Kabiliyetleri ve Katkıları

Operasyonel anlamda, herhangi bir harekât safhasında amaç, hava sahası üstünlüğünün ele geçirilmesidir. Bu şekilde kara, deniz gibi diğer kuvvet unsurları sahip oldukları yetenekler çerçevesinde harekâta iştirak edebilmektedir.

Hedef bölgede hava sahası üstünlüğünün ele geçirilmesi, karmaşık ve çok yönlü bir faaliyettir. Derin bir istihbarat bilgisine dayanacak bu faaliyet, iyi planlanmalıdır. Hedef bölgede bulunan radarlar, havada ve yerde konuşlu hava savunma birimleri, dost unsurların tespiti durumunda karşı koyma imkân ve kabiliyetleri tüm detaylarıyla bilinmelidir. Amaç; bu imkân ve kabiliyetleri etkisiz hale getirebilmek için nelerin yapılması gerektiğini ortaya koymak olacaktır. Bu amaca yönelik olarak yapılacak plan safhasında, elde bulunan ve amaca yönelik tüm yeteneklerden faydalanılmalıdır. Bu yetenekler, iyi bir plan dahilinde, bir hiyerarşi içerisinde ve birbirlerine destek olacak şekilde kullanılmalıdır. Elde mevcut kuvvet unsurlarının kullanımı noktasında, bilinen bazı kabullerden hareket edilebilir. Bunlardan en bilineni, hedef bölgeye yapılacak hava operasyonunda "Paket Kol" şeklinde adlandırabileceğimiz bir uçuş düzeni ile yapılanıdır. Paket Kol; ihtiyaç çerçevesinde, oluşturulacak bir hava görev gücünde değişik yeteneklere sahip olan hava unsurlarının bir arada hedef bölgesine gitmesi ve her biri kendileri için planlanan görevleri icra etmesi ile arzu edilen sonucun alınması şeklinde tanımlanabilir. Birden fazla Hava Aracının (H/A) belirlenen kol/uçuş düzeninde hedef bölgeye intikal etmeleri şeklinde uygulanmaktadır. Burada bahsedilen düzen; hedef hava savunma sistemlerinin dost unsurları tespit etmesini önlemek ve operasyon kolaylığı sağlaması amacıyla değişik formasyon şekillerinde oluşturulabilmektedir.

Bu kapsamda, sahip olunan yeteneklerin sınırsız olmadığı, dengeli kullanılması gerektiği ve maliyet etkin çözüm yöntemlerinin tercih edilmesi gerektiği noktasında planlamalar yapılmalıdır. Yapılacak planlamalarda;

- Hava gücü varlığının istenen bölgede kesintisiz ve yüksek tempoda devam ettirilmesi,
- Hedef üzerindeki baskının muhafaza edilmesi,
- Hedeflerin sıralanması ve önceliklendirilmesi,
- Muhtemel risk ve kayıpların asgari seviyede tutulmasına yönelik önlemlerin alınması,
- Gayretlerin birleştirilmesi, kuvvetlerin eş güdüm içerisinde kullanılması ve ortak çalışabilirliğin oluşturulması önemlidir.

Ancak, günümüzde gelişen teknoloji ve H/A'larının farklılaşması, insanlı ve insansız H/A'larının birlikte görev yapmaya başlayacak olmaları, farklı faydalı yüklerin kullanıma alınması ile söz konusu uçuş düzeni değişik şekillerde tanımlanmaya, içerik olarak da farklılıklar göstermeye başlamıştır. Bu farklardan en göze çarpanı; kol düzeninin artık otonom olarak oluşturulmaya başlanmasıdır.

Burada insanlı ve insansız hava araçlarının birlikte uçmasına ilişkin olarak literatürde ortaya çıkan bazı hususlar anlatılmaya çalışılacaktır.

İnsanlı ve insansız H/A'larının birlikte uçması (MUM-T) kavramı son on yılda daha fazla telaffuz edilmeye başlanmıştır. Burada kapsam çok özetle; insanlı muharip unsurların yerine, aynı görevi (hatta daha fazlasını) insansız H/A'larına yaptırmak, bu şekilde İHA'ların sahip oldukları birçok avantajdan yararlanabilmek olarak tanımlanabilir. Anılan İHA'ların büyüklüklerine göre bazı özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Aşağıda gördüğümüz tüm İHA'lar ile MUM-T kabiliyeti sergilenebilmektedir. Kritik nokta ise bu İHA'ların diğer H/A'ları ile birlikte uçabilecek özelliklere (hız, irtifa tavanı, manevra kabiliyeti vb.) sahip olabilmesidir.

Tablo 1. İnsansız hava araçlarının sınıflandırılması (Lykou ve ark., 2020)

SINIF	KATEGORİ	ÖRNEK
Sınıf I (≤150 kg)	Mikro (<2 kg)	Black Widow
	Mini (2-20 kg)	Malazgirt Scan Eagle
	Küçük (>20 kg)	Hermes
Sınıf II (150-600 kg)	Taktik	Çaldıran Karayel
Sınıf III (>600 kg)	Orta İrtifa Uzun Havada Kalış (MALE)	Aksungur
	Yüksek İrtifa Uzun Havada Kalış (HALE)	Global Hawk
	Saldırı/ Muharebe	Anka-III Kızılelma

3.MUM-T Nedir?

İnsanlı/İnsansız Uçuş Konsepti (MUM-T), insanlı ve insansız hava araçlarının birlikte görev almasını sağlayan, son yıllarda literatüre girmiş ve dünyanın önde gelen ülkeleri tarafından üzerinde çalışılan, denemeleri ve testleri icra edilen yeni nesil harekât konseptidir. Bu konsept; taarruz, savunma, keşif,

sınır güvenliği, arama-kurtarma gibi birçok görev tipinde iş birliği şansı sunmaktadır (Airbus, 2025). Savaş uçağı, helikopter gibi insanlı platformların insansız hava aracı (İHA), insansız deniz aracı (İDA) ve insansız kara aracı (İKA) gibi platformlarla birlikte kullanılması hem operasyonel etkinliği ve başarı olasılığını arttırmakta, hem de olası riskleri azaltmaktadır.

MUM-T konseptinin özünde; makinelerin esneklik, dayanıklılık ve riske edilebilmeleri ile insanın etik yaklaşabilme ve sezgisel karar verebilme becerilerinin bir araya getirilme fikri yatmaktadır. Bu konseptin uygulanması sadece bilimsel/teknolojik çalışmaların icra edilmesi değil, aynı zamanda operasyon senaryolarının belirlenmesi, ilgili etik değerlerin oluşturulması, kullanıcı/personele gerekli eğitimlerin verilmesi gibi süreçleri de beraberinde getirmektedir.

3.1. MUM-T Konseptinin Kullanım Alanları

MUM-T konsepti yalnızca harp sahasında değil, aynı zamanda sivil alanlarda da geniş bir kullanım alanı potansiyeline sahiptir. Kullanım olasılığı olan bu alanların bir kısmı Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. MUM-T kullanım alanları

Kullanım Alanı	Örnekler
Askeri Faaliyetler	Keşif ve Gözetleme Hedef Tespiti / İmhası Sınır Güvenliği
Arama-Kurtarma	Afet Bölgelerinde İnsanlı/İnsansız H/A İş birliği
Endüstriyel Faaliyetler	Petrol ve Doğal Gaz Boru Hatlarının İncelenmesi
Görsel Şölen/ Eğlence	Dünyada sunulan hava gösterileri
Sivil Güvenlik	Bu sistemlerin jandarma, polis ve itfaiye vb. kurumların hizmetine sunulması, böylece içinden çıkılması zor durumlarda destek alınması

3.2. MUM-T Konseptinin Olası Faydaları

MUM-T konsepti hem harp alanında hem de sivil kullanımda önemli faydalara sahip olma potansiyelini taşımaktadır:

Risk Faktörünün Azaltılması: İnsansız hava araçları, riskli görev bölgelerinde (düşman tehdidi, kimyasal bölge, nükleer sızıntı vb.) insanlı savaş uçakları veya helikopterlerin görevlerini icra edebilecektir.

Durumsal Farkındalığın Arttırılması: İnsansız hava araçlarının sensörleri tarafından toplanacak verilerin insanlı hava aracı pilotu ile paylaşılması karar alma sürecini kolaylaştıracaktır.

Maliyet-Etkinlik: Normal koşullarda yüksek maliyetli insanlı hava araçlarının icra edeceği görevleri çok daha düşük maliyetli insansız hava araçları icra edecek ve ekonomik anlamda önemli ölçüde tasarruf elde edilebilecektir.

3.3.MUM-T Konseptinin Olası Risk ve Negatif Yönleri

MUM-T konsepti her ne kadar birçok avantaj ve fırsat sunsa da bazı negatif yanları ve olası riskleri bulunmaktadır:

Yüksek AR-GE Maliyetleri: Bu denli bir teknolojinin geliştirme ve olgunlaşma sürecinin oldukça maliyetli olacağı aşikardır.

Teknik Arızalar: Birden fazla sistemin bir arada faaliyet göstermesinin beraberinde çok fazla sayıda teknik problem getirmesi muhtemeldir (haberleşme problemleri vb.).

Koordinasyon Kayıpları: Birçok sistemin birlikte faaliyet göstermesi ileri düzeyde koordinasyonu mecbur kılmaktadır. Olası koordinasyon kayıpları görev sahasında büyük riskler barındırmaktadır.

Siber Saldırılar: Yeterli önlemin alınamaması durumunda, insanlı ve insansız sistemler arasındaki haberleşme ağları siber saldırılara karşı savunmasız kalabilirler.

3.4.MUM-T Konseptinin Gelişiminde Öne Çıkan Unsurlar: Veri Aktarımı, Görev Paylaşımı ve Otonomi

Veri Aktarımı: İnsansız hava araçlarının sensörlerinden gelen bilgilerin insanlı hava aracına aktarımı, hava araçlarının konum, irtifa, ekipman sağlığı ve diğer görev-kritik bilgilerini birbirleriyle paylaşması önem arz etmektedir. Bu sayede insanlı hava aracı pilotlarının ani gelişen durumlar karşısında karar verme sürecinde daha uygun karar alınabilmesi sağlanacak ve durumsal farkındalıkları artacaktır.

Görev Paylaşımı: İnsanlı ve insansız hava araçlarının kabiliyetlerine/işlevselliklerine göre görev paylaşımı yapması, her sistemin güçlü taraflarının kullanılması noktasında önemli olmaktadır.

Otonomi: MUM-T konseptinde gelişme kaydedildikçe insansız hava araçlarının daha fazla yetkiye sahip olması ve pilot rolünün zaman içerisinde azaltılması öngörülmektedir. Bir sonraki bölümde otonomi konusu üzerinde detaylıca durulmuştur.

3.5. MUM-T Konseptinde Otonomi

Havacılık alanında otonomi çalışmaları dünya genelinde yoğun bir şekilde devam etmesine rağmen, an itibariyle tam otonom görev icra eden herhangi bir silah sistemi henüz envantere alınmamıştır. Burada tam otonomi ile anlatılmak istenen; herhangi bir insan müdahalesine gerek kalmadan, kendi başına hedefleri seçip etki altına alabilen silah sistemleridir. Görev sürecinin başında gerekli programlama yapıldıktan sonra herhangi bir insan girdisine ihtiyaç bulunmamaktadır (man not in the loop) (Haber7, 2025). Fakat, çeşitli askeri sistemler yarı otonom olarak çalışmakta, görev icrası esnasında insan kontrolü veya girdisi gerektirmektedir. Örneğin, günümüzde kullanılan İHA sistemleri; kalkış/iniş ve navigasyon gibi otonom yeteneklere sahiptir. Tam otonom sistemlerin henüz kullanılmamasının sebepleri arasında; değişen görev ortamında karmaşık seçimler yapmak, hedefler arasında doğru bir şekilde ayrımda bulunma ve bir görevde kullanılacak güç miktarını belirlemek gibi hususlarda zaruri olan insan yargısına olan ihtiyaçtır. (Kirkpatrick, 2016). Human Rights Watch tarafından yayımlanan bir raporda, öldürücü otonom silah sistemlerinin hedef tespiti ve angajman kararında insanın doğrudan

komut verdiği, insanın yalnızca gözetim rolünde olduğu ve insan denetiminin herhangi bir şekilde olmadığı sistemler olmak üzere üç ana kategoride ele alındığı vurgulanmaktadır (Human Rights Watch, 2012).

Bu noktada, bir İnsanlı/İnsansız ortak operasyonunda sorumluluk sınırlarının nasıl çizileceğin ve hava araçlarına verilecek rollerin tespit edilmesi/belirlenmesi önemlidir. Otonomi seviyesinin düşük olması operasyon verimliliğini düşürebilirken, çok yüksek olması bazı riskler doğurmaktadır. Bu nedenle, görev tipleri/fonksiyonlar özelinde bir çalışma ve ölçeklendirme yapılması gerekmektedir. Dünya genelinde birçok otonomi ölçeği bulunmakla birlikte, literatüre halen yeni ölçekler kazandırılabilmektedir. Literatürde bulunan otonomi ölçeklerinden bazıları:

Amerika Donanması Deniz Araştırma Ofisi, 2015 yılında, 6 seviyeden oluşan bir otonomi ölçeği oluşturmuştur (Tablo 3). Bu ölçeklendirme ile tanımlanan otonomi seviyeleri, sistemin karar alma yetkinliğini altı seviyede sınıflandırmaktadır. Bu sınıflandırma, tamamen insan kontrolündeki sistemlerden (Seviye 1), hiçbir insan müdahalesi gerektirmeyen tam otonom sistemlere (Seviye 6 kadar geniş bir aralığı kapsamaktadır. Ara seviyelerde yer alan sistemler ise, insan girdisiyle çalışan (Seviye 2), görevleri devralabilen (Seviye 3) ve insan gözetimi ile sürdürülebilen (Seviye 4) sistemler olarak değerlendirilir. Seviye 5, insan ve sistemin birlikte davranış başlatabildiği, gelişmiş iş birliğine dayalı bir yapıyı temsil etmektedir. Seviye 6'da ise insan girdisinin hiç olmadığı görülmektedir.

Tablo 3. ABD donanması deniz araştırma ofisinin belirlediği otonomi seviyeleri (Williams ve Scharre, 2015)

Seviye	İsim	Tanım
1	İnsan tarafından işletilen	Sistemdeki tüm faaliyetler, insan tarafından başlatılan çevresel etkileşimlerin doğrudan sonucudur. Sistem yalnızca algılanan verilere tepki verebilir.
2	İnsan destekli	Sistem, insan girişiyle paralel olarak çalışabilir ve insanın istenen faaliyeti gerçekleştirme yeteneğini artırır. Ancak insan girdisi olmadan hareket edemez. Örnek: otomatik şanzıman, anti-blokaj fren sistemi (ABS).
3	Görev devredilmiş sistem	Sistem, insan tarafından yetki verildiğinde sınırlı kontrol faaliyetlerini yerine getirebilir. Bu seviye, otomatik uçuş kontrolleri gibi sistemleri kapsar. İnsan müdahalesiyle devreye girer ve yalnızca insanla dönüşümlü çalışabilir.
4	İnsan tarafından denetlenen	Sistem, insan tarafından verilen üst düzey yönergelere göre birçok faaliyeti gerçekleştirebilir. İç işleyişini şeffaf biçimde sunarak denetleyici insan tarafından kolayca yönlendirilebilir. Ancak kendi başına yeni davranışlar başlatamaz.
5	Karma inisiyatifli sistem	Hem insan hem sistem, algılanan verilere göre davranış başlatabilir. Sistem, açık ve örtük biçimde kendi davranışlarını koordine edebilir. İnsan operatör, sistemin davranışlarını kendi davranışları kadar iyi anlayabilir ve sistemin yetki düzeyini belirlemek için çeşitli mekanizmalar mevcuttur.
6	Tam otonom	Sistem, tasarlanmış tüm görevleri çevresel koşullar ne olursa olsun hiçbir insan müdahalesi olmadan yerine getirebilir.

NATO Endüstriyel Danışma Grubu ise 2004 yılında 4 seviyeli bir otonomi ölçeği belirlemiştir (Tablo 4). Bu tablo daha sonrasında bazı değişiklikler ile güncellenmiştir. Birinci seviye olan "Uzaktan Kontrol Edilen Sistem", tamamen operatör kontrolüne dayalı çalışırken; ikinci seviyede bulunan "Otomatik Sistem", önceden programlanmış sabit işlevlere göre hareket eder. Üçüncü seviyede yer alan "Öğrenmeyen otonom sistem", belirli kurallara dayalı olarak bağımsız karar verebilse de öğrenme

kabiliyetine sahip değildir. Dördüncü ve en ileri seviyede ise "Öğrenen otonom sistem" yer almakta olup, bu sistemler davranışlarını sürekli iyileştirebilmekte ve değiştirilebilir kurallar üzerinden öğrenme gerçekleştirebilmektedir.

Tablo 4. NATO endüstriyel danışma grubu ve NATO STO'nun oluşturduğu otonomi seviyeleri (NATO, 2004)

Seviye	İsim	Tanım
1	Uzaktan kontrol edilen sistem	Sistem davranışları ve tepkileri tamamen operatör girdisine bağlıdır.
2	Otomatik sistem	Davranış ve tepkiler, sistemin sabit ve önceden programlanmış işlevselliğine bağlıdır.
3	Öğrenmeyen otonom sistem	Davranışlar, sabit işlevsellik veya belirli kurallara göre belirlenir. Sistem, bu kurallara göre hedefe yönelik tepki verir fakat yeni durumlara uyum sağlama yeteneği yoktur.
4	Öğrenen otonom sistem	Davranışlar, hedefe yönelik tepki ve davranışları iyileştirmek üzere değiştirilebilen kural kümelerine dayanır. Ancak bu öğrenme, belirli sınır kuralları çerçevesinde gerçekleşir.

Ayrıca, TUSAŞ personeli tarafından 2023 yılında yapılan çalışmada, operatif seviyede, 11 adet fonksiyon olabileceği öngörülmüştür (Kasapoğlu ve ark., 2024). Bu fonksiyonlar:

- Karar verme/kaynak yönetimi
- Uçuş
- Sensör Yönetimi ve engellerden kaçınma
- Radar Faydalı Yükü
- Elektronik Harp Yükü
- Yayın kontrolü (EMCON)
- Haberleşme
- Sürü Hareketleri Yönetimi
- Dost-Düşman Tanıma/Görüntü Analizi
- Silah Yönetimi olarak belirlenmiştir.

Bu fonksiyonların her birinin altışar seviyeli otonomi seviyesi özgün olarak oluşturulmuş ve literatüre sunulmuştur. Fonksiyonlardan biri olan haberleşme fonksiyonunun otonomi seviyeleri örnek olması maksadıyla Tablo 5 ile gösterilmiştir.

Tablo 5. Haberleşme fonksiyonu için önerilen otonomi seviyeleri (Kasapoğlu ve ark., 2024)

Haberleşme Fonksiyonu	
Otonomi Seviyeleri	**Açıklama**
Seviye-0	İHA ekibi tarafından gerçekleştirilir.
Seviye-1	İHA ekibi tarafından gerçekleştirilir.
Seviye-2	İHA ekibi veya görev lideri yönetiminde muhabere teknikeri sorumluluğunda gerçekleştirilir. Sürü haberleşmesi için merkezcil sürü yönetim modeli uygulanır.
Seviye-3	Otonom olarak merkezcil sürü yönetim modeline göre yönetilir.
Seviye-4	Otonom olarak dağıtık sürü yönetim modeline göre yönetilir.
Seviye-5	Otonom olarak yürütülür.



Şekil 1. MUM-T konseptini gösteren örnek bir görsel (Haber7, 2025)

3.6. MUM-T Konseptinde Görev Planlama, Faydalı Yükler ve Karar Destek Süreçleri

Bu konuların neler olduğunu anlayabilmek için kullanılabilecek H/A ve onların faydalı yüklerinin (payload) neler olabileceğini konsept olarak kavrayabilmek lazımdır. Operasyonel sahada kullanıma girecek H/A'nın görevleri genel itibariyle;

- Hava-Hava
- Hava-Yer
- Elektronik Harp (EW) şeklinde bir sınıflamaya tabi tutulabilir.

İHA'ların sahip olduğu ve yakın gelecekte sahip olması muhtemel yeteneklerin istenilen amaç doğrultusunda kısa zamanda, maliyet-etkin ve düşük risk seviyesinde kullanılabilmesi kapsamında iş birliği ve birlikte çalışabilirlik (MUM-T) üzerinde çalışma ihtiyacı doğmuştur. İş birliği ve birlikte çalışabilirlik içeriğinde (Bektaş Bircan ve Koca, 2022);

- Yeteneklerin bir merkezi amaç üzerine yoğunlaştırılması (siklet merkezi oluşturma)
- Sonucunda tüm yetenekleri ile teçhiz edilmiş ve bir bütün olarak hareket edebilen yapının nihayetinde kendiliğinden Güç Çarpanı olması
- Sahip olunan faydalı yüklerin etki ve hassasiyetinin artırılması
- Beklenmedik/ani gelişen/çıkan durumlara (pop-up) müdahale edebilme,
- Link (veri bağı) menzilinden ve varlığından bağımsız olarak hareket edebilme
- İnsan kaybı risk olasılığını asgari seviyeye indirebilme

- Çok bilinmeyenli veya olası koşulların doğal veya doğal olmayan yöntemlerle değişebilme olasılığının yüksek olduğu operasyon bölgelerinde ön alma/tedbir alabilme şeklinde özetlenebilecek faydalarının ortaya çıkması söz konusudur.

Bu çerçevede H/A çok fazla sayıda ve çeşitte faydalı yükler kullanacaklardır. Kullanılacak mühimmatı da faydalı yük kapsamında değerlendirebiliriz. Her bir faydalı yük kendine has kullanım özellikleri ve teknik gereksinimleri içerecektir. Bu nedenle, tümü için detaylı bir Görev Planı işlem adımı gerçekleştirilmek zorundadır. Tüm MUM-T katılımcılarını düşündüğümüzde, bu görev planlamada:

- Zaman
- Rota
- Emir komuta (C2)
- Karşılıklı etkileşim detaylarını planlayabilmek ciddi anlamda zaman, emek ve efor gerektirecektir.

Bu faaliyetleri eksiksiz ve en kısa zamanda yerine getirebilmek için Görev Planlama (Mission Planning-MP) faaliyetinde yapay zekâ (Artifical Intelligence-AI) destekli görev planlama birimlerine ihtiyaç duyulacaktır. Yapay zekâ, gelişen durum ve yetenekler karşısında sürekli kendisini yenileyen ve geliştiren bir algoritma ile oluşturulmuş olmalıdır. Ancak bu şekilde, karar vericiler ve operasyon planlama ünitelerine karar desteği sağlanabilecektir.

Karar destek görevini yerine getiren yapay zekâ bilgisayarının asli destek unsuru faydalı yük girdileridir. Bu faydalı yükleri özetle;

- Radarlar
- Görüntüleme sistemleri
- Hedefleme sistemleri
- Elektronik Harp (EW) sistemleri şeklinde gruplandırabiliriz.

Faydalı Yük girdileri; EO/IR/Laser/RF ekipman girdileri olabileceği gibi, Elektronik Harp (Electronic Warfare-EW) kapsamındaki diğer (Electronic Attack-ET, Electronic Support-ES, ELINT, COMMINT, SIGINT vb.) faydalı yükler de olabilir. Faydalı yüklerin bilgi toplama-işleme süreçleri kısaca şöyle özetlenebilir:

Planlama: Bilgi ihtiyaçlarının ve toplama vasıtalarının belirlenmesi

Toplama: Bilginin işlem yapan ve/veya istihbarat üreten unsurlara tedariki

İşlem: Toplanan bilginin istihbarat üretmeye uygun bir şekle çevrilmesi

Üretim: Tüm kaynaklardan gelen bilginin birleştirilmesi, analizi, değerlendirilmesi ve yorumlanması vasıtasıyla bilginin istihbarata çevrilmesi ve bilinen ve beklenen kullanıcı ihtiyaçlarını destekleyecek istihbarat sonuçlarının hazırlanması

Yayımlama: Bilginin kullanıcılara uygun bir şekilde aktarılması şeklindedir.

Bu nedenle; Görev Planlama birimini devamlı suretle besleyen bir Bilgi Füzyon Merkezi (BFM) yapılanmasının mutlaka oluşturulması gerekmektedir. BFM, görev öncesinde görev planı girdilerini

sağlarken, görev esnasında da gelişen durumları (Pop -Up) hızlı bir şekilde değerlendirip kullanıcıya bir sonuç olarak sunabilecek imkân ve kabiliyete sahip olmalıdır.

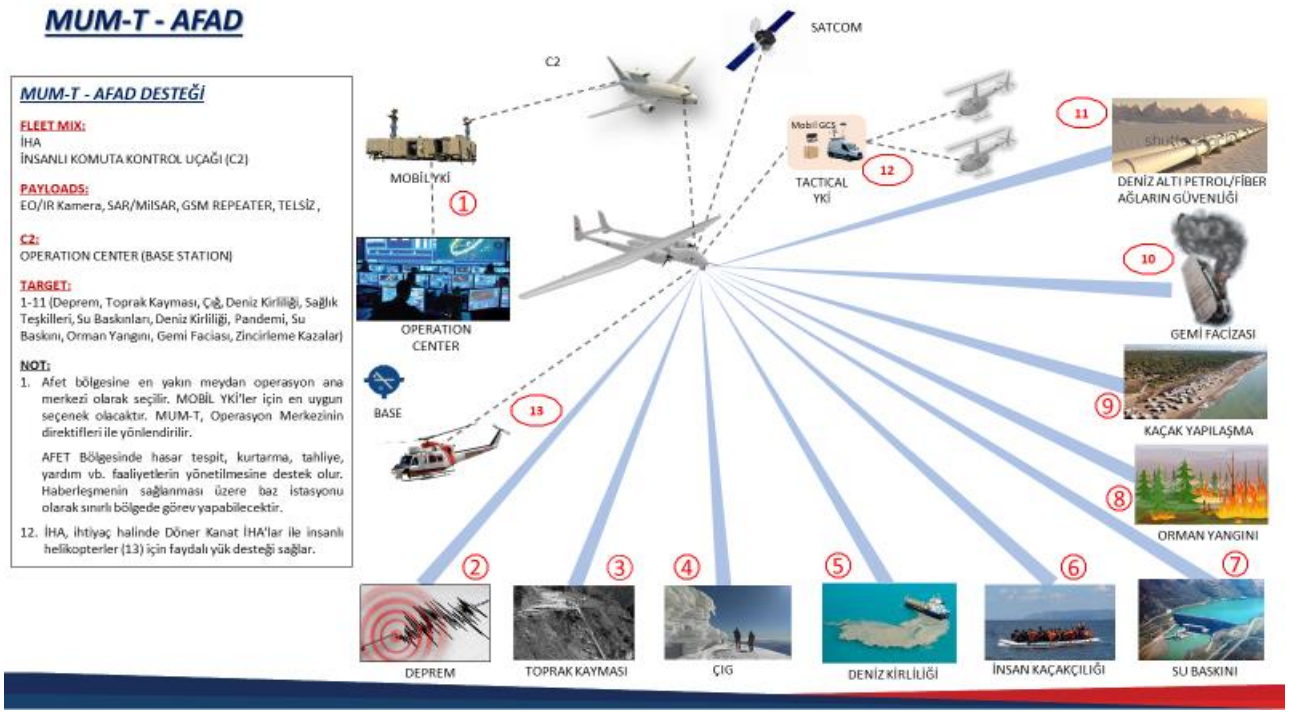
4. MUM-T Konseptli Örnek Harekât Senaryolarının İncelenmesi

Yapılan çalışmalara ilişkin tahminleri güçlendirme ve ortaya çıkacak ürün/konseptin gerçek ortamdaki etkilerini öngörebilme ihtiyacı, konsept/senaryo çalışmalarının yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu konsept/senaryoların analiz edilmesi ve ürün/konsept hakkında geri bildirimlerde bulunulması, ihtiyaçların sağlıklı bir şekilde belirlenmesi noktasında oldukça kıymetli olmaktadır. Bu doğrultuda, insansız hava aracı ürünlerinin insanlı platformlar ile birlikte yapabileceği görev senaryoları aşağıda belirtilen 5 ana başlık altında incelenmiştir.

- Afet ve Acil Durum Yönetiminde MUM-T
- Sürü Taarruzu: Düşman Hava Savunma Sistemlerinin İmhası
- İnsanlı/İnsansız Uçuş Konsepti ile Kimyasal, Biyolojik, Radyoaktif ve Nükleer (KBRN) Keşif
- İnsanlı/İnsansız Sistemlerle Sürü Hücumu: Taarruz ve Derin Taarruz Görevi
- Denizde ve Karada MUM-T (İHA, İDA, İKA)-OPERATİF İHA/DÖNER KANAT)

Bu başlıkların her biri için genel bir harekât ortamı ele alınmış, ihtiyaçlar belirlenmiş ve elde bulunan kabiliyetlerle bir konsept operasyon senaryosu çalışılmıştır.

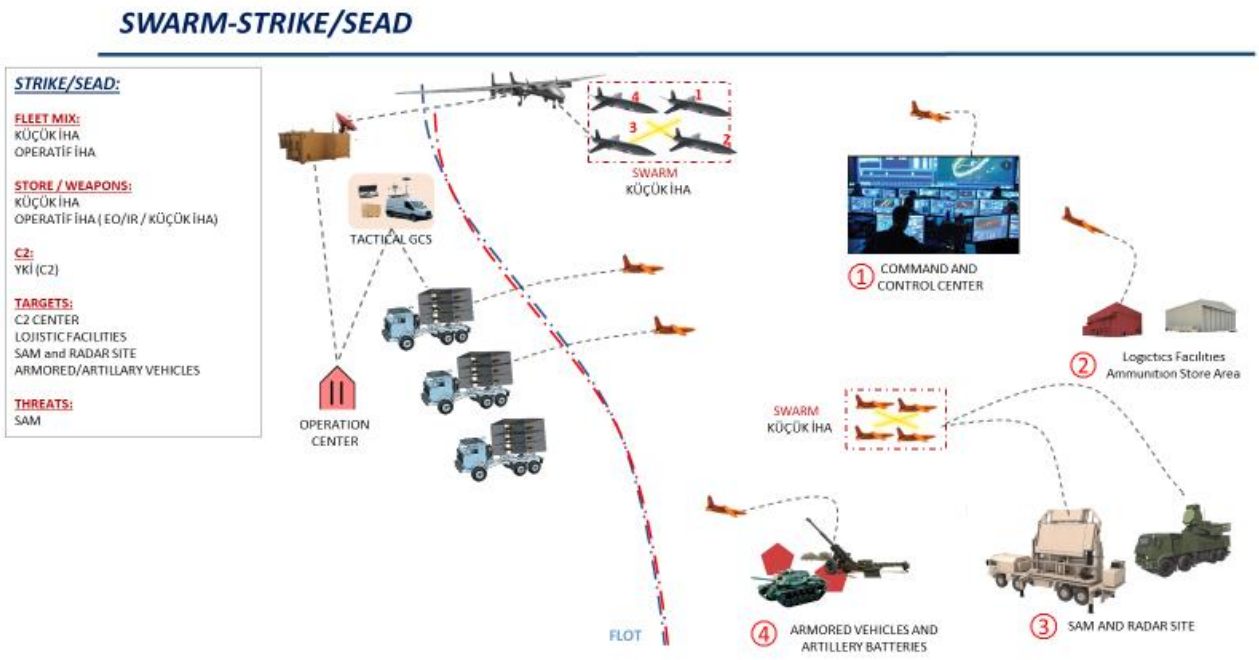
Şekil 2 ile gösterilen ilk senaryoda, daha çok sivil alanda kullanıma örnekler verilmiştir.



Şekil 2. Afet ve Acil Durum Yönetiminde MUM-T

Yaşanabilecek afet durumlarında İHA'ların imkân ve kabiliyetlerinin kullanılabileceği, bu imkân ve kabiliyetlerin insanlı başka bir uçar platform tarafından yönetilebileceği ve yönlendirilebileceği gösterilmektedir. Senaryoda, operatif seviye İHA'lar ile afet bölgesinde hasar tespiti yapılabileceği, durumsal farkındalık ve karar vericilere karar desteği sağlanabileceği, ihtiyaçların görülebileceği, başta güvenlik önlemlerinin alınması olmak üzere, kurtarma ve yardım operasyonlarının yönlendirilebileceği anlatılmaktadır. Diğer taraftan, afet bölgesinde Taktik Yer Kontrol İstasyonları vasıtasıyla, insanlı komuta/kontrol uçağı tarafından verilecek karar neticesinde, bölgede insansız döner kanat İHA'lar ile afet bölgelerine sağlık/lojistik malzemelerinin taşınabileceği, durumsal farkındalık sağlanabileceği, karar vericilere karar desteği sağlanabileceği anlatılmaktadır. Link bağlantısının sağlanamadığı diğer afet bölgelerinde de insanlı helikopterler de aynı şekilde yapılan/planlanan operasyonlara katılımı ve iş paylaşımı tek merkezden (insanlı komuta kontrol uçağı tarafından) yönlendirilebilecektir. Ayrıca, yüksek değerlikli tesis ve altyapıların 7/24 ve kesintisiz olarak kontrol edilmeleri ve güvenlik tedbirlerinin aksatılmadan devam etmesi ihtiyacının da MUM-T ile sağlanabileceği görülmektedir. Bu senaryoda, haberleşmenin tüm operasyonlar için vazgeçilmez bir ihtiyaç olarak ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

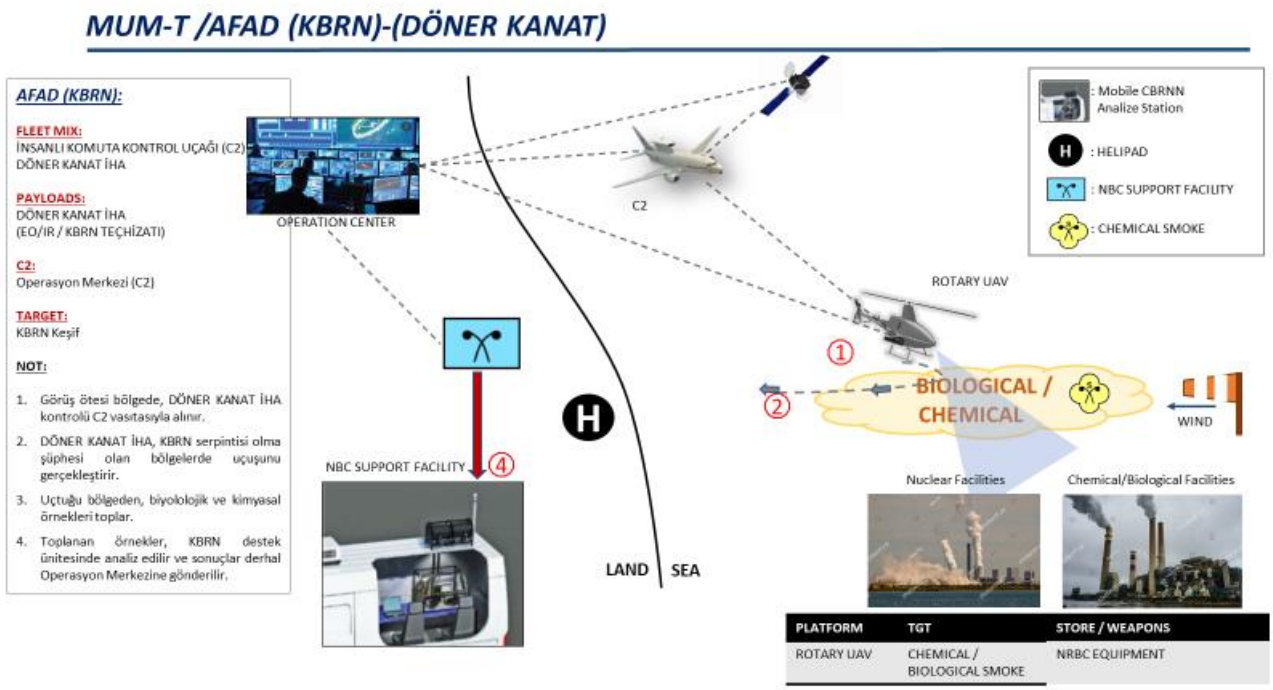
Şekil 3 ile gösterilen ikinci senaryoda; Sürü (Swarm), uçuş yeteneği kullanılarak, düşman hedef bölgesinde muhtemel hedeflere yapılabilecek operasyonlar temsil edilmiştir. Havadan (diğer bir operatif İHA'dan) veya yerden gönderilen küçük sınıftaki İHA'lar ile düşman Komuta Kontrol Merkezleri, Lojistik Altyapısı, Hava Savunma Sistemleri, değişik özellikteki silah sistemlerinin etkisiz hale getirilebileceği betimlenmiştir.



Şekil 3. Sürü Taarruzu: Düşman Hava Savunma Sistemlerinin İmhası

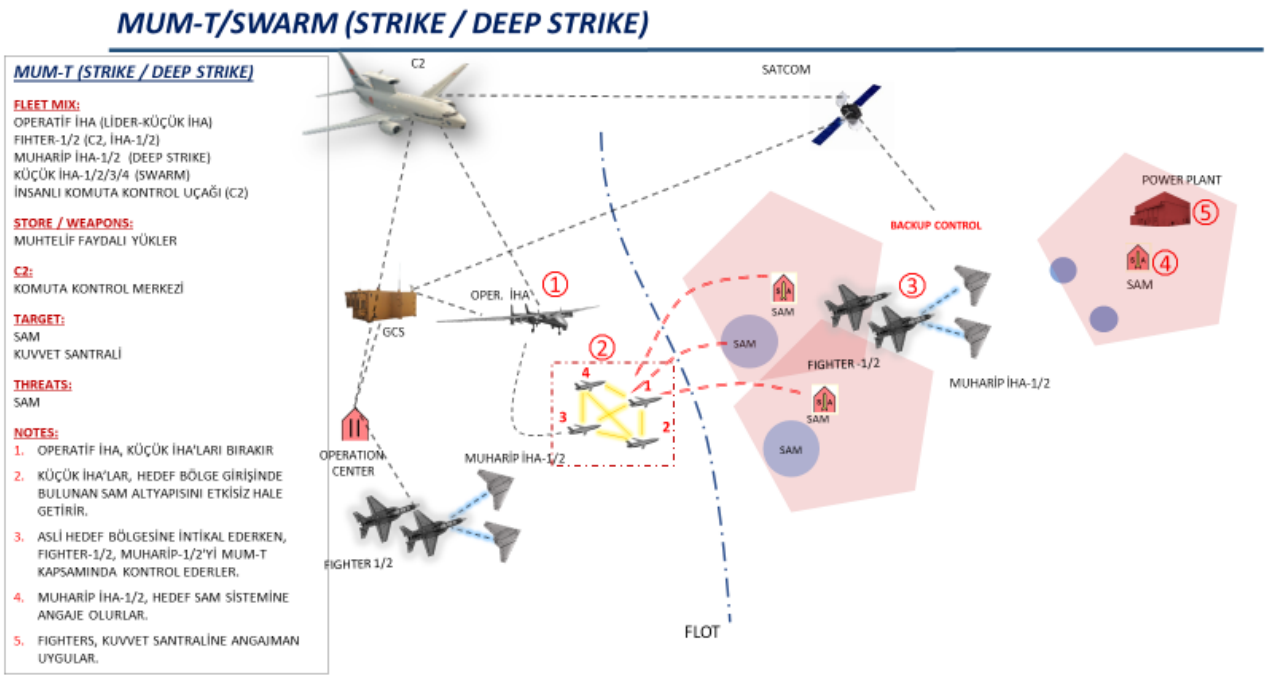
Sürü uçuş mantığı ile taarruz ile birden fazla küçük sınıftaki İHA'ların kullanılması ile baskın tarzında cereyan edecek bir angajman yapılabileceği anlatılmaktadır. Bu şekilde, düşman radar/hava savunma sistemlerine yakalanma ihtimalinin düşük olacağı, birden fazla H/A ile hedef üzerinde daha fazla etki sağlanabileceği, maliyet etkin çözümler üretilebileceği, personel/zaman tasarrufu sağlanabileceği, diğer silah sistemleri ile angajmanı mümkün olmayan hedeflerin etki altına alınmasının mümkün olabileceği anlatılmaktadır. Bu şekilde, küçük İHA kaybında, daha kolay bir şekilde yerine koyabilme imkanının sağlanması da gözden kaçırılmaması gereken bir avantajdır. Özellikle hava savunma sistemlerinin etkisiz hale getirilmesi noktasında, sürü şeklinde, fark edilmeden veya aldatarak angajman yapılması ile söz konusu altyapının etkisiz hale getirilmesinin, bilinen bir harekâtın en can alıcı faaliyeti olacağı gözden kaçmamalıdır.

Şekil 4 ile gösterilen üçüncü senaryoda, Kimyasal Biyolojik Radyoaktif ve Nükleer (KBRN) keşif faaliyetleri kapsamında, tespit ve teşhis noktasında İHA'ların kolaylıkla kullanılabileceği, kullanımın aynı zamanda diğer bir insanlı H/A tarafından da yönetilebileceği anlatılmaktadır. Bu kapsamda, bilinen veya şüphe duyulan bölgeye yönlendirilecek döner/sabit kanatlı İHA'lar vasıtasıyla bölgeden örneklerin alınabileceği, İHA'lara entegre KBRN faydalı yükleri ile incelemeler yapılabileceği anlaşılmaktadır. Alınan örneklerden bir kısmının (özellikle acil olanların) tespit ve teşhisinin havada yapılabileceği, bu sayede yapılan teşhis sonucunun bildirilmesi ile karar verici makamların acil eylem/işlem kararları verebilecekleri anlaşılmaktadır. Havada yapılamayan diğer inceleme ve tespit/teşhis faaliyetlerinin İHA'nın inmesi ile birlikte zaman geçirilmeksizin yapılabilmesi de ayrıca önemlidir. KBRN tehdidinin varlığı, bölgesel kirlenme, kirlenmenin yayılma/genişleme hızı ve yönü, vb. birçok bilgi zaman geçirilmeksizin hatta anında alabilmek İHA'lar ile mümkün olabilmektedir. Bu işlem sırasında insan (pilot/operatör vb.) hayatını riske atmamış olmak özellikle önemlidir.



Şekil 4. İnsanlı/İnsansız Uçuş Konsepti ile Kimyasal, Biyolojik, Radyoaktif ve Nükleer (KBRN) Keşif

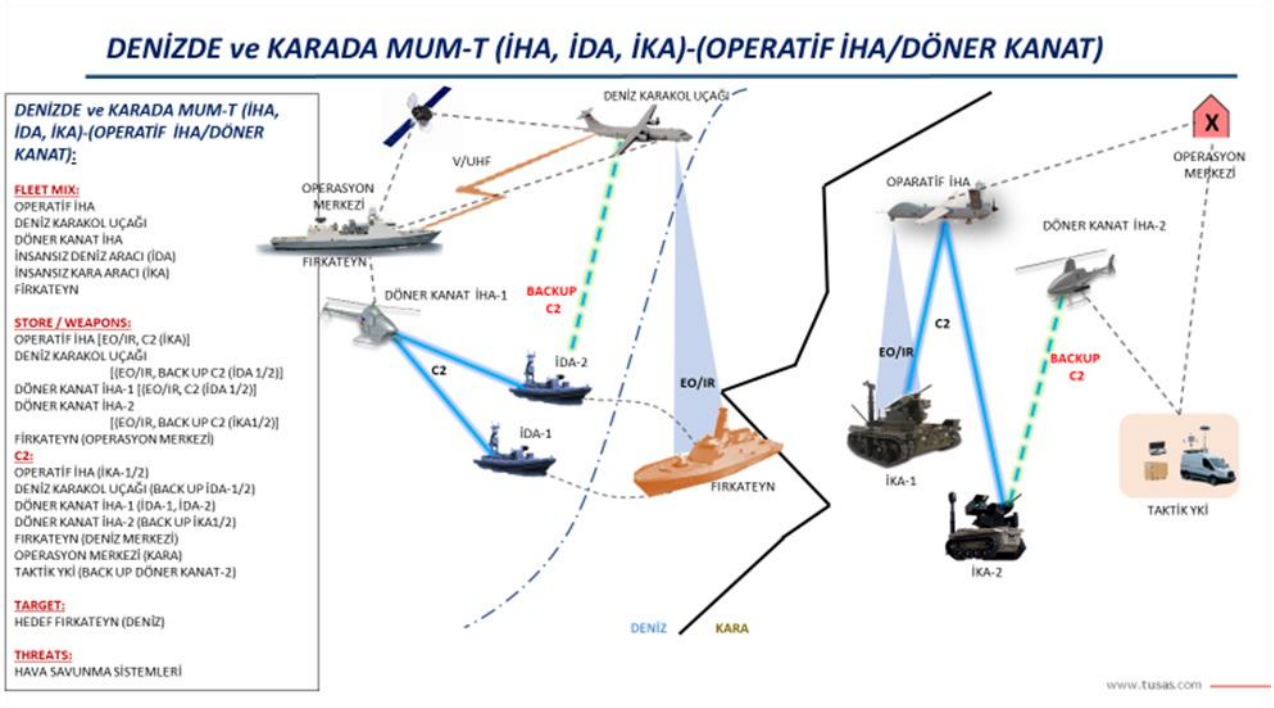
Şekil 5 ile gösterilen bir sonraki senaryo, hedef bölge derinliklerinde bulunan asli hedefi etki altına alabilmek maksadıyla olası harekât senaryolarını göstermektedir. Ana vurucu gücün, insanlı muharip uçak kontrolünde bulunan iki muharip İHA ile birlikte bir MUM-T olduğu görülmektedir. Hedefe gidiş yolunda bulunan SAM (Surface to Air Missile) Sistemleri operatif İHA'dan atılan ve sürü algoritması ile uçuş gerçekleştiren küçük İHA'larla etkisiz hale getirilmektedir. Önlerinde herhangi bir engel kalmayan asıl taarruz kolu (MUM-T) hedefe doğru yollarına devam edebileceklerdir.



Şekil 5. İnsanlı/İnsansız Sistemlerle Sürü Hücumu: Taarruz ve Derin Taarruz Görev

Asli hedef bölgesinde, MUM-T düzeninde, insanlı savaş uçağından gelen direktif sonucunda Muharip İHA'lar hedefe angaje olabileceklerdir. Taarruz sonu keşif faaliyetinde ihtiyaç halinde insanlı olan savaş uçakları nihai operasyonu gerçekleştirilmektedir. Burada, tüm İHA'ların hedeflerine yönelik olarak, sahip oldukları faydalı yük ve mühimmat konfigürasyonları bu senaryoda ayırıcı bir özellik olarak önümüze çıkmaktadır. Operasyon planlamacılarının, planlama aşamasında bu konuya özellikle dikkat etmeleri nihai başarı için vazgeçilmez bir nokta olarak görülmektedir.

Aşağıda gösterilen son konsept senaryo; kara ve denizde MUM-T faaliyetlerinde örnek olarak değerlendirilmiştir. Denizde; döner kanat İHA ile kontrol edilen muhtelif sayıda insansız deniz aracı (İDA) hedef su üstü unsurlara kolaylıkla angajman sağlayabilecektir. Link kaybı olması durumunda, havada bulunan deniz karakol uçağı tarafından komuta kontrol edilebilecektir. Tüm deniz operasyonları su üstü dost harp unsurunca komuta kontrol edilmektedir. Karada ise, insansız kara araçları bölgede bulunan operatif İHA tarafından yönlendirilmektedir. Operatif İHA, sahip olduğu diğer faydalı yükler vasıtasıyla, hedef tespit ve teşhisi yapabilmektedir. Tüm operasyon merkezi tarafından yönlendirilmekte ve takip edilmektedir. Olası link kaybında, harekete hazır halde veya havada olan döner kanat İHA tarafından yapılabilmesine yönelik tüm tedbirler alınacaktır.



Şekil 6. Denizde ve Karada MUM-T (İHA, İDA, İKA)-OPERATİF İHA/DÖNER KANAT)

5. İHA Tehdidine Karşı Yöntemler

İnsansız hava araçları, karşı unsurların kullanımına geçtiğinde büyük riskler barındırmaktadır. Bu noktada, bu sistemlerin kullanımı ve geliştirilmesine olduğu kadar, karşı güçlerin eline geçtiği zaman neler yapılması gerektiği üzerine de düşünmek, yukarıda işlenen benzer senaryoları oluşturmak gerekmektedir. Bu sistemlerin özellikle sivil yerleşim yerlerinde kontrolsüz kullanımı büyük felaketlere yol açabilmektedir. Kontrolsüz güç unsurlarının elinde bulunan insansız hava araçlarının ilk aşamada tespit ve teşhisi, ikinci aşamada ise imhası üzerine çalışılmalıdır. İHA'ların tespit/teşhis yöntemleri incelendiğinde aşağıda belirtilen teknolojilere dayanan sistemler ön plana çıkmaktadır (Genç ve Erciyes, 2020):

- Radar
- Radyo Frekansı (RF)
- Elektro-Optik
- Kızıl Ötesi
- Akustik
- Çoklu Sensör

İnsansız hava araçlarının etkisiz hale getirilmesi yöntemleri incelendiğinde ise belirtilen metotlar göze çarpmaktadır (Genç ve Erciyes, 2020).

- RF Karıştırma
- GNSS Karıştırma
- Kamera Köreltme

- Lazer Kullanımı
- Güçlü Mikrodalga ile Elektronik Sistemlerin Etkisiz Hale Getirilmesi
- Dron/İHA'ya ağ atma
- Mühimmat ile Vurma
- Diğer Bir İHA ile Önleme
- Yöntemlerin Çoklu Kullanımı

Bu faaliyetler çerçevesinde en dikkat çeken husus, RF/GNSS sinyalinden bağımsız olarak tam otonom uçan H/A'larına karşı alınabilecek tedbirlerin sınırlı olmasıdır. Söz konusu tam otonom (AI destekli) İHA Sistemlerinin en teknolojik savunma sistemlerine dahi zarar verebileceği/yok edebileceği değerlendirilmektedir. İnsansız Hava Aracı tehditlerinin ortadan kaldırılması/azaltılması; dünyanın uzun zaman alan bir çalışması olmaya devam edecektir (Genç ve Erciyes, 2020).

6. Sonuç

MUM-T ve Sürü Uçuş Konsepti, geçen zaman içerisinde operasyonların temel kullanım konsepti haline dönüşecektir. İHA'lar ile İnsanlı Hava Araçları iş birliği halinde kendilerine verilen görevleri en etkin bir şekilde yerine getireceklerdir. Çok hızlı gelişen bu görev konsepti (MUM-T) sayesinde, operasyon risk seviyeleri kabul edilebilir seviyeye indirilmiş olurken maliyet etkin bir çözüm ile görevler icra edilecektir. Her iki platformun sahip olduğu yeteneklerin birleştirilerek hedefin etkisiz hale getirilmesine yönelik bir sinerji oluşturulmuş olacaktır. Yakın gelecekten itibaren, MUM-T (Sürü uçuş konseptini de buna ekleyebiliriz.), uçuş ve görev paylaşımı oyun değiştirici özellikleri ile bilinen tüm harekât konseptlerini alt-üst edecektir. Bu nedenle halihazırda kullanımı devam eden klasik harp silah ve araçlarının kullanımı tekrardan değerlendirilecektir. (Tank, büyük savaş gemileri, helikopter vb. kullanımı gibi)

Sürü ve MUM-T operasyon düzeninde, ekip içerisinde bulunan tüm faydalı yük ve mühimmat, sanki tek bir H/A'nda ve kullanıma hazır şeklinde operasyona gidebilir olacaktır. Bu düzenin etkinliği, yetenekli bir kol uçuşu/sürü otopilotunun kullanıma alınması sonucunda daha da artacaktır. Arzu edilen otonomi seviyelerinde ve kolay bir şekilde operasyonlar gerçekleştirilebilecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye benzer oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Airbus. Manned-unmanned teaming – MUM-T. https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/manned-unmanned-teaming-mum-t. Erişim tarihi: 25.01.2025.

Bektaş Bircan Y., Koca İ. İnsanlı ve insansız sistemlerin ortak kullanım konsepti. XII. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı Bildiriler Kitabı 2022; 102–108.

Genç YM., Erciyes E. İnsansız hava araçları (İHA) tehditleri ve güvenlik yönetimi. Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi 2020; 2(2): 36-42.

Haber7. Abd Türkiye'ye F-35 verecek mi? İşte 3 soruda F-16 ve F-35'lerde son durum!. https://ekonomi.haber7.com/foto-galeri/89123-abd-turkiyeye-f-35-verecek-mi-iste-3-soruda-f-16-ve-f-35lerde-son-durum. Erişim tarihi: 25.01.2025.

Human Rights Watch. Losing humanity: The case against killer robots. Human Rights Watch Report 2012, New York, USA.

Kasapoğlu G., Öztürk T., Demir M., Korkmaz A., Şahin F. A research on determining the autonomy levels necessary for managing combatant UAVs from manned combat aircraft. EMO Bilimsel Dergi 2024; 14(1): 61-72.

Kirkpatrick K. Can we trust autonomous weapons?. Communications of the ACM 2016; 59(12): 27-29.

Lykou G., Moustakas D., Gritzalis D. Defending airports from UAS: A survey on cyber-attacks and counter-drone sensing technologies. Sensors 2020; 20(12): 3537.

NATO. Pre-feasibility study on UAV autonomous operations. NATO Industrial Advisory Group – Study Group 75 Technical Report, 2004.

Reaching Critical Will. Fully autonomous weapons. https://www.reachingcriticalwill.org/resources/fact-sheets/critical-issues/7972-fully-autonomous-weapons. Erişim tarihi: 25.01.2025.

Williams AP., Scharre PD. Autonomous systems: Issues for defence policymakers. NATO Communication and Information Agency Report 2015, The Hague, Netherlands.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2546-2573, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2546-2573, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Kimyasal ve Organik Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri

Güney AKINOĞLU[1*], Songül RAKICIOĞLU[2], Salih DEMİRKAYA[3], Zerrin CİVELEK[4], Ayhan HORUZ[5], İlayda KULEYİN[6]

[1,2,3,4,5,6]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-4624-2876
[2]https://orcid.org/0000-0002-8013-6439
[3]https://orcid.org/0000-0002-7374-0160
[4]https://orcid.org/0000-0002-8303-9407
[5]https://orcid.org/0000-0002-8338-3208
[6]https://orcid.org/0009-0004-0999-2824
[*]Sorumlu yazar: guney_akinoglu@ymail.com

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 27.12.2024
Kabul tarihi:28.04.2025
Online Yayınlanma: 15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Toprak sağlığı
Kimyasal gübre
Organik gübre
Toprak organik karbonu

ÖZ

Sürdürülebilir tarımsal üretim, topraktan uzaklaştırılan veya kaybolan besin maddelerinin yerine konulmasını gerektirir. Bu nedenle, mahsul verimliliğini sürdürülebilir kılmak amacıyla düzenli olarak besin girdileri sağlanmalıdır. Kimyasal ve organik gübreler, bu gereksinimin karşılanmasında en sık kullanılan girdiler arasındadır. Bu girdilerin mahsul performansı, besin kullanım etkinliği ve çevresel etkileri açısından değerlendirilmesine yönelik önemli araştırmalar yapılmış olsa da, özellikle bu uygulamaların toprak sağlığı üzerindeki etkileri daha az incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, kimyasal ve organik gübre girdilerinin toprak sağlığı üzerine etkilerini mevcut literatür ışığında özetlemek ve toprak sağlığına yönelik araştırma boşluklarını belirlemektir. Bu derleme kapsamında, toprak sağlığını değerlendirmek üzere toprak organik karbonu, toprak organik maddesi, katyon değişim kapasitesi, toprak pH'sı, toprak agregat stabilitesi, su tutma kapasitesi ve mikrobiyal biyokütle gibi temel parametreler dikkate alınmıştır. Araştırma sonuçları, kimyasal gübre uygulamalarının, bitki tarafından alınabilecek miktarları aşmadığı sürece toprak organik maddesini ve toprak sağlığını olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Organik gübreler toprak organik karbonuna ve toprak sağlığının çeşitli parametrelerine katkıda bulunur, ancak bu girdiler farklı besin seviyelerinde uygulanır ve toprak sağlığı üzerindeki etkileri değişir, bu nedenle karbon bazında değerlendirilmesi zordur. Genel olarak, besin maddesi içeren gübrelerin toprak sağlığını desteklediği görülmekte; ancak, bu girdilerin toprak sağlığına etkilerini daha ayrıntılı ve karşılaştırmalı olarak inceleyen çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Effects of Chemical and Organic Fertilizers on Soil Health

Reviews

Article History:
Received: 27.12.2024
Accepted: 28.04.2025
Published online: 15.12.2025

Keywords:
Soil health
Chemical fertilizer
Organic fertilizer
Soil organic carbon

ABSTRACT

Sustainable agricultural production requires the replenishment of nutrients removed or lost from the soil. Thus, regular nutrient inputs are essential to maintain crop productivity in a sustainable manner. Chemical and organic fertilizers are among the most commonly used inputs for this purpose. While significant research has evaluated the effectiveness of these inputs in terms of crop performance, nutrient use efficiency, and environmental impact, the effects of these inputs on soil health remain less understood. The aim of this study is to summarize the effects of chemical and organic fertilizer inputs on soil health based on the existing literature, and to identify research gaps regarding soil health. Within the scope of this

review, fundamental parameters such as soil organic carbon, soil organic matter, cation exchange capacity, soil pH, soil aggregate stability, water holding capacity, and microbial biomass were considered for evaluating soil health. Research findings indicate that chemical fertilizer inputs can positively influence soil organic matter and soil health when applied within the limits of plant nutrient uptake. Organic fertilizers contribute to soil organic carbon and various soil health parameters; however, these inputs are applied at differing nutrient levels, and their impacts on soil health vary, making their assessment on a carbon basis challenging. Overall, nutrient-containing inputs are shown to benefit soil health; however, more detailed and comparative studies are needed to better understand their specific impacts on soil health.

To Cite: Akınoğlu G., Rakıcıoğlu S., Demirkaya S., Civelek Z., Horuz A., Kuleyin İ. Kimyasal ve Organik Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2546-2573.

1. Giriş

Bitkisel üretimde, hasat edilen ürünlerle birlikte topraktan önemli miktarda besin maddesi de uzaklaştırılmaktadır. Bu uygulama sürekli hale geldikçe, topraktaki besin maddeleri giderek azalır, çünkü toprakta gerçekleşen biyokimyasal süreçler, kaybedilen besinleri hızla ve yeterli miktarda yenileyerek bir sonraki mahsulün ihtiyaçlarını karşılayacak düzeye getiremez. Bu durum, besin yönetimini sürdürülebilir tarım sistemlerinin temel bileşenlerinden biri haline getirir. Hasat sırasında kaybedilen besin maddelerinin geri kazandırılması için en yaygın yöntemler, kimyasal ve organik gübrelerin toprağa uygulanması yoluyla besin girdilerinin sağlanmasıdır (Howe ve ark., 2024).

Gübreleme, tarımsal üretimde önemli bir uygulamadır (Lenssen ve ark., 2020) ve gübrelerin doğru yöntem ve miktarlarda kullanımı, verimliliği artırmak ve toprak kalitesini iyileştirmek açısından kritik önem taşımaktadır (Bhattacharyya ve ark., 2007). Ancak gübrelerin uzun süre boyunca aşırı kullanılması, kimyasal gübrelerin düzensiz ve kontrolsüz uygulanması veya organik gübre kullanımının azalması gibi yanlış uygulamalar, toprak organik maddesinin azalması, yeraltı sularının kirlenmesi ve toprak verimliliğinin düşmesi gibi çevresel sorunlara yol açabilmektedir (Bansal ve ark., 2020; Shinoto ve ark., 2020).

Besin girdilerinin verimlilik, mahsul performansı ve çevresel etkiler üzerindeki etkinliği üzerine önemli çalışmalar yapılmış olsa da (Ronner ve ark., 2016; Xia ve ark., 2021; Schmitt ve ark., 2024), bu girdilerin toprak sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkileri hâlâ tam olarak anlaşılmamıştır. Bu derleme, kimyasal ve organik gübreler gibi besin girdilerinin toprak sağlığı üzerindeki etkisine ilişkin mevcut literâtürü özetlemeyi amaçlamaktadır.

2. Kimyasal Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri

Mineral kaynaklardan veya endüstriyel süreçlerle elde edilen gübreler (kimyasal gübreler), yüksek saflıkta ve bitkilerin ihtiyaç duyduğu temel besin maddelerini içeren kaynaklardır. Çoğu kimyasal gübre, çözünür formda olup, bitkiler tarafından doğrudan kullanılabilen ve karbon (C) içeriği oldukça düşük veya hiç bulunmayan bileşenler içerir. Mineral gübrelerin bir kısmı doğrudan madencilik yoluyla elde edilirken (örneğin, kaya fosfatı ve kükürt), diğerleri kimyasal işlemler sonucu üretilmektedir. Bu gübrelerin temel

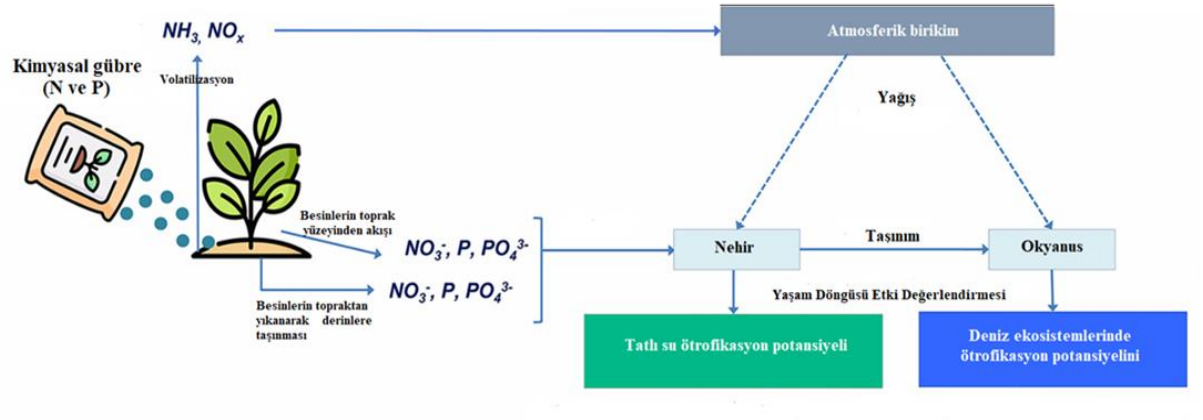
bileşenlerinden biri olan azot (N), enerji tüketimi yüksek olan Haber-Bosch prosesi ile üretilmektedir (Cherkasov ve ark., 2015). Bu proseste, atmosferik azot gazı (N_2), hidrojen gazı (H_2) ile reaksiyona girerek amonyak (NH_3) oluşturur. Proseste kullanılan hidrojen gazı ise büyük ölçüde doğal gazın (metan, CH_4) buharla reforme edilmesi yöntemiyle elde edilmekte olup, bu yöntem yüksek enerji tüketimi ve önemli miktarda karbon salımına neden olmaktadır. Elde edilen amonyak daha sonra bitkilerin doğrudan kullanabileceği amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-) gibi gübre bileşiklerine dönüştürülmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan amonyum nitrat, kalsiyum nitrat, potasyum nitrat, üre, monoamonyum fosfat ve diamonyum fosfat gibi gübreler, bu sürecin önemli çıktıları arasında yer alır (Tablo 1). Bu gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirirken, özellikle besin elementlerinin kullanılabilirliği, bitki performansı ve uzun vadeli sürdürülebilirlik üzerindeki rolleri önem kazanmaktadır. Fosforlu gübreler, çoğunlukla fosfat kayasının asitlerle işlenmesiyle elde edilir. Bu işlem, bitkiler tarafından kolayca alınabilen fosfor (P) bileşiklerine dönüştürülmesini sağlar. Amonyum fosfat türevleri bu gübrelerin başlıca formunu oluştururken, yüksek etkili bir diğer P kaynağı olarak triple süper fosfat da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Potasyum (K) gübreleri ise K açısından zengin tuzların veya maden cevherlerinin rafine edilmesiyle üretilir. Bazı durumlarda, çözeltiden madencilik yöntemi de kullanılabilmektedir. Potasyum sülfat ve potasyum nitrat dışında, potasyumlu gübrelerden biri de potasyum klorürdür. Bu potasyumlu gübreler, tarımsal uygulamalarda bitkilerin K ihtiyaçlarını etkin biçimde karşılamak için temel girdiler arasında yer alır (Howe ve ark., 2024).

Tablo 1. Bazı kimyasal gübreler ve primer besin maddesi kapsamları

Gübre adı	**Kimyasal formülü**	**Primer besin içeriği (%)**		
		N	**P_2O_5**	**K_2O**
Üre	$CO(NH_2)_2$	46	-	-
Amonyum sülfat	$(NH_4)_2SO_4$	21	-	-
Amonyum nitrat	NH_4NO_3	33	-	-
Kalsiyum nitrat	$Ca(NO_3)_2$	15,5	-	-
Kireçli amonyum nitrat	$NH_4NO_3 + CaCO_3$	21-26	-	-
Diamonyum fosfat	$(NH_4)_2HPO_4$	18	46	-
Monoamonyum fosfat	$NH_4H_2PO_4$	11	52	-
Normal süper fosfat	$Ca(H_2PO_4)_2 + CaSO_4$	-	16-18	-
Triple süper fosfat	$Ca(H_2PO_4)_2$	-	42-44	-
Potasyum klorür (müriat)	KCl	-	-	60
Potasyum sülfat	K_2SO_4	-	-	50
Potasyum nitrat	KNO_3	13	-	44
Monopotasyum fosfat	KH_2PO_4	-	52	34

Geleneksel bitki üretim sistemleri (konvansiyonel üretim sistemleri), mahsul verimini artırmak ve hasat sırasında topraktan alınan besinleri yeniden kazandırmak için gübre kullanımına dayanır. Gübrelerin etkinliği, uygulanan besin maddesi, yetiştirilen ürün türü ve yerel koşullara bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik gösterir. Özellikle azotlu gübrelerinin etkinliği çoğunlukla düşük seviyededir. Azot (N), tüm bitkilerin büyüme ve gelişimi için gerekli temel bir elementtir. Küresel ölçekte, N, tarımda en yaygın şekilde kullanılan gübre bileşenidir. Ancak yapılan araştırmalar, bitkilerin uygulanan azotun yalnızca yaklaşık %50'sini etkin bir şekilde kullandığını, geri kalan kısmının ise çeşitli yollarla çevreye sızarak

kaybolduğunu ortaya koymuştur (Govindasamy ve ark., 2023). Bu durum, hem verimlilik kayıplarına yol açmakta hem de çevresel sorunları tetiklemektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Tarım topraklarına uygulanan gübrelerin (N ve P) çevresel döngüsü (Govindasamy ve ark., 2023)

Gübrelerin tarımsal sistemler üzerindeki etkisi genellikle ürün verimi ve çevresel etkileri üzerine odaklanmıştır (Hawkesford, 2014; Ronner ve ark., 2016; Schmitt ve ark., 2024). Ancak gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkisi sınırlı ölçüde anlaşılmıştır ve bu konuda yapılan incelemeler ve meta-analiz çalışmaları literâtürdeki bu bilgi boşluğunu gidermeye yönelik katkılarda bulunmuştur (Grandy ve ark., 2022; Krasilnikov ve ark., 2022). Durumu daha karmaşık hale getiren bir diğer etken ise, çeşitli gübreleme seviyeleriyle uzun vadeli çalışmalar yürüten araştırmaların kimyasal, fiziksel ve biyolojik toprak sağlığı özelliklerini değerlendirmesidir (Duo ve ark., 2014; Poffenbarger ve ark., 2017; Dhiman ve ark., 2019). Bu araştırmalar, gübrelerin sadece verim değil, aynı zamanda uzun vadeli toprak sağlığı üzerindeki etkilerini de ortaya koymak açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

2.1. Kimyasal Gübrenin Toprağın Kimyasal Özelliklerine Etkileri

Toprak organik karbonu (TOK), birden fazla toprak özelliğini etkileme ve toprak işlevlerini yönlendirme yeteneği nedeniyle toprak sağlığının en önemli göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir. 24 saatlik potansiyel C mineralizasyon değerlendirmesi ve TOK içeriği, toprak sağlığının en iyi iki ölçüsü olarak önerilmektedir (Liptzin ve ark., 2022). Dünya genelinde çeşitli ürünler üzerinde gerçekleştirilen çok sayıda araştırma ve meta-analiz, genellikle azotlu gübre girdilerinin, ekili sistemlerde N girdisi olmaksızın elde edilen sonuçlara göre TOK'yi artırdığını ortaya koymuştur (Geisseler ve ark., 2016; Dhiman ve ark., 2019; Tang ve ark., 2023).

Gübre girdilerinin sağladığı ürün büyümesindeki artış, zamanla TOK'yi artıran daha fazla yüzey kalıntısı ve kök biyokütlesine katkıda bulunmaktadır. Dünya genelinde 107 uzun vadeli gübreleme çalışmasının meta-analizi, gübrelemenin TOK'yi gübrelenmemiş bir kontrole kıyasla ortalama %12,8 oranında artırdığını bildirmiştir (Geisseler ve Scow, 2014). Değerlendirilen 107 çalışmadan yalnızca 18'inde TOK'de bir azalma gözlemlenmiştir (Geisseler ve Scow, 2014). Poffenbarger ve ark. (2017) ile Dhiman ve ark. (2019), uzun vadeli çalışmalarda (sırasıyla 14-16 yıl ve 44 yıl) düşük, optimum ve aşırı oranlarda N

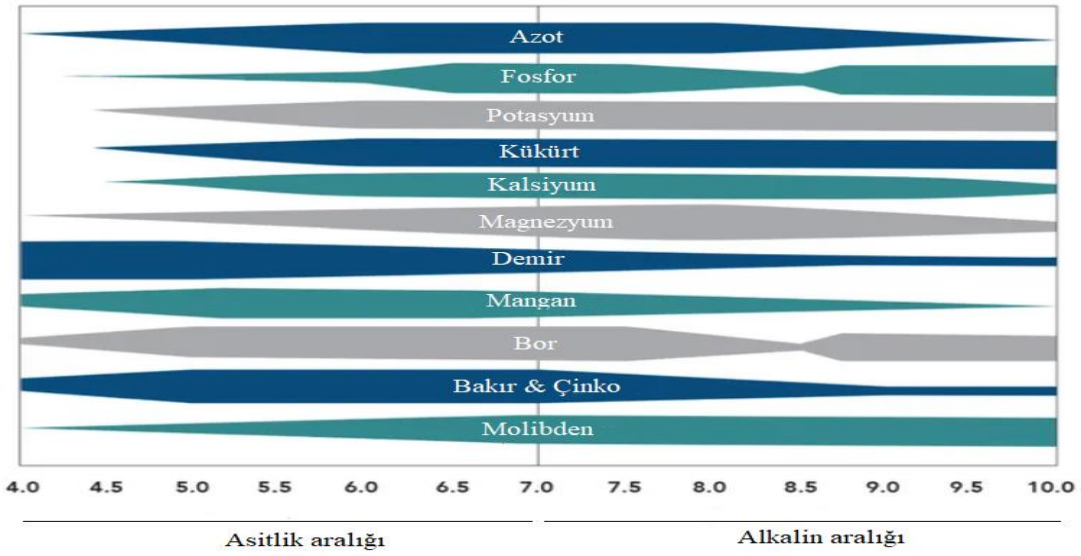
uygulamaları gerçekleştirmişlerdir. Her iki çalışma da, TOK'nin baklagil içermeyen ekim sistemlerinde N gübre oranının agronomik olarak optimum olduğu zaman en yüksek seviyeye ulaştığını tespit etmişlerdir. Dhiman ve ark. (2019), buğday ekim sistemleri için önerilen N, P ve K oranlarını kullanırken, Poffenbarger ve ark. (2017) Iowa'daki dört ayrı bölgede her ekim sistemi için (sürekli mısır ve mısır-soya fasulyesi rotasyonu) agronomik olarak optimum N oranlarını belirlemişlerdir. Bu oranlar, 7 farklı N oranı için 14 ila 16 yıllık ortalamalara dayanmaktadır. N oranları her bölge ve ekim sistemi için optimum N değerine göre ölçeklendiğinde, Poffenbarger ve ark. (2017) TOK'nin optimum orana kadar arttığını, ardından sürekli mısır sisteminde hafifçe azaldığını, mısır-soya fasulyesi sisteminde ise N oranıyla birlikte TOK'de hafif fakat önemli olmayan bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Lu ve ark. (2011) tarafından yapılan bir çalışma, ormanlar ve çayırlarda N uygulaması ile TOK'nin azaldığını, ancak tarımsal ekosistemlerde %3,6 oranında önemli ölçüde arttığını bildirmişlerdir.

Azotlu gübrelerin tarımsal üretimde optimum düzeyin üzerine çıkarak kullanılması, bitki büyümesini verimden ziyade vejetatif gelişmeye yönlendirerek verim kayıplarına neden olabilir (Marschner, 1995; Albornoz, 2016). Vejetatif büyümedeki potansiyel kazanımlara rağmen, aşırı N gübrelemesinden kaynaklanan TOK miktarı, optimum N oranından daha az, ancak N olmayan kontrol gruplarından daha fazla olarak bulunmuştur (Poffenbarger ve ark., 2017; Singh, 2018). Aşırı N uygulamasının, ek eksojen N veya kalıntıların C/N oranının düşürülmesi yoluyla organik madde bozunması ile ilişkili N sınırlamasını azalttığı düşünülmektedir (Poffenbarger ve ark., 2017; Singh, 2018). Ancak, fotosentez ürünlerinin kök biyokütlesi yerine topraküstü biyokütlesine kaydırılmasının da gerçekleştiği bilinmektedir (Marschner, 1995). Bu durum, TOK'deki kök biyokütlesinin önemini vurgulamakta ve diğer çalışmalarda (Lu ve ark., 2011; Burke ve ark., 2019) önerilen bulgularla örtüşmektedir.

Bazı sistemlerde, N gübrelemesinin toprak organik madde (TOM) bozunma oranında bir artışa yol açabileceği öne sürülmüştür (Kuzyakov ve ark., 2000). Ancak bu olgu, yayınlanmış uzun vadeli arazi denemelerinde kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. N gübrelemesi, subtropikal bir çeltik üretim sisteminde gübrelenmemiş parsellere kıyasla toprak organik maddesinin (TOM) ayrışma hızını yavaşlatmış ve karbondioksit (CO_2) ile metan (CH_4) emisyonlarını azaltmıştır (Zhu ve ark., 2018). Zhu ve ark. (2018), bu durumun mikrobiyal biyokütledeki azalma ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Başka bir çalışmada, NPK gübrelerinin eklenmesi, taze biyokütle girdilerinden elde edilen TOK miktarını artırarak, bir Çin mısır ekim sisteminde toprak organik karbonun mineralizasyon hızını yavaşlatmıştır (Wu ve ark., 2019). Ancak orman ekosistemlerinde, TOK'yi toprak profili boyunca azaltan bir dizi N uygulama oranı priming etkisini teşvik etmiştir (Zheng ve ark., 2022). Bünemann ve ark. (2006) tarafından yapılan bir incelemede, toprak organik madde mineralizasyonunda priming etkisi olarak adlandırılan hızlanmanın sınırlı kanıtlara dayandığı ve muhtemelen kısa süreli olduğu belirtilmiştir.

Toprak pH'sı, toprak özellikleri üzerinde geniş kapsamlı etkileri olması nedeniyle başlıca değişken olarak kabul edilmektedir. Bitkiler, farklı büyüme stratejilerine sahip olmalarına rağmen, çoğu tarımsal ürün için ideal pH aralığı hafif asidikten hafif alkaliye (pH 6 – 7,5) kadardır. Bu aralıkta, bitkiler optimal gelişim

gösterir. Kimyasal açıdan bakıldığında toprak pH'sı, topraktaki besinlerin ve diğer elementlerin çözünürlüğünü ve türleşmesini etkileyen temel faktördür (Şekil 2).



Şekil 2. Toprak pH düzeyinin besin yarayışlılığı üzerindeki etkisi

Örneğin, düşük pH koşullarında birçok bitki besin elementi, özellikle Fe, Cu ve Mn, çözünürlüğü artmış halde bulunur ve dolayısıyla bitkiler tarafından daha kolay alınabilir hale gelir. Ancak aynı koşullarda, Al gibi elementler bitkiler için toksik olabilir. Söz konusu elementler, düşük pH değerlerinde (asidik koşullarda) suda çözünür katyonik formda (örneğin; Fe^{+3}, Cu^{+2}, Mn^{+2}, Al^{+3}, $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^{+}$) bulunarak bitkiler tarafından kolayca alınabilir. Ancak toprak pH'sı yükseldikçe (alkalin koşullara doğru) çözünmeyen bileşiklere (örn. $Fe(OH)_{3(s)}$, $MnO_{2(s)}$, $Cu(OH)_{2(s)}$ ve $Al(OH)_{3(s)}$) dönüşürler (Howe ve ark., 2024).

Kolloidlerin büyük bir kısmının negatif yükü olduğundan, katyonları elektrostatik olarak yüzeylerinde tutar ve bu katyonlar değiştirilebilir özellikte olup, toprağın katyonları tutma kapasitesini belirler. Bu kapasite, katyon değişim kapasitesi (KDK) olarak adlandırılır ve toprağın pH değerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. KDK'deki değişikliklerden en çok etkilenen katyonlar arasında K^{+}, Ca^{+2}, Mg^{+2}, NH_4^{+} ve Na^{+} gösterilir. Bu katyonlardan Na^{+} dışındakiler bitkiler için makro besin niteliğindedir. KDK, değişebilir katyonlar ve baz doygunluğu toprak besin maddelerinin durumu ve tamponlama kapasitesinin önemli göstergeleridir (Ross ve ark., 2008). Düşük değişebilir katyonlar ve baz doygunluğu seviyeleri, bitki büyümesini kısıtlayabilir ve verimi azaltabilir. Bu nedenle, KDK ve baz doygunluğu değerlerinin uygun seviyelerde tutulması, toprak sağlığı ve gıda üretimi açısından büyük önem taşır. Toprakta KDK ve baz doygunluğu gibi parametreler ise toprak yönetimi uygulamalarından (örneğin; gübre uygulaması) önemli ölçüde etkilenir.

Toprak pH'sı düştükçe KDK de azalır; dolayısıyla düşük pH ve KDK değerine sahip topraklar, besin tutma kapasitesi bakımından sınırlıdır ve tarımsal verimliliği sürdürebilmek için daha fazla gübre uygulaması gerektirir. Bu nedenle, toprak pH'sının tarımsal uygulamalarda optimize edilmesi, besin alımı ve toprak sağlığı açısından büyük önem taşır.

Toprak organik karbonu (TOK), tarımsal toprakların KDK'sini değiştirmede pH ile birlikte önemli bir role sahiptir. Dhiman ve ark. (2019), 44 yıl boyunca süreklilik gösteren yönetim uygulamalarının ardından, 0-15 cm ve 15-30 cm derinliklerde yapılan gözlemlerde gübre uygulanmış toprakların KDK değerlerinin (~8,5 ila ~10,2 cmolc kg^{-1} ve ~6,3 ila ~9,4 cmolc kg^{-1}) gübrelenmemiş topraklara göre daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Bu durum, muhtemelen TOK miktarındaki artışla ilişkilidir; zira eklenen TOK'nin KDK'ye katkısı, gübrenin KDK üzerindeki asitleştirici etkisinden daha fazla olmuştur. Toprak KDK'sine en büyük katkıda bulunan faktörler TOK ve 2:1 tipi silikat kil mineralleridir (örneğin, smektitler ve vermikülitler). Toprak organik karbonu, diğer tüm toprak kolloidlerine kıyasla daha fazla KDK katkısı sağlamaktadır ve 2:1 tipi silikat kil minerallerinin KDK'si, yapılarındaki kalıcı yükün baskınlığı nedeniyle pH değişimlerinden daha az etkilenir (Howe ve ark., 2024).

Azotlu gübrelerin geliştirilmesi ve sanayileşmesinin hızlanmasıyla birlikte, araştırmalar amonyum bazlı gübrelerin toprak pH'sını düşürme eğiliminde olduğunu, nitrat bazlı gübrelerin ise toprak pH'sını koruma veya artırma eğiliminde olduğunu ortaya koymuştur (Khonje ve ark., 1989; Barak ve ark., 1997). Uygulanan gübrenin tipi ve toprağın tamponlama kapasitesi, toprak asitlenmesinin doğası üzerinde belirleyici bir rol oynar (Singh, 2018).

Amonyum bâzlı gübreler, bitki alımı sırasında proton salınımına yol açarak toprakta asitlenme yaratır ve rizosfer pH'sını düşürür (Marschner, 1995). Bitkiler tarafından alınmayan amonyum, toprak pH'sını ayrıca nitrifikasyon yoluyla etkileyebilir. Nitrifikasyon, amonyumun nitrata dönüştüğü mikrobiyal bir süreçtir ve bu işlem toprağı daha da asidik hale getirir (Ni ve ark., 2023). Üre gübresi de amonyuma hidrolize olurken asitlenme potansiyeli taşır; ancak hidroliz işleminin ilk aşamasında proton tüketimi gerçekleştiği için, topraktaki asitlenmenin kapsamı bir ölçüde dengelenir. Hidroliz sürecinde üre önce amonyuma dönüşür, bu da sonraki asitlenme reaksiyonlarının etkisini bir ölçüde azaltır. Üre hidrolizi, pH 7-8 aralığında maksimum hızla gerçekleşir (Cabrera ve ark., 1991).

Amonyum bâzlı gübreler toprağın asitlenmesine neden olurken, nitrat gübreleri bu etkiye sahip değildir; hatta pH'yı artırabilme potansiyeli taşır (Khonje ve ark., 1989). Amonyum nitrat gibi gübrelerin pH üzerindeki etkisi, diğer amonyum gübrelerine kıyasla daha az belirgindir ve ürenin pH'ya olan etkisine benzerlik gösterir (Khonje ve ark., 1989). Fosfat gübreleri ise, asitle işlenmiş fosfat kaya kaynaklarından üretildikleri için genel olarak asidik bir yapıya sahiptir. Ancak fosfat gübrelerinin toprağa olan asidik etkisi kaynağa ve toprağın özelliklerine göre büyük farklılıklar gösterir ve genellikle geçici olur. Özellikle, monoamonyum fosfat ve diamonyum fosfat gibi gübrelerin en fazla asiditeyi oluşturduğu kabul edilirken, triple süperfosfat, normal süperfosfat ve kaya fosfatı gibi fosfat gübrelerinin asiditeye etkisi minimal veya geçici düzeydedir. Potasyumlu gübreler ise toprağın pH'sını genellikle etkilemez ve nötr bir etki gösterir.

Uzun vadeli gübreleme çalışmaları, özellikle nitrat bâzlı olmayan gübrelerin toprak pH'sında zamanla önemli düşüşlere neden olabileceğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Shen ve ark. (2010), 20 yıllık üre gübrelemesinin ardından toprak pH'sının 6,0'dan 4,9'a düştüğünü rapor etmiştir. Benzer şekilde, Dhiman ve ark. (2019) tarafından yürütülen 44 yıllık bir çalışmada, önerilen N, P ve K gübrelerinin uygulanması sonucunda 0-15 cm derinlikte pH'nın 5,7'den 5,2'ye, 15-30 cm derinlikte ise 5,9'dan 5,3'e gerilediği

bulunmuştur. Zhang ve ark. (2016), 22 yıl süren karşılaştırmalı bir gübreleme çalışmasında, gübrelenmemiş kontrol grubuna kıyasla en yüksek pH düşüşünün üre-N, P, K ve S'nin birlikte uygulanmasıyla meydana geldiğini bildirmiştir. Orta düzeyde pH düşüşü, üre-N, P ve K (S olmadan) ile üre-N ve P (K ve S olmadan) uygulamalarında gözlenirken; en az pH düşüşü yalnızca üre-N uygulamasıyla gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, gübreleme stratejilerinin toprak pH'sı üzerindeki farklı etkilerini vurgulamakta ve özellikle kükürtün (S) eklenmesinin pH düşüşünü hızlandırdığına işaret etmektedir. Raza ve ark. (2020), nitrojen gübrelemesiyle oluşan asitlenme nedeniyle 1980-2020 yılları arasında Çin'deki tarım arazilerinde inorganik karbonun %7 oranında kaybolduğunu rapor etmiştir. İnorganik C, genellikle toprak sağlığı ile ilişkilendirilmemesine rağmen, daha yavaş bir döngüye sahip bu C formunun hızlı kaybı, C döngüsü ve iklim değişikliği üzerinde önemli etkilere sahiptir. Geisseler ve ark. (2017), üre gübresi uygulamasının çeltik tarlası toprağının pH'sında bir değişime yol açmadığını gözlemlemiştir; bu durum, yüksek organik madde içeriği ve sık su basması nedeniyle çeltik tarlalarında nitrifikasyon reaksiyonlarının baskılanmasına bağlanabilir. Genel olarak gübrelerin toprak pH değeri üzerindeki etkisi; gübre tipi, toprağın pH tamponlama kapasitesi, doğal asitlenme süreçleri (örneğin, iklim), ekim yönetimi uygulamaları ve zaman gibi birçok faktörle ilişkilidir. Toprakta bir pH değişimi gözlemlense bile, bu değişimin KDK gibi diğer özellikler üzerindeki etkisi, TOK ilaveleri ve toprak mineralojisi tarafından da şekillendirilmektedir. Toprak pH'sındaki herhangi bir değişim, mikrobiyal topluluğu da etkileme potansiyeline sahiptir (Singh, 2018).

2.2. Kimyasal Gübrenin Toprağın Fiziksel Özelliklerine Etkileri

Toprak agregasyonu, verimli ve sağlıklı toprakların temel göstergelerinden biri olup, toprak parçacıklarının sekonder yapılar halinde birleşmesini veya kümelenmesini ifade eder. Agregat boyutu ve stabilitesi, yönetim uygulamalarına duyarlılıkları ve su sızma, su tutma kapasitesi ile erozyon eğilimi üzerindeki etkileri nedeniyle, toprak sağlığını değerlendirmede yaygın olarak kullanılan önemli ölçütlerdendir. Tek bir toprak profili içinde TOK, agregasyonun kilit belirleyicilerinden biridir (Li ve ark., 2017). Toprak organik karbonunu etkileyen gübreleme uygulamaları da dolaylı olarak agregatlaşma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Toprak organik karbonu ve agregatlaşma özelliklerini birlikte inceleyen çalışmalar, bu ilişkiyi desteklemektedir. Chakraborty ve ark. (2010), mısır ve buğday ekiminde yürüttükleri uzun vadeli gübreleme çalışmasında, önerilen N, P ve K oranlarında yapılan gübrelemenin, gübrelenmemiş kontrol grubuna kıyasla 0-5 cm ve 5-15 cm toprak derinliklerinde agregatların ortalama ağırlık çapını, makro gözenekliliği ve toprak organik karbonunun seviyesini anlamlı düzeyde artırdığını belirlemişlerdir. Benzer şekilde, Dhiman ve ark. (2019), 44 yıl boyunca N, P ve K ile gübre uygulanan bir buğday sisteminde, gübrelenmemiş kontrol grubuna kıyasla artan TOK ile iyileşmiş fiziksel özellikler gözlemlemişlerdir. Hem 0-15 cm hem de 15-30 cm toprak derinliklerinde gübrelemenin, kontrol grubuna kıyasla daha büyük ortalama agregat ağırlık çapı, gözeneklilik, su tutma kapasitesi ve doygun hidrolik iletkenlik sağladığı belirlenmiştir. Haynes ve Naidu (1998), uzun süreli gübre uygulamalarının toprak organik maddesini (TOM) artırdığını ve bunun sonucunda suda stabil agregatların, gözenekliliğin, infiltrasyon kapasitesinin ve hidrolik iletkenliğin artış gösterdiğini; hacim ağırlığının ise azaldığını bildirmiştir. Buna karşılık, bazı

çalışmalar gübrelemenin toprağın fiziksel özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını veya olumsuz etkiler yaratabileceğini öne sürmektedir. Örneğin, Yu ve ark. (2012), 18 yıl süresince önerilen gübreleme uygulamalarının agregatlaşma üzerindeki etkisini, gübreleme yapılmamış bir kontrol grubuyla karşılaştırmıştır. Gübreleme yapılan uygulamalarda %27 daha yüksek TOK seviyeleri görülmesine rağmen, agregatlaşma oranında anlamlı bir fark tespit edememişlerdir. Diğer çalışmalar ise, N gübrelemesinin toprak agregatlaşması üzerinde olumsuz etkileri olabileceğini bildirmektedir (Green ve ark., 1995; Fonte ve ark., 2009; Chivenge ve ark., 2011). Ancak bu sonuçlar, genellikle gübre miktarının bitki gereksinimlerinin üzerinde olduğu veya bitki büyümesinin olmadığı durumlarda yapılan değerlendirmelerden elde edilmiştir. Bu nedenle, bulgular, önerilen dozların üzerinde yapılan gübrelemenin TOK'yi azaltarak agregatlaşma üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği hipoteziyle uyumludur.

Çoğu çalışma, belirli gübre türlerinin toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelememektedir. Ancak, Haynes ve Naidu (1998) tarafından yapılan bir incelemede, fosforlu gübrenin, Al- veya Ca-fosfat bağlayıcı maddelerin oluşumu yoluyla agregatlaşmayı desteklediğine dair kanıtlar sunulmuştur. Öte yandan, NH_4^+ bazlı gübrelerin yüksek konsantrasyonlarda birikmesi, toprakta dağılıma (dispersiyon) neden olabilir. Benzer şekilde, sodyum (Na) içeren gübreler, örneğin $NaNO_3$, dispersiyona neden olurken, gübrelerin kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) formları, örneğin $Ca(NO_3)_2$, birleşmeyi (flokülasyon) ve agregatlaşmayı teşvik edebilir.

2.3. Kimyasal Gübrenin Toprağın Biyolojik Özelliklerine Etkileri

Toprak biyotası; biyokimyasal döngüler, redoks reaksiyonları, hastalık baskılama ve toprak yapısının korunması gibi önemli süreçlerde temel bir rol oynar (Delavaux ve ark., 2017; Fierer, 2017; Bonanomi ve ark., 2018). Toprak biyotasının biyokütlesi oldukça büyüktür; bir hektar toprak, büyük ölçüde mantar ve bakteriler gibi mikrobiyal grupların hakimiyetinde olmak üzere bir metrik tonun üzerinde biyokütle barındırabilir (He ve ark., 2020). Ayrıca, toprak biyotası, Dünya'daki en büyük biyolojik çeşitlilik rezervlerinden birini oluşturur ve tüm türlerin yaklaşık %59 ± 15'inin topraklarda yaşadığı tahmin edilmektedir (Anthony ve ark., 2023). Moleküler yöntemlerdeki ilerlemeler, bu biyolojik çeşitliliği daha ayrıntılı bir şekilde incelememize olanak tanımakta ve kültürlenemeyen toprak mikroorganizmalarının araştırılmasını kolaylaştırmaktadır (Lekberg ve ark., 2024).

Bu organizmalar, birbirleriyle, bitki kökleriyle ve çevresel faktörlerle sürekli etkileşim içindedir. Bu etkileşimler, topraktaki besin döngüsünü sürdüren karmaşık besin ağlarının oluşmasına zemin hazırlar ve bitki beslenmesi için kritik bir rol oynar. Toprak organizmaları, organik maddelerin parçalanması, besin döngüsünün sağlanması ve bitkilerin bu besinleri alabilmesi için kullanılabilir hale getirilmesi gibi önemli işlevleri yerine getirir. Ayrıca, besinlerin toprak organizmalarının vücutlarında depolanması, besin kayıplarını azaltır ve toprağın yapısını korur.

Kimyasal gübrelerin (özellikle azot, fosfor ve potasyum içerenlerin) toprak pH'sını artırması, mikrobiyal çeşitlilik üzerinde karmaşık etkiler yaratır. Bu etkiler, gübre türü, mikrobiyal topluluğun önceden var olan yapısı ve çevresel koşullar gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir (Rousk ve ark., 2010).

Gübrelerin OH^- iyonları salarak pH'yı yükseltmesi, asidik ortamlarda yaşayan asidofilik mikroorganizmaların popülasyonunu azaltır. Yükselen pH, genel olarak toprak mikrobiyotası üzerinde baskılayıcı bir etkiye sahip olsa da, bazik koşulları tercih eden bazofilik mikroorganizmalar için daha uygun bir ortam oluşturabilir.

Gübreleme, toprak özelliklerini değiştirerek toprak mikroorganizmalarını dolaylı yoldan etkileyebilir (Xun ve ark., 2016). Örneğin, N uygulaması sonrasında toprak pH'sında meydana gelen düşüş, bakteri topluluklarındaki değişikliklerin başlıca nedeni olmuştur (Zeng ve ark., 2016). Ayrıca, Yu ve ark. (2013) gübrelemenin, topraktaki C/N oranlarındaki değişikliklerin mikrobiyal toplulukların dağılımını önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Öte yandan, Ren ve ark. (2020), *Proteobacteria* ve *Gemmatimonadetes*'in gübreleme ve toprak ortamlarından etkilenmediğini; buna karşın, *Acidobacteria* ve *Actinobacteria* bolluğunun gübreleme uygulamalarıyla negatif korelasyon gösterdiğini belirtmişlerdir.

Asidik özellik gösteren kimyasal gübreler, yüksek pH koşullarında gelişen bakterilerin büyümesini engellerken, asidofilik mikrobiyal toplulukların çoğalmasına neden olur (Lin ve ark., 2019). Asidik ortamlarda, mantar toplulukları genellikle daha iyi büyürken, bakteri toplulukları azalır; bu durum, bakteriler tarafından gerçekleştirilen biyokimyasal süreçlerin olumsuz yönde etkilenmesine yol açar. Özellikle nitrifikasyon oranları, nitrifikasyon bakterilerinin daha düşük aktivitesi nedeniyle aşırı asidik topraklarda azalır (Cheng ve ark., 2013). Bakteriyel filumlar arasında, *Acidobacteria, Actinobacteria, Chloroflexi* ve *Proteobacteria* gibi gruplar toprakta yaygın olarak bulunan bakteri filumlarıdır (Zhao ve ark., 2012; Li ve ark., 2016). Asidofilik bakteriler, örneğin *Acidobacterium, Acidicaldus* ve *Acidothermus* türleri, kimyasal gübrelerin oluşturduğu asidik ortamda çoğalır. Ayrıca, *Acidibacter* türlerinin toprak pH'sı ile güçlü bir ilişkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Uzun süreli kimyasal gübre kullanımı, toprak pH'sını düşürmenin yanı sıra topraktaki ağır metal iyonlarını aktive eder; bu durum, toprak fizikokimyasal özelliklerini ve ürün kalitesini olumsuz yönde etkiler (Lin ve ark., 2019). Fosforlu gübreler, mikorizal mantarların büyümesini engeller, ancak bu engellemenin derecesi, mantar türlerine ve topraktaki fosfor seviyelerine bağlı olarak değişir (Seymour, 2002).

Kimyasal gübre uygulamalarının toprak mikroorganizmaları üzerindeki etkileri genellikle geçicidir. Toprakların doğal tamponlama kapasitesi sayesinde, gübre kaynaklı pH değişiklikleri uzun süreli olmayıp, kısa süre sonra normal seviyelere dönme eğilimi gösterir. Yeni Güney Galler'de yapılan bir çalışmada (Angus ve ark., 1999), susuz amonyak ve üre gübrelerinin toplam mikrobiyal aktiviteyi kısa süreli olarak baskıladığı gözlemlenmiştir. Beş hafta içinde mikrobiyal aktivite genel olarak eski haline dönmekle birlikte, bazı mikroorganizma grupları için bu toparlanma daha yavaş veya eksik kalmıştır. Örneğin, nitrifikasyon bakterilerinin popülasyonu beş hafta sonunda belirgin bir artış gösterirken, protozoa popülasyonları yaklaşık %80 oranında azalmış ve bu düşüşün etkileri daha uzun süre devam etmiştir.

Bitkilerin farklı büyüme evrelerinde uygulanan kimyasal gübreler, toprak mikrobiyal topluluklarının yapısını ve aktivitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Özellikle çiçeklenme dönemi, diğer büyüme evrelerine göre daha yüksek bir mikrobiyal çeşitlilik sergilemektedir. Yapılan bir çalışmada (Li ve ark., 2012), azot, fosfor ve potasyum içeren farklı gübrelerin toprak enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Sonuçlar, bu gübrelerin invertaz enzimi aktivitesini tüm büyüme evrelerinde artırdığını göstermiştir. Potasyum gübresi, özellikle invertaz ve diğer bazı enzimlerin aktivitesini artırmada daha belirgin bir etki göstermiştir. Çiçeklenme döneminde ise, azot gübresi üreaz enzimi aktivitesini diğer gübrelere kıyasla daha fazla artırmıştır. Bu bulgular, farklı gübrelerin ve büyüme evrelerinin toprak mikrobiyal süreçleri üzerindeki karmaşık etkileşimlerini ortaya koymaktadır.

3. Organik Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri

Ayrışan veya ayrıştırılan biyolojik ürünlerden elde edilen besin takviyeleri, tarımın sürdürülebilirliği için önemli bir yere sahiptir. İnek gübresi, tavuk gübresi ve benzeri hayvansal kökenli kaynakların yanı sıra, yeşil gübre, kompost gibi bitkisel kaynaklılar da bu kategoride yer alır (Şekil 3).



Şekil 3. Tarımda kullanılan organik gübre çeşitleri (Liu ve ark., 2024)

Organik kökenli materyaller doğrudan kullanılabilir, ancak genellikle kompostlama veya katı-sıvı ayırma gibi işleme yöntemlerinden geçirilir. Bu ürünlerin özellikleri, kaynağa bağlı olarak önemli ölçüde değişir (Tablo 2).

Örneğin, tavuk gübrelerinde azot (N) konsantrasyonu, domuz ve sığır gübrelerine kıyasla çok daha yüksektir. Diğer yandan, sıvı gübrelerin amonyum (NH_4^+) konsantrasyonu katı gübrelerden daha yüksek olup, organik azot (N) oranı daha düşüktür (Whalen ve ark., 2019). Ayrıca, işleme ve depolama yöntemleri ile kullanılan hayvan yataklık materyalleri, gübredeki besin maddelerinin türünü ve miktarını önemli ölçüde etkiler (Lazcano ve ark., 2016). Örneğin, aerobik kompostlama ve vermikompostlama gibi işlemlerle işlenen gübrelerde, katı gübrelerle karşılaştırıldığında daha yüksek organik N ve nitrat (NO_3^-) seviyeleri bulunurken; anaerobik işleme ile elde edilen gübrelerde ise daha yüksek azot konsantrasyonları ve baskın amonyum (NH_4^+)-N havuzları gözlemlenmektedir (Singh ve ark., 2020).

Tablo 2. Hayvansal kaynaklı bazı organik gübrelerin azot (N), fosfor (P_2O_5) ve potasyum (K_2O) içerikleri (Maynard ve Hochmuth, 2007)

Hayvansal gübreler	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)
Besi sığırı gübresi	1,0-2,5	0,9-1,6	2,4-3,6
Süt sığırı gübresi	0,6-2,1	0,7-1,1	2,4-3,6
At gübresi	1,7-3,0	0,7-1,2	1,2-2,4
Domuz gübresi	3,0-4,0	0,4-0,6	0,5-1,0
Tavuk gübresi	2,0-4,5	4,5-5,5	1,2-2,4
Koyun gübresi	3,0-4,0	1,2-1,6	3,0-4,0

*Hayvansal gübrelerin NPK içerikleri kuru ağırlık esasına göre değerlendirilmiştir.

Organik gübre uygulamaları, toprağın organik madde içeriğini, toprak yapısını, agregat stabilitesini, besin maddesi alımını, su tutma kapasitesini, katyon değişim kapasitesini, besin maddesi kullanım etkinliğini ve mikrobiyal aktiviteleri artırarak, toprak sağlığını iyileştirir (Brar ve ark., 2015; Maltas ve ark., 2018; Liu ve ark., 2024). Organik gübrelerden besin salınım hızı kimyasal gübrelere kıyasla yavaş olsa da (Guo ve ark., 2017), mahsulün büyümesini ve kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Bazı bitkilerin büyümesi, verimi ve kalitesi üzerine organik gübrelerin etkileri (Liu ve ark., 2024)

Bitki	Organik gübre	Organik gübre dozu	Etkiler
Çeltik	Tavuk gübresi	2.5 ton ha^{-1}	Bitki boyunu, kardeşlenmeyi, tane ve saman verimini, tane ağırlığını, tane NPK konsantrasyonunu iyileştirmiştir.
Domates	Agro balık peleti	Parsel başına 18 kg	Yaprak alanını, kök taze ağırlığını, çiçek sayısını, meyve verimini arttırmıştır.
Bamya	Tavuk gübresi	4.1 ton ha^{-1}	Bitki boyunu, bitki sayısını, yaprak alanını, verimi, proteini, karbonhidratları, NPK konsantrasyonunu arttırmıştır.
Zerdeçal	Vermikompost	11.36 ton ha^{-1}	Bitki boyunu, yaprak sayısını, kardeşlenmeyi, taze-kuru rizom verimini, alınabilir NPK içeriklerini arttırmıştır.
Turp	Tavuk gübresi	15 ton ha^{-1}	Bitki boyunu, yaprak sayısını, sürgün ve kök uzunluğunu, kök çapını, kök ve sürgünün taze ve kuru ağırlığını, biyolojik verimini iyileştirmiştir.
Çeltik	Büyükbaş hayvan gübresi	5 ton ha^{-1}	Bitki boyunu, yaprak/bitki, salkım uzunluğunu, bin tane ağırlığını, verimini,protein yüzdesini iyileştirmiştir.
Hünnap	Ayrışmış soya fasulyesi küspesi	Saksı başına 5 kg	Klorofil içeriğini, fotosentez oranını,generatif büyümesini, besin kalitesini önemli ölçüde arttırmıştır.
Asma (Üzüm)	Sığır gübresi	10 ton ha^{-1}	Kök kuru maddesini, meyve ağırlığını, bitki başına meyve sayısını, meyve verimini iyileştirmiştir.
Mısır	Tavuk gübresi	10 ton ha^{-1}	Yaprak alanını, yaprak alanı indeksini, bitki boyunu, 1000 tane ağırlığı, tane verimini, biyolojik verimini, tane protein ve yağ içeriğini iyileştirmiştir

Organik gübrelerin bir takım dezavantajları da bulunmaktadır, çünkü bitkiler ve hayvanlar için zararlı olabilecek patojenler içerebilirler (Bhatt ve ark., 2019). Organik gübreler, genellikle düşük besin içeriğine sahiptir; bu nedenle, kimyasal gübreler olmadan tarımda büyük ölçekli kullanımları oldukça zordur (Vanlauwe ve ark., 2010). Ayrıca, organik gübrelerin bileşimi oldukça değişkendir, bu da besin maddelerinin bitki üretimine doğru bir şekilde uygulanmasını zorlaştırmaktadır (Bhatt ve ark., 2019). Diğer

bir dezavantaj ise organik gübrelerin fazla miktarlarda ihtiyaç duyulması ve bununla birlikte kolayca temin edilememesidir (Roba, 2018). Organik gübrelerin ayrışma hızı çok yavaştır ve bu süreç, toprak sıcaklığı ve nemi gibi faktörlerden büyük ölçüde etkilenir; bu da besin maddelerinin gübrelerden salınımını zorlaştırır (Bhatt ve ark., 2019). Ayrıca, organik gübreler ağır metaller ve fekal koliformlar da içerebilir. Su kütlelerine karıştıklarında, suyun kalitesini ciddi şekilde bozarak sağlık için tehlike oluşturabilirler (Jenkins ve ark., 2008). Özellikle yüksek miktarda kanalizasyon çamuru ve süt sığırı gübresinin ardışık kullanımı, yeraltı ve yüzey sularının kirlilik riskini arttırabilir (Lazcano ve ark., 2021). Organik gübreler, ayrıca yeraltı suyu üzerinde NO_3^- seviyelerinin artmasına ve yüzey sularının ötrofikasyonuna yol açabilir (Bhatt ve ark., 2019).

Gübrenin atılım sonrası yönetimi, temel fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen önemli bir süreçtir. En yaygın yönetim uygulamaları arasında, atık yem, su (örneğin; atık su, yıkama suyu ve yağmur suyu), yataklıktan ve topraktan gelen eklemeler ile buharlaşmadan kaynaklanan kayıplar yer almaktadır. Biyolojik aktivite, gübrenin atılımının hemen ardından başlamaktadır ve bu aktivite, gübrenin özelliklerini, özellikle de besin içeriğini etkiler. Gübre özelliklerini etkileyen diğer faktörler arasında yem türü, yataklık malzemesi, toprak tipi ve gübre yönetimi/depolaması (örneğin; idrar-dışkı ayrımı, atık arıtma lagünleri, temizleme sıklığı, kompostlama ve katı-sıvı ayrımı) bulunmaktadır.

3.1. Organik Gübrelerin Toprağın Kimyasal Özelliklerine Etkileri

3.1.1. Toprak karbon içeriği

Topraklar, küresel ölçekte atmosfer ve karasal bitki örtüsünden üç kat daha fazla karbon (C) depolar (Lehmann ve Kleber, 2015). Ekilebilir topraklar, toprak profilinin ilk 1 metre içinde küresel toprak C stoklarının yaklaşık %10'unu barındırmaktadır (Jobbagy ve Jackson, 2000). Toprak organik karbonu (TOK), ürün verimliliğini artırma, toprak sağlığını koruma, toprak yapısını iyileştirme, iklim değişikliğini hafifletme ve diğer ekosistem hizmetlerini destekleme gibi kritik işlevlere sahiptir (Zhang ve ark., 2012). Ekilebilir alanlarda TOK seviyelerini yükseltmek amacıyla geliştirilen stratejiler, ürün kalıntıları, kompost ve organik gübre gibi karbonca zengin materyallerin toprağa ilavesi yoluyla topraktaki organik C girdilerini artırmayı ve aynı zamanda bu organik maddelerin mikrobiyal ayrışma süreçlerini kontrol ederek toprakta daha uzun süre kalmalarını sağlamayı hedeflemektedir (Cooper ve ark., 2011). Toprağa yüksek C içeriğine sahip organik gübrelerin uygulanmasının, toprak organik maddesini ve dolayısıyla TOK düzeyini koruması veya artırması beklenmektedir (Li ve ark., 2020). Ayrıca, organik kökenli gübre uygulamalarına bağlı olarak TOK'deki artış, genellikle yalnızca sentetik gübrelemeden kaynaklanan artıştan daha büyük bir etki göstermektedir. Dünya genelinde 49 farklı sahada gerçekleştirilen uzun vadeli gübreleme çalışmasının meta analizi sonuçlarına göre, hayvan gübresi uygulaması, TOK seviyelerini, kontrol grubuna kıyasla ortalama 9,4 Mg C ha^{-1} ve kimyasal gübre uygulamalarına kıyasla ise 5,6 Mg C ha^{-1} daha fazla artırmıştır (Maillard ve Angers, 2014). TOK'deki artış, organik gübrenin doğrudan C girdisine atfedilmiştir. Çalışmada incelenen toprak, iklim, süre, hayvan türleri, arazi kullanımı gibi geniş bir yelpazedeki farklılıklara rağmen, kontrol grubu ile kümülatif gübre-C girdisi olan gübre uygulamaları arasındaki TOK farkı arasında pozitif

bir korelasyon ($r^2 = 0,53$) gözlemlenmiştir (Maillard ve Angers, 2014). Du ve ark. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, organik gübre uygulamalarının TOK, TOM ve partikül organik karbon seviyelerinde anlamlı artışlara neden olduğu bulunmuştur. Özellikle, %50 ve %100 oranında organik gübre uygulamasının, TOK depolamasını kontrol grubuna kıyasla sırasıyla %5,91 ve %7,84 oranında artırdığı belirtilmiştir. Bu bulgular, organik gübrelerin toprak karbon deposunu güçlendirme potansiyelini vurgulamaktadır. Gübre uygulama araştırmalarının başka bir incelemesinde, Rayne ve Aula (2020), gübre türü ve yataklama yönteminin toprak TOM artışını etkilediğini bildirmiştir. Bu çalışmadaki sonuçlar, farklı hayvansal gübre türlerinin aynı miktarda uygulandığı araştırmalara dayanmaktadır. Ancak, bu tür bir karşılaştırma yanıltıcı olabilir, çünkü hayvansal kökenli gübrelerin C içeriği ve su içeriği gibi farklı özellikleri, C depolama potansiyellerini doğrudan etkiler. Gübrelerin C depolama havuzlarına katkılarını doğru bir şekilde değerlendirmek için, benzer C girdileri üzerinden karşılaştırma yapmak daha uygun olacaktır.

Rayne ve Aula (2020), organik gübrenin toprak sağlığı üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, gübre eklemenin TOM tükenmesini yavaşlattığı sonucuna ulaşmışlardır; ancak, bu etki için net bir mekanizma belirtilmemiştir. Çünkü yönetim uygulamaları TOM'un bozunma sürecini doğrudan etkileyebilmektedir. Butler ve ark. (2010) ise hayvan gübresi kompostunu çeşitli oranlarda mısır silajı üretim sisteminde kontrol grubu ve inorganik gübre uygulamalarıyla karşılaştırmışlardır. İlk yılda, kontrolde TOM değeri 12 g kg^{-1} iken, en yüksek kompost oranında (105 Mg kompost ha^{-1}) bu değer 29,3 g kg^{-1} düzeyine kadar yükselmiştir. Ancak, ikinci yılda uygulamalar arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Araştırmacılar, mısır-silaj sisteminde kullanılan geleneksel toprak işleme uygulamalarının, eklenen TOM'un hızla azalmasına neden olduğunu ve daha az toprak işleme yapılan sistemlerde daha kalıcı etkiler gözlemlediklerini ifade etmişlerdir (Butler ve ark., 2010). Watts ve ark. (2010) ise, geleneksel toprak işleme (CT) koşullarında soya fasulyesi yetiştirilirken kümes hayvanı gübresi uygulandığında, kontrol grubuna kıyasla TOK üzerinde bir fark gözlememişlerdir. Ancak, toprak işleme yapılmayan (NT) ve hem CT hem de NT sisteminde mısır yetiştirilirken belirgin TOK farklılıkları ortaya çıkmıştır. Bu bulgular, yönetim uygulamalarının özellikle kısa vadede gübrenin toprak üzerindeki etkilerini belirgin bir şekilde değiştirebileceğini göstermektedir.

Hayvansal gübreler, bitki ihtiyaçlarını daha etkin bir şekilde karşılamak amacıyla kimi zaman kimyasal gübrelerle birlikte uygulanmaktadır. Bu yaklaşım, her iki gübre türünün ayrı ayrı uygulanmasından daha etkili olabilmektedir (Lin ve ark., 2020). Ayrıca, eş zamanlı uygulamanın TOK'yi artırdığına dair güçlü kanıtlar bulunmaktadır (Abdalla ve ark., 2022; Tian ve ark., 2022). 66 yıldan uzun süreli bir saha deneyinde Abdalla ve ark. (2022), organik gübre ile kimyasal gübrenin birlikte uygulanmasının TOK seviyesini artırdığını ve inkübasyon çalışmalarında, mikrobiyal aktivitenin azalması yoluyla mineralizasyonun C girdileriyle dengelendiğini bulmuşlardır. Tian ve ark. (2022) ise eş zamanlı uygulamanın TOK artışına katkısının, organik madde ilavesiyle oluşan daha büyük toprak agregatlarından kaynaklandığını; bu agregatların TOK'yi kayba karşı koruyarak hem inorganik hem de organik toprak C havuzlarına net fayda sağladığını öne sürmüştür. Bu bulgular, hayvansal kökenli gübre uygulamalarının kimyasal gübre kullanımını azaltma, organik madde girdilerini artırma, toprak sağlığını iyileştirme ve çevre

üzerindeki olumsuz etkileri azaltırken ürün verimini artırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

3.1.2. Toprağın pH değeri

Birçok çalışma, hayvansal kökenli organik gübre ilavesinin toprak pH'sını artırdığını, bu etkinin özellikle başlangıç pH değerinin asidik olduğu durumlarda daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır (Dhiman ve ark., 2019; Butler ve ark., 2010; Watts ve ark., 2010). Çoğu hayvan gübresi nötr ile alkalin arasında bir pH değerine sahiptir. Örneğin, hayvan gübreleri arasında domuz gübresinin pH değeri 6,6, sığır gübresinin 7,9 ve tavuk gübresinin 7,7 olarak rapor edilmiştir (Huang ve ark., 2017). Ayrıca, gübrelerin araziye uygulanmadan önce genellikle kompostlama işlemine tabi tutulduğu bilinmektedir ve bu işlem pH değerinde önemli değişikliklere yol açabilir. Kompostlama sırasında, domuz gübresinin pH değeri genellikle 30 gün sonra yaklaşık 7,8'e yükselirken, sığır gübresinin pH değeri 50 gün sonra yaklaşık 7,5'e düşmekte, tavuk gübresinin ise 30 gün sonra yaklaşık 8,7'ye yükseldiği gözlemlenmiştir (Huang ve ark., 2017). Bu durum, gübre veya kompost ilavelerinin en azından başlangıç aşamasında alkalin koşulları destekleyebileceğini göstermektedir. Organik maddeler güçlü bir pH tamponlama kapasitesine sahiptir; dolayısıyla, gübre ilaveleri özellikle asidik ve düşük tamponlama kapasitesine sahip topraklarda (örneğin, kumlu topraklar) toprak pH'sında daha belirgin bir etki yaratabilir. Bu bağlamda, gübre tipi ve miktarının yanı sıra toprağa karışma derecesi ve başlangıçtaki toprak özellikleri, gübre uygulamalarının toprak pH'sı üzerindeki etkilerini belirlemede kritik öneme sahiptir.

3.1.3. Toprağın katyon değişim kapasitesi

Toprağın KDK'si, esas olarak negatif yüklü organik madde ve silikat killerinin katyonları çekme yeteneğinden kaynaklanır. Organik maddenin yüksek KDK değeri nedeniyle, organik gübre uygulamaları genellikle toprak KDK'sini artırır ve bu etki literâtürde sıkça vurgulanmaktadır. Miller ve ark. (2016), 15 yıllık bir çalışmada besi yeri gübre uygulama oranlarının toprak KDK'si üzerindeki etkisini ayrıntılı olarak incelemiş ve gübre uygulama oranları ile KDK arasında güçlü bir pozitif korelasyon ($R^2 = 0,98$) bulmuştur. Dhiman ve ark. (2019) ise 44 yıllık bir süreçte organik ve mineral gübre uygulamalarının ardından 30 cm derinliğe kadar KDK'de artış tespit etmişlerdir. Whalen ve ark. (2000) tarafından yürütülen 8 haftalık bir inkübasyon çalışmasında toprak KDK'sinde genel bir değişim gözlemlenmemiş olmakla birlikte, artan organik gübre oranlarının KDK'yi tutarlı bir şekilde yükselttiği rapor edilmiştir.

3.1.4. Toprakta besin elementi kapsamları

Organik gübreler, bitkilerin büyümesi için gerekli olan N, P ve K başta olmak üzere, diğer makro ve mikro besin elementlerini içeren doğal bir gübre kaynağıdır. Bu besin maddeleri, hem inorganik hem de organik formlarda mevcuttur. Zamanla, organik besinler bitkiler tarafından kolayca alınabilen inorganik besinlere mineralize olur. Besinlerin mineralizasyonu mikrobiyal bir süreçtir ve bu nedenle sıcaklık, toprak nemi ve toprak ve gübre özellikleri gibi çevresel koşullara bağlıdır. Mineralizasyon hızı, toprak neminin tarla

kapasitesine yakın olduğu sıcak toprak koşullarında en yüksek seviyeye ulaşır. Gübreden N salınımını ürün talepleriyle eşleştirmek için büyüme derecesi günleri bir tahmin aracı olarak kullanılmıştır (Griffin ve Honeycutt, 2000). Mineralizasyon sürecinin tamamlanması dört yıldan fazla sürebilir; ancak, besinlerin çoğu bu sürecin ilk birkaç yılı içinde salınmaktadır (Eghball ve ark., 2002).

Mineralizasyon, besin maddesine, kaynağına ve uygulama yöntemine (örneğin, kompostlama) bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kompostlanmış gübrede organik azotun mineralizasyon oranı, yaklaşık %18 gibi düşük bir seviyede iken, domuz ve kümes hayvanı gübresinde bu oran yaklaşık %55 seviyesinde beklenmektedir (Eghball ve ark., 2002). Kompostlama işlemi sırasında, kolayca mineralize olabilen karbon (C) ve N bileşikleri kaybolduğundan, ilk birkaç yıl boyunca mevcut mineralize olabilen besin maddelerinin miktarı azalır (Eghball ve ark., 2002). Uygulanan gübrelerden elde edilen P ve K elverişliliği oldukça yüksektir; gübredeki P besininin %70'inden fazlası ve gübredeki K besininin neredeyse %100'ü, ya zaten inorganik formlarda mevcuttur ya da uygulamadan sonra hızla mineralize olmuştur (Eghball ve ark., 2002). Gübreden ayrıca bitkiler tarafından kullanılabilen veya hızla mineralize olabilen formlarda kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), çinko (Zn), demir (Fe), manganez (Mn), bakır (Cu), kükürt (S) ve bor (B) gibi elementler de bulunur. Bazı ülkeler, gübrelerdeki eser element konsantrasyonlarının tehlikeli atık olarak nitelendirilebilecek kadar yüksek olduğu durumları bildirmiştir (Sager, 2007). Ayrıca, gübrelerin tekrar tekrar uygulanmasının, sodyum adsorpsiyon oranını (SAR) ve değişebilir sodyum yüzdesini (ESP) artırabileceği ve bu durumun toprakta zamanla daha fazla sodyum (Na) birikmesine yol açabileceği öne sürülmüştür (Hao ve Chang, 2002). Gübredeki besin içeriği, hayvanın türüne, beslenmesine, yatak malzemesine, nem içeriğine ve depolama/işleme koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir.

Bitkisel üretimde toprağa besin sağlamak amacıyla hayvansal gübre ilavesinin, ürün veriminde önemli bir artış sağladığı bildirilmiştir (Dhiman ve ark., 2019). Ancak, gübrelerin bitki besinlerini etkin bir şekilde sağlamak için kullanımı, dikkate alınması gereken bazı hususları beraberinde getirmektedir. Gübredeki N, P ve K oranları genellikle bitki ihtiyaçlarıyla tam olarak örtüşmemektedir (Rayne ve Aula, 2020). N ihtiyaçlarına dayalı düzenli gübre uygulamaları, P ve K besin maddelerinin toprakta sürekli birikmesine neden olabilir (Sharpley ve ark., 1993; Ferguson ve ark., 2005). Fosforlu gübre uygulamaları, özellikle yüzey akışı ile P kaybı riskinin yüksek olduğu alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Eghball ve ark., 2002). Meek ve ark. (1982), 4 yıl boyunca yüksek oranlarda gübre uygulayarak, sulanan bir çöl bölgesinde 9 yıl boyunca toprağı izlediklerinde, artan yarayışlı P ve K ile birlikte önemli N kayıpları gözlemlemişlerdir. Genel olarak, gübre yoluyla uygulanan N besininin yalnızca %42'sinin kayıpları açıklayabildiği bildirilmiştir. Diğer çalışmalar ise, organik gübre uygulamalarının, kimyasal gübre uygulamalarıyla karşılaştırıldığında bile toprakta N seviyelerini artırdığını göstermiştir (Schlegel ve ark., 2015; Ozlu ve ark., 2019).

Edmeades (2003) tarafından yapılan bir incelemede, uzun vadeli (20-120 yıl) gübreleme uygulamalarının 14 farklı saha denemesi üzerinden ürün verimi ve toprak özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, uzun süreli gübrelemenin aşırı besin birikimine, özellikle de P ve N birikimine neden olduğu ve bu durumun gübre uygulaması yapılmayan topraklarda gözlemlenmediği tespit edilmiştir. Ayrıca, toprakta

bu besin birikiminin, yağış veya sulama suları ile birlikte yer altı ve yüzey sularına karışarak su kalitesini olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir. Ferguson ve ark. (2005) da uzun vadeli gübre uygulamalarında özellikle kabul edilemez düzeyde P birikimi riskine dikkat çekerek benzer endişelerini dile getirmişlerdir.
Son yıllarda, organik azotun bitki beslenmesini desteklemedeki rolü giderek daha fazla ilgi görmektedir. Amino asitler ve diğer düşük moleküler ağırlıklı N kaynakları, bitkilerin rizosferinde bolca bulunmakta ve topraktaki organik N seviyesi yüksek olduğunda bitkiler için bir N kaynağı olma potansiyeli taşımaktadır (Moe, 2013). Ancak, organik ve inorganik N alımının bitkilerin genel beslenmesi üzerindeki göreceli önemi henüz tam olarak netlik kazanmamıştır. Yine de, çoğu tarımsal alanda bitki besin gereksinimlerinin büyük oranda inorganik kaynaklarla karşılandığı düşünülmektedir.

3.2. Organik Gübrelerin Toprağın Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi

Organik gübre ilavelerinin toprak fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi genellikle olumlu olarak değerlendirilmektedir (Haynes ve Naidu, 1998; Rayne ve Aula, 2020). Organik gübre uygulamalarıyla toprağın su tutma kapasitesinde, gözenekliliğinde, infiltrasyon oranında, hidrolik iletkenliğinde ve suya dayanıklı agregatların oluşumunda artış sağlanırken, hacim ağırlığı ve yüzey kabuk oluşumunda azalma görüldüğüne dair pek çok çalışma bulunmaktadır (Haynes ve Naidu, 1998; Edmeades, 2003). Guo ve ark. (2016), organik gübrelerin toprak derinliklerinde (0–10 cm ve 10–20 cm arasında), kompoze gübrelerle (NPK) karşılaştırıldığında toprak hacim ağırlığını azalttığını saptamışlardır. Öte yandan, Yu ve ark. (2020), organik gübre uygulaması altında toprakta toplam gözeneklilik ile makro-gözenekliliğin, kontrole ve kompoze gübreye kıyasla %33–47 oranında daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Benzer şekilde, mezo-gözeneklilikte organik gübre uygulaması altında daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, bu araştırmacılar, gübre uygulaması sonrası toprağın hacim ağırlığındaki artışın, toprak mikro yapılarındaki değişikliklerle bağlantılı olduğunu ortaya koymuşlardır. Yedi yıllık bir organik gübre denemesi, organik gübrenin tek başına veya kimyasal gübre ile uygulanmasının Mollisol tipi topraklarda agregat stabilitesini artırdığını göstermiştir (Zhou ve ark., 2023). Bhanwaria ve ark. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, solucan gübresi (5 t ha^{-1}) uygulamasının toprağın su tutma kapasitesiyle birlikte bitkiye yarayışlı su miktarını da önemli ölçüde artırdığını, ancak toprağın hacim ağırlığını düşürdüğü bildirmiştir. Başka bir çalışmada, on yıl boyunca toprağa sığır gübresi uygulanması, domuz gübresi uygulamasına kıyasla -1,5 MPa'da daha yüksek bir su içeriği sağlarken, kontrol grubu ve kimyasal gübre uygulamalarına göre daha düşük bir toprak hacim ağırlığına yol açmıştır (Schlegel ve ark., 2015). Uzun süreli organik gübre uygulamaları ise erozyona uğramış arazilerde mısır verimini artırmakla kalmayıp, doymuş hidrolik iletkenliği iki katına çıkararak toprak hacim ağırlığını azaltmıştır (Arriaga ve Lowery, 2003). Darwish ve ark. (1995) tarafından Virginia'daki üç farklı toprak tipi üzerinde yürütülen 15 yıllık çalışma, hayvansal kökenli organik gübrenin toprakta su tutma kapasitesi, agregat stabilitesi ve ortalama ağırlıklı çap gibi fiziksel özelliklerde belirgin iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur. Çalışma, uygulanan organik gübrenin %95'inin ayrıştığını ve bunun toprakta küçük ama önemli değişikliklere yol açtığını bildirmektedir. Toprak üzerindeki organik

gübre etkisinin, gübrenin özellikleri, uygulama oranları ve ayrışma sürecini etkileyen iklim faktörlerine bağlı olarak değişiklik gösterebileceği belirtilmektedir.

3.3. Organik Gübrenin Toprağın Biyolojik Özelliklerine Etkileri

Toprak mikroorganizmaları, organik maddelerin ayrıştırılması ve besin maddelerinin salınımı süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Organik gübre uygulamalarının, toprak enzimatik aktivitelerini artırdığı ve TOK kapsamında belirgin bir artışa yol açtığı bildirilmiştir (Liu ve ark., 2024). Örneğin, vermikompost uygulamasının sukraz, alkalen fosfataz ve katalaz aktivitelerini farklı derecelerde artırdığı; fakat üreaz aktivitesinin vermikompost uygulamasıyla azaldığı bildirilmiştir (Shang ve ark., 2020). Organik gübreler, toprak bakteriyel yapısını değiştirir ve *Bacilli* ile *Flavobacteriales* gibi faydalı bakteri gruplarının bolluğunu artırır. Ayrıca, organik gübreler, aromatik hidrokarbonların bozunumu ve kitinoliz gibi karbonla ilgili fonksiyonel gruplardaki süreçleri de teşvik eder (Liu ve ark., 2023). Dahası, organik gübrelerin kullanımı, dehidrogenazlar ve β-glukozidaz gibi enzim aktivitelerini artırarak mikrobiyal faaliyetleri iyileştirir (Igalavithana ve ark., 2017; Ikoyi ve ark., 2020). Cui ve ark. (2018), uzun süreli organik gübre kullanımının *Proteobacteria* ve *Chloroflexi* bolluğunu artırdığını ve ayrıca organik materyallerin ve kimyasal gübrelerle birlikte kullanımının *Firmicutes, Actinobacteria* ve *Planctomycetes* bolluğunda artışa yol açtığını tespit etmişlerdir. Ikoyi ve ark. (2020), besin döngüsü ve bitki büyümesiyle ilişkili bakteri cinslerinin, özellikle *Burkholderia, Allorhizobium, Terrimonas, Chryseolinea, Terrimonas* ve *Ohtaekwangia*'nın, organik gübre uygulanan otlaklarda mineral gübrelerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, organik gübrelerin toprak özelliklerinde yarattığı değişikliklerin, mikrobiyal topluluklar için daha uygun bir ortam sağladığı vurgulanmıştır (Bei ve ark., 2018). 2017 yılında yapılan bir meta-analiz, çeltik tarlalarına hayvansal kökenli organik gübre ilavelerinin, mineral gübrelere kıyasla mikrobiyal biyokütle karbonunu yaklaşık iki katına çıkardığını bildirmiştir. Bununla birlikte, mineral gübre uygulaması ise, gübreleme yapılmamış (kontrol) tarlalara kıyasla mikrobiyal biyokütle karbonunda %29 oranında artış sağlamıştır (Geisseler ve ark., 2017). Pek çok sayıdaki araştırmalar, uzun vadeli organik gübre yönetiminin mikrobiyal biyokütle karbonunu artırdığını ortaya koymuştur (Liang ve ark., 2012; Liu ve ark., 2013; Dhiman ve ark., 2019). Rayne ve Aula (2020), organik gübre uygulanan topraklarda, gübre uygulanmayan kontrol topraklarına kıyasla daha yüksek mikrobiyal popülasyon gösteren çalışmaların sonuçlarını değerlendirmiştir. Özellikle bakterilerin, organik gübre uygulanan topraklarda mantarlara göre daha iyi geliştiğini, bunun da bakterilere daha uygun olan yüksek pH düzeyinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Öte yandan, bazı araştırmalar, hem inorganik hem de organik gübre uygulamalarının bakteri ve mantar bolluğu üzerinde anlamlı bir fark yaratmadığını belirtmiştir (Ai ve ark., 2012). Organik gübrelerin toprak mikrobiyal toplulukları üzerindeki etkisi yaygın olarak kabul görmekte olup, gübre uygulama yöntemleri ve zamanlamasının, bakteri topluluğu yapısı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (Zhao ve ark., 2014). Benzer şekilde, ekilen bitki türleri ve çevresel faktörler (toprak nemi ve sıcaklık) de mikrobiyal toplulukların bileşimini şekillendiren önemli etmenler arasında yer almaktadır (Lauber ve ark., 2013; Ofek-

Lalzar ve ark., 2014). Shen ve ark. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, inorganik gübre ve domuz gübresi kompostunun toprak bakterileri üzerindeki etkileri karşılaştırılmış; gübresiz kontrol, organik gübre ve organik gübre + azot (N) gübresi uygulamalarında bakteriyel yoğunluğun benzer olduğu tespit edilmiştir. Ancak, organik gübre içeren uygulamaların tek başına N gübresi uygulamasına göre daha yüksek bakteriyel yoğunluk sağladığı bildirilmiştir. Bu veriler, toprak pH'sı ve TOK kapsamı ile ilişkili olup, N gübrelemesinin pH'yı düşürmesinin mikrobiyal topluluğun yapısında değişikliklere yol açarak topluluğun bakteriden uzaklaşmasına neden olduğunu öne sürmektedir. Geisseler ve ark. (2017), çeltik tarlası topraklarında çiftlik gübresi, kompost ve kimyasal gübre uygulamalarının etkilerini inceleyen bir meta-analiz gerçekleştirmiştir. Çalışma sonuçları, organik gübre, kompost veya kimyasal gübrenin mikrobiyal topluluk kompozisyonunu belirgin şekilde etkilemediğini; ancak bu uygulamaların genel mikrobiyal biyokütleyi artırdığını göstermiştir.

4. Sonuçlar

Toprak sağlığını, sürdürülebilir üretimi ve iklim değişikliği ile mücadeleyi desteklemek amacıyla stabilize edilmiş toprak organik karbon (TOK) üzerindeki besin girdilerinin etkilerini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle kimyasal gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkileri hakkında önemli bilgi eksiklikleri bulunmaktadır. Gübre tavsiyeleri genellikle toprak sağlığı veya iklim dostu yönetim uygulamaları dikkate alınmadan hazırlanmakta, bu durum kimyasal gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirme yeteneğimizi kısıtlamaktadır.

Diğer yandan, organik gübrelerin değişken bileşimi, bu gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Karbon, toprak sağlığını doğrudan etkileyen kritik bir faktör olduğundan, organik gübrelerin uygulanmasında karbon bazında normalize edilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca, multi-omik teknikler (metagenomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik gibi), toprak sağlığı üzerinde umut verici sonuçlar sunmaktadır. Bu teknikler, mikroorganizma topluluklarının işlevlerini, organik C ayrışma süreçlerini ve toprak bileşenleriyle olan etkileşimlerini karakterize etme potansiyeline sahiptir.

Gelecekte, toprak sağlığı çalışmalarının daha geniş bir yönetim uygulamaları yelpazesinde, çevresel koşullar ve ürün desenleri dikkate alınarak daha ayrıntılı ve büyük veri analizleri ile yürütülmesi, toprak sağlığını artırmaya yönelik anlamlı bulgular elde edilmesine katkıda bulunacaktır. Bu hedeflere ulaşmak, toprak sağlığı araştırmalarında daha sistematik ve kapsamlı bir değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynaklar

Abdalla K., Sun Y., Zarebanadkouki M., Gaiser T., Seidel S., Pausch J. Long-term continuous farmyard manure application increases soil carbon when combined with mineral fertilizers due to lower priming effects. Geoderma 2022; 428: 116216.

Ai C., Liang G., Sun J., Wang X., Zhou W. Responses of extracellular enzyme activities and microbial community in both the rhizosphere and bulk soil to long-term fertilization practices in a fluvo-aquic soil. Geoderma 2012; 2: 330-338.

Albornoz F. Crop responses to nitrogen fertilization: A review. Scientia Horticulturae 2016; 205: 79-83.

Angus JF., Gupta VVSR., Good AJ., Pitson GD. Wheat yield and protein responses to anhydrous ammonia (Coldfo®) and urea, and their effects on soil. Final report of project CSP169, Grains Research and Development Corporation, Canberra, ACT 1999.

Anthony MA., Bender SF., van der Heijden MGA. Enumerating soil biodiversity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2023; 120: e2304663120.

Arriaga FJ., Lowery B. Soil physical properties and crop productivity of an eroded soil amended with cattle manure. Soil Science 2003; 168: 888-899.

Bansal S., Yin XH., Savoy HJ., Jagadamma S., Lee J., Sykes V. Long-term influence of phosphorus fertilization on organic carbon and nitrogen in soil aggregates under no-till corn–wheat–soybean rotations. Agronomy Journal 2020; 112: 2519-2534.

Barak P., Jobe BO., Krueger AR., Peterson LA., Laird DA. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. Plant and Soil 1997; 197: 61-69.

Bei S., Zhang Y., Li T., Christie P., Li X., Zhang J. Response of the soil microbial community to different fertilizer inputs in a wheat-maize rotation on a calcareous soil. Agricultural Ecosystems & Environment 2018; 260: 58-69.

Bhanwaria R., Singh B., Musarella CM. Effect of organic manure and moisture regimes on soil physiochemical properties, microbial biomass Cmic:Nmic:Pmic turnover and yield of mustard grains in arid climate. Plants 2022; 11(6): 722.

Bhatt MK., Labanya R., Joshi HC. Influence of long-term chemical fertilizers and organic manures on soil fertility-A review. Universal Journal of Agricultural Research 2019; 7: 177–188.

Bhattacharyya R., Chandra S., Singh RD., Kundu S., Srivastva AK., Gupta HS. Long-term farmyard manure application effects on properties of a silty clay loam soil under irrigated wheat-soybean rotation. Soil and Tillage Research 2007; 94: 386-396.

Bonanomi G., Lorito M., Vinale F., Woo SL. Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: toward a unified framework for disease suppression. Annual Review of Phytopathology 2018; 56: 1-20.

Brar BS., Singh J., Singh G., Kaur G. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize-wheat rotation. Agronomy (Basel) 2015; 5(2): 220-238.

Burke JA., Lewis KL., Ritchie GL., Moore-Kucera J., DeLaune PB., Keeling JW. Temporal variability in soil carbon and nitrogen in cotton production on the Texas High Plains. Agronomy Journal 2019; 111: 2218–2225.

Butler T., Han KJ., Muir JP., Weindorf DC., Lastly L. Dairy manure compost effects on corn silage production and soil properties. Agronomy Journal 2010; 100: 1541–1545.

Bünemann EK., Schwenke GD., Van Zwieten L. Impact of agricultural inputs on soil organisms – a review. Australian Journal of Soil Research 2006; 44: 379–406.

Cabrera M., Kissel DE., Bock BR. Urea hydrolysis in soil: effects of urea concentration and soil pH. Soil Biology and Biochemistry 1991; 25: 1121–1124.

Chakraborty D., Garg RN., Tomar RK., Dwivedi BS., Aggarwal P., Behera UK., Thangasamy A., Singh D. Soil physical quality as influenced by long-term application of fertilizers and manure under maize-wheat system. Soil Science 2010; 175: 128–136.

Cheng F., Peng X., Zhao P., Yuan J., Zhong C., Cheng Y. Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling Mountains. PLoS One 2013; 8(6): e67353.

Cherkasov N., Ibhadon AO., Fitzpatrick P. A review of the existing and alternative methods for greener nitrogen fixation. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 2015; 90: 24–33.

Chivenge P., Vanlauwe B., Gentile R., Six J. Comparison of organic versus mineral resource effects on short-term aggregate carbon and nitrogen dynamics in a sandy soil versus a fine textured soil. Agricultural Ecosystems and Environment 2011; 140: 361–371.

Cooper JM., Burton D., Daniell TJ., Griffiths BS., Zebarth BJ. Carbon mineralization kinetics and soil biological characteristics as influenced by manure addition in soil incubated at a range of temperatures. European Journal of Soil Biology 2011; 47: 392–399.

Cui X., Zhang Y., Gao J., Peng F., Gao P. Long-term combined application of manure and chemical fertilizer sustained higher nutrient status and rhizospheric bacterial diversity in reddish paddy soil of Central South China. Scientific Reports 2018; 8: 16554.

Darwish OH., Persaud N., Martens DC. Effect of long-term application of animal manure on physical properties of three soils. Plant and Soil 1995; 176: 289–295.

Delavaux CS., Smith-Ramesh LM., Kuebbing SE. Beyond nutrients: a meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils. Ecology 2017; 98: 2111–2119.

Dhiman D., Sharma R., Sankhayan NK., Wepehya S., Sharma SK., Kumar R. Effect of regular application of fertilizers, manure, and lime on soil health and productivity of wheat in an acid Alfisol. Journal of Plant Nutrition 2019; 42: 2507–2521.

Du S., Ma Z., Chen J., Xue L., Tang C., Shareef TM., Siddique KH. Effects of organic fertilizer proportion on the distribution of soil aggregates and their associated organic carbon in a field mulched with gravel. Scientific Reports 2022; 12: 11513.

Duo F., Hons FM., Wright AL., Boutton TW., Yu X. Soil carbon sequestration in sorghum cropping systems: evidence from stable isotopes and aggregate-size fractionation. Soil Science 2014; 179: 68–74.

Edmeades DC. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems 2003; 66: 165–180.

Eghball B., Wienhold BJ., Gilley JE., Eigenberg RA. Mineralization of manure nutrients. Journal of Soil and Water Conservation 2002; 57: 470–473.

Ferguson RB., Nienaber JA., Eigenberg RA., Woodbury BL. Long-term effects of sustained beef feedlot manure application on soil nutrients, corn silage yield, and nutrient uptake. Journal of Environmental Quality 2005; 34: 1672–1681.

Fierer N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. Nature Reviews Microbiology 2017; 15: 579–590.

Fonte SJ., Yeboah E., Ofori P., Quansah GW., Vanlauwe B., Six J. Fertilizer and residue quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates. Soil Science Society of America Journal 2009; 73: 961–966.

Geisseler D., Lazicki PA., Scow KM. Mineral nitrogen input decreases microbial biomass in soils under grasslands but not annual crops. Applied Soil Ecology 2016; 106: 1–10.

Geisseler D., Linquist BA., Lazicki PA. Effect of fertilization on soil microorganisms in paddy rice systems – meta-analysis. Soil Biology and Biochemistry 2017; 115: 452–460.

Geisseler D., Scow KM. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – a review. Soil Biology and Biochemistry 2014; 54–63.

Govindasamy P., Muthusamy SK., Bagavathiannan M., Mowrer J., Jagannadham PTK., Maity A., Halli HM., GKS., Vadivel R., TKD., Raj R., Pooniya V., Babu S., Rathore SS., LM., Tiwari G. Nitrogen use efficiency—a key to enhance crop productivity under a changing climate. Frontiers in Plant Science 2023; 14: 1121073.

Grandy AS., Daly AB., Bowles TM., Gaudin ACM., Jilling A., Leptin A., McDaniel MD., Wade J., Waterhouse H. The nitrogen gap in soil health concepts and fertility measurements. Soil Biology and Biochemistry 2022; 175: 108856.

Green CJ., Blackmer AM., Horton R. Nitrogen effects on conservation of carbon during corn residue decomposition in soil. Soil Science Society of America Journal 1995; 59: 453–459.

Griffin TS., Honeycutt CW. Using growing degree days to predict nitrogen availability from livestock manures. Soil Science Society of America Journal 2000; 64: 1876–1882.

Guo JX., Hu XY., Gao LM., Xie KL., Ling N., Shen QR., Hu SJ., Guo SW. The rice production practices of high yield and high nitrogen use efficiency in Jiangsu, China. Scientific Reports 2017; 7: 2101.

Guo L., Wu G., Li Y., Li C., Liu W., Meng J., Liu H., Yu X., Jiang G. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China. Soil and Tillage Research 2016; 156: 140–147.

Hao X., Chang C. Effect of 25 annual cattle manure application on soluble and exchangeable cations in soil. Soil Science 2002; 167: 126–134.

Hawkesford MJ. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production. Journal of Cereal Science 2014; 59(3): 276–283.

Haynes RJ., Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems 1998; 51: 123–137.

He L., Mazza Rodrigues JL., Soudzilovskaia NA., Barceló M., Olsson PA., Song C., Tedersoo L., Yuan F., Yuan F., Lipson DA., Xu X. Global biogeography of fungal and bacterial biomass carbon in topsoil. Soil Biology and Biochemistry 2020; 151: 108024.

Howe JA., McDonald MD., Burke J., Robertson I., Coker H., Gentry TJ., Lewis KL. Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: A review. Soil Security 2024; 16: 100155.

Huang J., Yu Z., Gao H., Yan X., Chang J., Wang C., Hu J., Zhang L. Chemical structures and characteristics of animal manures and composts during composting and assessment of maturity indices. PLoS ONE 2017; 12: e0178110.

Igalavithana AD., Lee SS., Niazi NK., Lee YH., Kim KH., Park JH., Moon DH., Ok YS. Assessment of soil health in urban agriculture: Soil enzymes and microbial properties. Sustainability 2017; 9: 310.

Ikoyi I., Egeter B., Chaves C., Ahmed M., Fowler A., Schmalenberger A. Responses of soil microbiota and nematodes to application of organic and inorganic fertilizers in grassland columns. Biology and Fertility of Soils 2020; 56: 647–662.

Jenkins MB., Truman CC., Siragusa G., Line E., Bailey JS., Frye J., Sharpe RR. Rainfall and tillage effects on transport of fecal bacteria and sex hormones 17β-estradiol and testosterone from broiler litter applications to a Georgia Piedmont Ultisol. Science of the Total Environment 2008; 403: 154–163.

Jobbagy EG., Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications 2000; 10: 423–436.

Khonje DJ., Varsa EC., Klubek B. The acidulation effects of nitrogenous fertilizers on selected chemical and microbiological properties of soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 1989; 20: 1377–1395.

Krasilnikov P., Taboada MA., Amanullah. Fertilizer use, soil health and agricultural sustainability. Agriculture 2022; 12(4): 462.

Kuzyakov Y., Friedel J.K., Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. Soil Biology and Biochemistry 2000; 32: 1485–1498.

Lauber CL., Ramirez KS., Aanderud Z., Lennon J., Fierer N. Temporal variability in soil microbial communities across land-use types. ISME Journal 2013; 7: 1641–1650.

Lazcano C., Tsang A., Doane TA., Pettygrove GS., Horwath WR., Burger M. Soil nitrous oxide emissions in forage systems fertilized with liquid dairy manure and inorganic fertilizers. Agricultural Ecosystems & Environment 2016; 225: 160–172.

Lazcano C., Zhu-Barker X., Decock C. Effects of organic fertilizers on the soil microorganisms responsible for N_2O emissions: a review. Microorganisms 2021; 9: 983.

Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. Nature 2015; 528: 60–68.

Lekberg Y., McLeod M., Bullington LS., DuPre ME., De La Roca G., Greenbaum S., Rousk J., Ramsey PW. Substantial and rapid increase in soil health across crops with conversion from conventional to regenerative practices. Sustainability 2024; 16: 5509.

Lenssen AW., Sainju UM., Jones C., McVay K., Angvick T. Nitrogen fertilization rate and method influences water and nitrogen productivity of forage winter wheat. Agronomy Journal 2020; 113: 577–589.

Li N., You M-Y., Zhang B., Han XZ., Panakoulia SK., Yuan YR., Liu K., Qiao YF., Zou WX., Nikolaidis NP., Banwart SA.Chapter seven – modeling soil aggregation at the early pedogenesis stage from the parent material of a Mollisol under different agricultural practices. In: Banwart, S.A., Sparks, D.L. (Eds.), Quantifying and Managing Soil Functions in Earth's Critical Zone: Combining Experimentation and Mathematical Modelling. Advances in Agronomy Vol. 142, Academic Press; 2017. pp. 181–241.

Li T., Zhang Y., Bei S., Li X., Reinsch S., Zhang H., Zhang J. Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates. Catena 2020; 194: 104739.

Li XH., Han XZ., Li HB., Song C., Yan J., Liang Y. Soil chemical and biological properties affected by 21-year application of composted manure with chemical fertilizers in a Chinese Mollisol. Canadian Journal of Soil Science 2012; 92: 419–428.

Li YC., Li Z., Li ZW., Jiang YH., Weng BQ., Lin WX. Variations of rhizosphere bacterial communities in tea (*Camellia sinensis* L.) continuous cropping soil by high-throughput pyrosequencing approach. Journal of Applied Microbiology 2016; 121: 787–799.

Liang Q., Chen H., Gong Y., Fan M., Yang H., Lal R., Kuzyakov Y. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat–maize system in the North China Plain. Nutrient Cycling in Agroecosystems 2012; 92: 3–21.

Lin W., Lin M., Zhou H., Wu H., Li Z., Lin W. The effects of chemical and organic fertilizer usage on rhizosphere soil in tea orchards. PLoS One 2019; https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217018.

Lin Y., Watts DB., Torbert HA., Howe JA., Feng Y. Integration of poultry litter and mineral nitrogen on growth and yield of winter canola. Agronomy Journal 2020; 112: 2496–2505.

Liptzin D., Norris CE., Cappellazzi SB., Bean GM., Cope M., Greub KLH., Rieke EL., Tracy PW., Aberle E., Ashworth A., Tavarez OB., Bary AI., Baumhardt RL., Gracia AB., Brainard DC., Brennan JR., Reyes DB., Bruhjell D., Carlyle CN., Crawford JJW., Honeycutt CW. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. Soil Biology and Biochemistry 2022; 172: 108708.

Liu E., Yan C., Mei X., Zhang Y., Fan T. Long-term effect of manure and fertilizer on soil organic carbon pools in dryland farming in Northwest China. PLoS ONE 2013; 8: e56536.

Liu Y., Lan X., Hou H., Ji J., Liu X., Lv Z. Multifaceted ability of organic fertilizers to improve crop productivity and abiotic stress tolerance: review and perspectives. Agronomy 2024; 14: 1141.

Liu Z., Song Y., Ge L., Pan X., Zhao Y., Cheng L., Li Y., Liu X. Impact of various organic fertilizers on the growth, yield, and soil environment of peanuts subjected to continuous cropping obstacles. Polish Journal of Environmental Studies 2023; 32: 3683–3693.

Lu M., Zhou X., Luo Y., Yang Y., Fang C., Chen J., Li B. Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis. Agricultural Ecosystems & Environment 2011; 140: 234–244.

Maillard E., Angers DA. Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis. Global Change Biology 2014; 20: 666–679.

Maltas A., Kebli H., Oberholzer HR., Weisskopf P., Sinaj S. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. Land Degradation & Development 2018; 29(4): 926–938.

Marschner H. Principles of Plant Nutrition. Academic Press; 1995.

Maynard DN., Hochmuth GJ. Knott's Handbook for Vegetable Growers. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA; 2007. 630 p.

Meek B., Graham L., Donovan T. Long-term effects of manure on soil nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, organic matter, and water infiltration rate. Soil Science Society of America Journal 1982; 46: 1014–1019.

Miller J., Beasley B., Drury C., Larney F., Hao X. Influence of long-term application of composted or stockpiled feedlot manure with straw or wood chips on soil cation exchange capacity. Compost Science & Utilization 2016; 24: 54–60.

Moe LA. Amino acids in the rhizosphere: from plants to microbes. American Journal of Botany 2013; 100(9): 1692–1705.

Ni G., Leung PM., Daebeler A., Guo J., Hu S., Cook P., Nicol GW., Daims H., Greening C. Nitrification in acidic and alkaline environments. Essays in Biochemistry 2023; 67(4): 753-768.

Ofek-Lalzar M., Sela N., Goldman-Voronov M., Green SJ., Hadar Y., Minz D. Niche and host-associated functional signatures of the root surface microbiome. Nature Communications 2014; 5: 4950.

Ozlu E., Sandhu SS., Kumar S., Arriaga FJ. Soil health indicators impacted by long-term cattle manure and inorganic fertilizer application in a corn-soybean rotation of South Dakota. Scientific Reports 2019; 9: 11776.

Poffenbarger HJ., Barker DW., Helmers MJ., Miguez FE., Olk DC., Sawyer JE., Six J., Castellano MJ. Maximum soil organic carbon storage in Midwest US cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. PLoS ONE 2017; 12: e0172293.

Rayne N., Aula L. Livestock manure and the impacts on soil health: a review. Soil Systems 2020; 4: 64.

Raza S., Miao N., Wang P., Ju X., Chen Z., Zhou J., Kuzyakov Y. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands. Global Change Biology 2020; 27: e7–e10.

Ren N., Wang Y., Ye YL., Zhao YA., Huang YF., Fu W., Chu Xv. Effects of continuous nitrogen fertilizer application on the diversity and composition of rhizosphere soil bacteria. Frontiers in Microbiology 2020; 11: 1948.

Roba T. Review on: The effect of mixing organic and ınorganic fertilizer on productivity and soil fertility. Open Access Library Journal 2018; 5: 1-11.

Ronner E., Franke AC., Vanlauwe B., Dianda M., Edeh E., Ukem B., Bala A., Van Heerwaarden J., Giller KE. Understanding variability in soybean yield and response to P-fertilizer and rhizobium inoculants on farmers' fields in northern Nigeria. Field Crops Research 2016; 186: 133–145.

Ross D., Matschonat G., Skyllberg U. Cation exchange in forest soils: the need for a new perspective. European Journal of Soil Science 2008; 59: 1141–1159.

Rousk J., Brookes PC., Bååth E. The microbial PLFA composition as affected by pH in an arable soil. Soil Biology and Biochemistry 2010; 42: 516–520.

Sager M. Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria. Soil Biology and Biochemistry 2007; 39: 1383–1390.

Schlegel AJ., Assefa Y., Bond HD., Wetter SM., Stone LR. Soil physiochemical properties after 10 years of animal waste application. Soil Science Society of America Journal 2015; 79: 711–719.

Schmitt MA., Scheaffer CC., Randall GW. Manure and fertilizer effects on alfalfa plant nitrogen and soil nitrogen. Journal of Production Agriculture 2024; 7(1): 104–109.

Seymour NP. Impacts of pesticides and fertilizers on soil biota. Dissertation, University of Southern Queensland; 2002.

Shang L., Wan L., Zhou X., Li S., Li X. Effects of organic fertilizer on soil nutrient status, enzyme activity, and bacterial community diversity in *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia, China. PLoS ONE 2020; 15: e0240559.

Sharpley AN., Daniel TC., Edwards DR. Phosphorus movement in the landscape. Journal of Production Agriculture 1993; 6: 492–500.

Shen J., Zhang L., Guo J., Ray JL., He J. Impact of long-term fertilization practices on the abundance and composition of soil bacterial communities in NE China. Applied Soil Ecology 2010; 46: 119–124.

Shinoto Y., Otani R., Matsunami T., Maruyama S. Analysis of the shallow root system of maize grown by plowing upland fields converted from paddy fields: Effects of soil hardness and fertilization. Plant Production Science 2020; 24: 297–305.

Singh B. Are nitrogenous fertilizers deleterious to soil health? Agronomy 2018; 8: 48.

Singh TB., Ali A., Prasad M., Yadav A., Shrivastav P., Goyal D., Dantu PK. Role of organic fertilizers in improving soil fertility. In: Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management; Springer: Cham, The Netherlands; 2020. pp. 61–77.

Tang B., Rocci KS., Lehmann A., Rillig MC. Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality. Global Change Biology 2023; 29(7): 1971–1983.

Tian Y., Wang Q., Gao W., Luo Y., Wu L., Rui Y., Huang Y., Xiao Q., Li X., Zhang W. Organic amendments facilitate soil carbon sequestration via organic carbon accumulation and mitigation of inorganic carbon loss. Land Degradation & Development 2022; 33(9): 1423–1433.

Vanlauwe B., Bationo A., Chianu J., Giller KE., Merckx R., Mokwunye U., Sanginga N. Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. Outlook on Agriculture 2010; 39: 17–24.

Watts DB., Torbert HA., Prior SA., Huluka G. Long-term tillage and poultry litter impacts soil carbon and nitrogen mineralization and fertility. Soil Science Society of America Journal 2010; 74: 1239–1247.

Whalen JK., Chang C., Clayton GW., Carefoot JP. Cattel manure amendments can increase the pH of acid soils. Soil Science Society of America Journal 2000; 64: 962–966.

Whalen JK., Thomas BW., Sharifi M. Novel practices and smart technologies to maximize the nitrogen fertilizer value of manure for crop production in cold humid temperate regions. In: Advances in Agronomy; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019.

Wu L., Zhang W., Wei W., He Z., Kuzyakov Y., Bol R., Hu R. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization. Soil Biology and Biochemistry 2019; 135: 383–391.

Xia Y., Kwon H., Wander M. Developing county-level data of nitrogen fertilizer and manure inputs for corn production in the United States. Journal of Cleaner Production 2021; 309.

Xun W., Zhao J., Xue C., Zhang G., Ran W., Wang B., Shen Q., Zhang R. Significant alteration of soil bacterial communities and organic carbon decomposition by different long-term fertilization management conditions of extremely low-productivity arable soil in South China. Environmental Microbiology 2016; 18: 1907–1917.

Yu GH., Chen CM., He XH., Zhang XZ., Li LN. Unexpected bulk density and microstructures response to long-term pig manure application in a Ferralic Cambisol Soil: Implications for rebuilding a healthy soil. Soil and Tillage Research 2020; 203: 104668.

Yu H., Ding W., Luo J., Geng R., Cai Z. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil. Soil and Tillage Research 2012; 124: 170–177.

Yu WT., Bi ML., Xu YG., Zhou H., Ma Q., Jiang CM. Microbial biomass and community composition in a Luvisol soil as influenced by long-term land use and fertilization. Catena 2013; 107: 89–95.

Zeng J., Liu XJ., Song L., Lin XG., Zhang HY., Shen CC., Chu H. Nitrogen fertilization directly affects soil bacterial diversity and indirectly affects bacterial community composition. Soil Biology and Biochemistry 2016; 92: 41–49.

Zhang W., Xu M., Wang X., Huang Q., Nie J., Li Z., Li S., Hwang SW., Lee KB. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China. Journal of Soil and Sediment 2012; 12: 457–470.

Zhang Y., Zhang S., Wang R., Cai J., Zhang Y., Li H., Huang S., Jiang Y. Impacts of fertilization practices on pH and the pH buffering capacity of calcareous soil. Soil Science and Plant Nutrition 2016; 62: 432–439.

Zhao J., Ni T., Li Y., Xiong W., Ran W., Shen B., Shen Q., Zhang R. Responses of bacterial communities in arable soils in a rice-wheat cropping system to different fertilizer regimes and sampling times. PLoS ONE 2014; 9: e85301.

Zhao J., Wu X., Nie C., Wu T., Dai W., Liu H. Analysis of unculturable bacterial communities in tea orchard soils based on nested PCR-DGGE. World Journal of Microbiology and Biotechnology 2012; 28: 1967–1979.

Zheng Y., Jin J., Wang X., Clark GJ., Tang C. Increasing nitrogen availability does not decrease the priming effect on soil organic matter under pulse glucose and single nitrogen addition in woodland topsoil. Soil Biology and Biochemistry 2022; 172: 108767.

Zhou M., Xiao Y., Xiao L., Li Y., Zhang X., Cruse RM., Liu X. Increased soil aggregate stability by altering contents and chemical composition of organic carbon fractions via seven years of manure addition in mollisols. Agriculture 2023; 13(1): 88.

Zhu Z., Ge T., Liu S., Hu Y., Ye R., Xiao M., Tong C., Kuzyakov Y., Wu J. Rice rhizodeposits affect organic matter priming in paddy soil: the role of N fertilization and plant growth for enzyme activity, CO_2 and CH_4 emissions. Soil Biology and Biochemistry 2018; 116: 369–377.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2574-2593, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5):2574-2593, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Akciğer ve Meme Kanserinde Yapay Zekâ: LLM ve LVM ile Öneriler

Berra ÖZ[1*], Ali Hakan IŞIK[2]

[1,2] Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 15000, Burdur

[1]https://orcid.org/0009-0000-9236-4394
[2]https://orcid.org/0000-0003-3561-9375
*Sorumlu yazar: berraoz@mehmetakif.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.12.2024
Kabul tarihi:11.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Derin öğrenme
Makine öğrenmesi
Large language model
Large vision model

ÖZ

Kanser, vücut hücrelerinin kontrolsüz bir şekilde büyüyüp çoğalması sonucunda oluşan bir hastalıktır. Akciğer ve meme kanseri, dünya genelinde en sık görülen kanser türlerinden biridir ve bu nedenle kanser teşhisi, hastalığın erken evrelerinde tespit edilmesi ve tedaviye başlanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel teşhis yöntemleri zaman zaman yeterince hassas sonuçlar vermemektedir. Bu bağlamda, yapay zekâ destekli kanser teşhisi önemli bir rol oynamaktadır. Yapay zekâ daha geniş bir veri yelpazesini ele alarak kanser teşhisinde fark edilemeyebilecek önemli ayrıntıları algılayabilmekte ve belirli kanser türlerini erken aşamada tespit edebilmektedir. Bu derleme makalesi, 2020 ile 2023 yılları arasında yapılan çalışmalarda, akciğer ve meme kanseri tanısında kullanılan makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarının detaylı bir incelemesini sunmayı ve bu algoritmaların akciğer ve meme kanseri teşhisi performanslarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada 30 makale incelenmiş, ele alınan makalelerdeki makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının zaman karmaşıklıkları analiz edilmiştir. Bu doğrultuda LLM (Large Language Model) ve LVM (Large Vision Model)'nin onkoloji alanındaki etkinliği değerlendirilmiştir. Bu modellerin potansiyelini artırmak ve onkoloji alanındaki uygulamalarda etkin bir şekilde kullanımının genişletilebilmesi amacıyla çeşitli önerilerde bulunulmuştur. Bu çalışmanın, klinik uygulamalarda algoritmaların performansını değerlendirmek için önemli bir rehber olabileceği ve LLM ile LVM'lerin tıbbi uygulamalardaki potansiyelini vurgulayarak bu alandaki ilerlemelerin önemini ve etkisini geniş bir kitleye duyurabileceği düşünülmektedir.

Artificial Intelligence in Lung and Breast Cancer: Recommendations with LLM and LVM

Reviews

Article History:
Received: 24.12.2024
Accepted: 11.05.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Deep learning
Machine learning
Large language model
Large vision model

ABSTRACT

Cancer is a disease caused by the uncontrolled growth and proliferation of body cells. Lung and breast cancers are among the most common types of cancer worldwide. Therefore, early detection of cancer and timely initiation of treatment are critically important. Traditional diagnostic methods may sometimes struggle to provide accurate results. In this context, artificial intelligence (AI)-assisted cancer diagnosis plays a pivotal role. AI can analyze a broader range of data and detect critical details that might otherwise go unnoticed, enabling the early detection of specific types of cancer. This review article aims to provide a detailed examination of machine learning (ML) and deep learning (DL) algorithms used in the diagnosis of lung and breast cancer in studies conducted between 2020 and 2023. In this study, 30 articles were analyzed and the time complexity of machine learning and deep learning algorithms were analyzed. Accordingly, the effectiveness

of LLM (Large Language Model) and LVM (Large Vision Model) in the field of oncology was evaluated. To further enhance the potential of these models and expand their effective use in oncology applications, various recommendations are proposed. It is thought that the study can be an important guide for evaluating the performance of algorithms in clinical applications and can convey the importance and impact of advances in this field to a wider audience by emphasizing the potential of LLMs and LVMs in medical applications.

To Cite: Öz B., Işık AH. Akciğer ve Meme Kanserinde Yapay Zekâ: LLM ve LVM ile Öneriler. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2574-2593.

1. Giriş

Kanser, vücut hücrelerinin kontrolsüz bir şekilde büyüyüp çoğalması sonucunda oluşan bir hastalıktır. Normal koşullarda, vücut hücreleri belirli bir düzen ve kontrol mekanizması altında çoğalır, büyür ve ölür. Ancak kanserde, bu kontrol mekanizmaları bozulur ve hücreler normal sınırlarını aşarak vücutta istilacı bir şekilde büyümeye devam eder.

Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı'na göre dünya çapında her beş kişiden biri yaşamı boyunca kansere yakalanmaktadır. Mevcut bilimsel kanıtlar, kanserde erken teşhisin önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir (International Agency for Research on Cancer [IARC]). Akciğer ve meme kanseri gibi sık rastlanan kanser türlerinde erken teşhisin, hastalığın seyrini olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Etkili birincil önleme tedbirleriyle tüm kanser vakalarının en az %40'ının önlenmesi mümkündür. Erken teşhis ile tedavi seçenekleri artmakta, tedaviye daha iyi yanıt alınmakta ve uzun vadeli sağkalım oranları büyük ölçüde yükselmektedir. Bunun yanında erken aşamada tespit edilen kanserlere, daha az agresif tedavi yöntemleri uygulanabilmekte ve bu da hastaların yaşam kalitesini büyük oranda artırmaktadır. Geleneksel teşhis yöntemleri arasında biyopsi, çeşitli görüntüleme teknikleri, kan testleri ve fiziksel muayene bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler bazen yeterince doğru sonuçlar vermemekte ve yanıltıcı olabilmektedir. Bu bağlamda yapay zekâ ile kanser teşhisi büyük önem taşımaktadır.

Makine öğrenimi, bilgisayar sistemlerinin belirli veri setleri üzerinden öğrenme yapabilmesini ve bu verilerden bilgi çıkarabilmesini sağlayan yapay zekâ alanının bir dalı olarak tanımlanmaktadır. Gelişen teknoloji ve veri işleme yetenekleri ile, makine öğrenimi sağlık alanında hastalık teşhislerinde daha hassas ve erken sonuçlar elde etmeye, tedavi süreçlerini kişiselleştirmeye ve sağlık hizmetlerini optimize etmeye olanak tanımaktadır. Bu teknoloji, geniş veri setlerini analiz ederek kanser teşhisinde fark edilemeyecek ince ayrıntıları algılayabilmekte ve belirli kanser türlerini erken aşamada tespit edebilme yeteneği sunmaktadır (Veranyurt ve ark., 2020).

Derin öğrenme, büyük miktarda veri üzerinden öğrenme yeteneği olan yapay sinir ağlarının kullanıldığı, makine öğreniminin bir alt dalıdır. Derin öğrenme modelleri, büyük miktarda veriden öğrenebilmekte ve bu da onları karmaşık görevleri gerçekleştirmek için eğitmeyi mümkün kılmaktadır. Derin öğrenme, karmaşık medikal veri setlerini işleyebilme yeteneği sayesinde kanser teşhisinde önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle tıbbi görüntülerden kanser teşhisinde etkili ve hassas bir araç olarak kullanılabilmektedir (Cifci, 2022).

Bu derleme makalesi, akciğer ve meme kanseri teşhisi için makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarının 2020 ile 2023 yılları arasında yapılan çalışmalarda kullanımının detaylı bir incelemesini sunmayı amaçlamaktadır. Yapılan çalışmaya 30 makale dahil edilmiştir. Derleme, akciğer ve meme kanseri teşhisi için kullanılan derin öğrenme ve makine öğrenimi temelli algoritmaların performanslarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, incelenen çalışmalar kanser türü, kullanılan algoritmalar, veri seti, veri türü ve son olarak ayrı bir tabloda performans metrikleri başlıklarını içerecek şekilde sıralanmaktadır. Oluşturulan bu yapı, incelenen çalışmaların detaylı ve düzenli bir şekilde sunulmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte makine öğrenmesi ile derin öğrenme algoritmalarının zaman karmaşıklıkları analiz edilmiş ve farklı veri türlerine bağlı olarak en yüksek performans gösteren beş algoritma belirlenerek tablo halinde sunulmuştur.

Yapılan analizlerin ardından, LLM (Large Language Model) ve LVM (Large Vision Model)'nin onkoloji alanındaki etkinliği incelenmiş, bu modellerin potansiyelini artırmak ve onkoloji alanındaki uygulamalarda etkin bir şekilde kullanımının genişletilebilmesi amacıyla çeşitli önerilerde bulunulmuştur. Yapılan derlemede çalışmaların sentezlenmesinin, farklı algoritmaların akciğer ve meme kanseri teşhisi üzerindeki etkinliğinin ve başarısının karşılaştırılabilmesine olanak tanıdığı klinik uygulamalarda algoritmaların performanslarını değerlendirmeye yönelik önemli bir yol gösterici olabileceği, aynı zamanda LLM ve LVM'lerin tıbbi uygulamalardaki potansiyelini vurgulayarak, bu alandaki ilerlemelerin önemini ve etkisini daha geniş bir kitleye ulaştırabileceği düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1.Araştırma Soruları

Bu çalışma,

"Akciğer ve Meme kanserinde kullanılan makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları hangileridir?"

"Makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları akciğer ve meme kanseri teşhisi için ne kadar etkili ve doğru sonuçlar vermektedir?"

"LLM (Large Language Model) ve LVM (Large Vision Model) onkoloji alanında nasıl kullanılabilir ve kanser araştırmalarına ne tür katkılarda bulunabilir?"

Sorularına cevap vermeyi amaçlamaktadır.

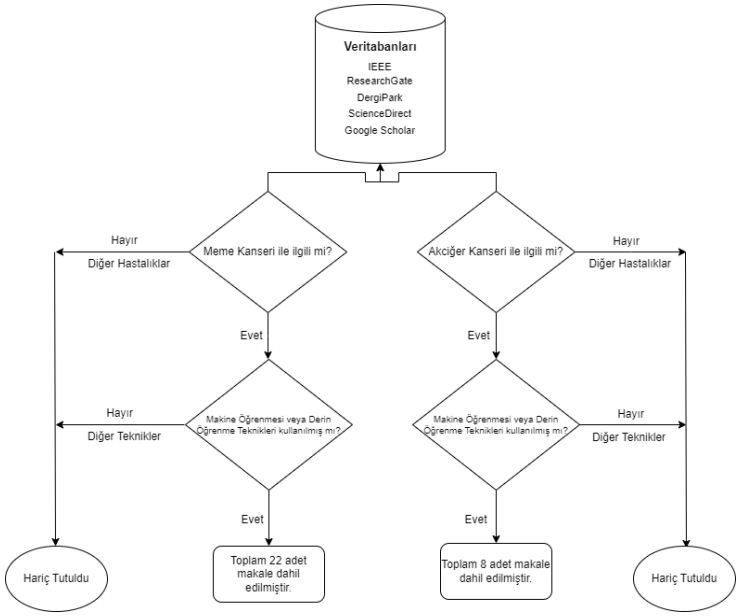
2.2. Veri Toplama

Araştırma kapsamına, 2020-2023 yılları arasında yayımlanan ve kanser teşhisine odaklanan 30 makale dahil edilmiş olup, bu makaleler Google Scholar ve IEEE Xplore veri tabanlarından seçilmiştir. İncelenen makaleler, makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarının kullanımı ile kanser teşhisindeki gelişmeleri ele almaktadır.

Belirtilen veri tabanlarından konuyla ilgili makaleler toplanmıştır. Bu işlemin ardından toplanan makaleler taranarak çalışmaya dahil edilmesi planlanan makaleler tam metin incelemesine tabi

tutulmuştur. Her makalenin incelenmesinin ardından kanser türü, araştırmada kullanılan algoritmalar, veri seti, veri türü ve en yüksek performansa sahip algoritma listelenmiştir. Performans değerlendirmesinde doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (sensitivity), özgünlük (specificity), F-puanı ve AUC (ROC eğrisinin altındaki alan) metrikleri baz alınmıştır.

Araştırmada incelenen makalelerde toplam 33 farklı algoritma kullanıldığı tespit edilmiştir. Yoğun olarak kullanılan makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları bir sonraki başlık altında incelenmektedir.



Şekil 1. Literatür taramasında kullanılan yöntemin görsel özeti

Şekil 1, veri tabanı taramasının hangi kriterlere göre gerçekleştirildiğini göstermektedir. İlk olarak, meme kanseri ve akciğer kanseri hakkında bir araştırma yapılacağı için ilgili hastalıklara odaklanan çalışmalar seçilmiştir. Daha sonra, seçilen makalelerde makine öğrenmesi veya derin öğrenme gibi yapay zekâ tekniklerinin kullanılıp kullanılmadığı sorgulanmıştır. Bu kriterlere sahip 22'si meme kanseri ve 8'i akciğer kanseri olmak üzere toplam 30 makale analiz edilmiştir.

2.3. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

2.3.1. Lojistik Regresyon

Verileri sınıflandırmak amacıyla kullanılan lojistik regresyon, istatistik ve makine öğrenimi alanlarında basitliği ve yorumlanabilirliği ile öne çıkan bir algoritmadır. Özellikle ikili sınıflandırma problemlerinde kullanılır. Algoritma, veri noktalarının belirli bir kategoriye ait olma olasılığını tahmin etmek için kullanılır. Lojistik regresyon algoritması, ağırlıklar ve özellikler arasındaki ilişkiyi ifade eden bir model oluşturur. Bu model, girdi özelliklerinin ağırlıklı toplamını alır ve ardından bir aktivasyon fonksiyonu olarak "sigmoid" adı verilen bir fonksiyondan geçirir. Sigmoid fonksiyonu, sonucu bir olasılık değeri olarak temsil etmek üzere 0 ile 1 arasında dönüştürür.

2.3.2. Destek Vektör Makinesi

Makine öğrenimi alanında sıklıkla kullanılan Destek Vektör Makinesi, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde etkin bir performans sergiler. Veri noktaları arasında en iyi ayrımı sağlayacak bir karar sınırı oluşturarak farklı sınıfları belirler. Bu sınıflandırma sürecinde, destek vektörleri kullanarak sınıflar arası marjı maksimize etmeyi hedefler. Lineer veya non-lineer veri setlerinde etkili olarak kullanılabilmektedir.

2.3.3. K-En Yakın Komşu Algoritması

Sınıflandırma ve regresyon problemlerinde K-En Yakın Komşu algoritması, yaygın bir şekilde kullanılan bir makine öğrenimi yaklaşımıdır. Bu algoritma, yeni bir veri noktasının sınıflandırma veya tahminini yaparken, ona en yakın olan "k" adet komşusunun bilgisine dayanır. Sınıflandırma için, komşuların etiketleri kullanılarak çoğunluk oyu yöntemiyle sınıf belirlenir. Regresyon problemlerinde ise komşuların değerleri, ortalaması veya ağırlıklı ortalaması gibi yöntemler kullanılarak yeni veri noktasının tahmini değeri hesaplanır.

2.3.4. Naive Bayes

Naive Bayes, sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak tercih edilen bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Bu algoritma, veri noktalarını belirli sınıflara atamak için olasılık tabanlı bir yaklaşım kullanır. Temelde Bayes teoremi esasına dayanır ve özellikler arasındaki bağımsızlık varsayımını temel alır. Eğitim aşamasında, veri setindeki özelliklerin ve sınıfların olasılıklarını hesaplar. Ardından, yeni bir veri noktasını sınıflandırmak için bu olasılıkları kullanır.

2.3.5. Rastgele Orman

Rastgele Orman, makine öğrenimi alanında sınıflandırma ve regresyon problemlerine yönelik bir topluluk öğrenme metodudur. Temel amacı, birçok karar ağacının bir araya getirilmesiyle daha güçlü ve kararlı bir model oluşturmaktır. Rastgele Orman, farklı özelliklere dayalı çok sayıda karar ağacı oluşturur. Her karar ağacı rastgele seçilen özelliklerle ve farklı veri alt kümeleri üzerinde eğitilir. Bu durum her bir ağacın diğerlerinden farklı olmasını sağlar. Yeni bir veri noktasının tahmini yapılırken, her ağaçtan gelen sonuçların ortalaması (sınıflandırma için) veya toplamı (regresyon için) alınarak bir tahmin oluşturulur.

2.4. Derin Öğrenme Algoritmaları

2.4.1. ResNet

Derin öğrenme alanında kullanılan ResNet adı verilen sinir ağı mimarisi, ağın daha derin olmasının getirdiği olumsuz etkileri azaltmak için geliştirilmiştir. Geleneksel olarak, ağların derinleşmesi eğitim sırasında performans kaybına veya aşırı öğrenme sorunlarına yol açabilmektedir. Bu durumlar, derin ağların eğitimini zorlaştırabilmektedir. ResNet, bu tür sorunları aşmak için "kalıntı öğrenme" adı

verilen bir teknik kullanır. Bu teknik, ağın katmanları arasında doğrudan bağlantılar ekleyerek, atlamalı bağlantılar adı verilen özel bir yapı oluşturur. Bu yapı, daha derin ağların eğitiminde oluşabilecek gradient kaybını azaltır ve ağın daha verimli öğrenmesini sağlar. Bu sayede, ResNet mimarisi daha derin ve etkili sinir ağı modellerinin geliştirilmesinde önemli bir adımı temsil eder.

ResNet ailesinin versiyonları, katman sayılarına ve karmaşıklıklarına göre farklılaşır. ResNet-18 ve ResNet-34, sırasıyla 18 ve 34 katmandan oluşur; daha hafif ve daha küçük boyutludur, ancak yine de etkili sonuçlar verir. ResNet-50, ResNet-101, ResNet-152 ve ResNet-110 ise daha büyük derinliklere sahiptir; bu modeller daha karmaşık öğrenme problemleri için uygundur. ResNet-164 ve ResNet-1202 ise daha da derin yapıdadır. Her bir model, özel blok yapıları ve atlamalı bağlantılar gibi tekniklerle ağın derinleşmesine olanak tanıyan farklı özellikler sunar.

ResNetV2, ResNet'in geliştirilmiş bir versiyonudur; önceki sürümlerdeki yapısal sorunları düzeltir, daha iyi eğitim stabilitesi sağlar ve daha düşük hesaplama maliyeti sunar. Wide ResNet, daha geniş bir yapıya sahiptir ve her katmandaki kanal sayısını artırarak daha fazla öğrenme kapasitesi sağlar. ResNeXt, paralel işleme gücünü artırmak için birden çok paralel yol kullanır ve daha fazla esneklik sunar. Pre-activated ResNet (PreResNet), normalleştirme ve aktivasyon katmanlarının konvolüsyon katmanlarından önce yer aldığı bir yapıya sahiptir; bu yapı, daha stabil eğitim davranışı sergileyebilmektedir.

2.4.2. EfficientNet

EfficientNet, Google Brain tarafından geliştirilen ve ölçeklenebilirlik, performans ve verimlilik açısından optimize edilmiş bir evrişimli sinir ağı (CNN) mimarisidir. EfficientNet, özellikle görüntü sınıflandırma ve bilgisayarlı görü üzerine çalışan bir derin öğrenme modelidir. Bu mimari, 'bileşik ölçeklendirme' adı verilen bir strateji kullanarak ağın derinliğini, genişliğini ve derinlik/çözünürlük boyutlarını aynı anda ölçeklendirir. Yani, daha derin, daha geniş ve daha yüksek çözünürlüklü modeller oluştururken hesaplama maliyetini minimize eder. Bu sayede, daha az parametre kullanarak daha iyi performans elde etmeyi amaçlar.

EfficientNet, çeşitli varyasyonlardan oluşan ölçeklenebilir bir evrişimli sinir ağı mimarisidir. EfficientNet'in temel varyasyonları B0'dan B7'ye kadar sıralanır. B0, en hafif ve en küçük boyutlu modelken, B7 en büyük ve karmaşık olanıdır. EfficientNet-EdgeTPU, yerel cihazlarda hızlı ve verimli çalışma sağlayan bir versiyon olarak öne çıkar. Mobil cihazlar için tasarlanan EfficientNet-Lite varyasyonları daha küçük boyutta ve düşük hesaplama maliyetiyle çalışırken, EfficientNetV2 ilk versiyonun geliştirilmiş bir şeklidir ve daha iyi eğitim stabilitesi ile daha düşük hesaplama maliyeti sunar.

2.4.3. VGG

Visual Geometry Group (VGG), Oxford Üniversitesi'nde bulunan bir araştırma grubunun geliştirdiği derin evrişimli sinir ağı (CNN) mimarisidir. VGG'nin temel özelliği, öğrenme ve anlama sürecindeki

derinliği artırmak için birbirini takip eden çok sayıda konvolüsyonel katmanın kullanılmasıdır. Bu mimari, basit ve tekrarlanabilir bir yapıya sahiptir. Özellikle 3x3 boyutundaki küçük filtrelerin yoğun bir şekilde kullanılması VGG'nin önemli bir özelliğidir.

VGG'nin farklı varyasyonları, VGG-16 ve VGG-19 gibi "VGG" adının ardından katman sayısını belirten bir numara ile adlandırılır. VGG-16, toplamda 16 katmandan oluşurken, bunların çoğunluğunu evrişim katmanları oluşturur ve ardından tam bağlantılı katmanlar gelir. VGG-19 ise 19 katmandan oluşur ve VGG-16'dan farklı olarak daha fazla evrişim ve tam bağlantılı katmana sahiptir. VGG'nin tekrarlanan ve sıralı katman yapısı, anlam çıkarma yeteneğini artırırken daha derin bir ağ yapısı sağlar.

2.4.4. Inception

Inception, Google tarafından geliştirilen ve derin öğrenme alanında etkili olan bir sinir ağı mimarisidir. Inception mimarisi, paralel evrişim katmanlarının farklı boyutlarda filtrelerle çalıştığı ve bu katmanların çıktılarının birleştirilerek kullanıldığı bir yapıya sahiptir. Bu yaklaşım, ağı daha etkili hale getirirken hesaplama maliyetini azaltmaya yöneliktir.

Inception mimarisi, çeşitli versiyonlara ayrılmıştır. İlk versiyon olan Inception v1, karmaşık yapıları basit evrişim katmanları ve paralel bağlantılarla ele alarak dikkat çeker. Bu versiyon, daha derin ağlara kıyasla daha hafif ve etkili olarak bilinir. Ardışık versiyonlar olan Inception v2 ve v3, özellikle daha küçük filtreler ve daha derin evrişim katmanlarıyla orijinal mimariyi geliştirir ve iyileştirmeler getirir. Inception v4 ise daha da derinleştirilmiş ve optimize edilmiş bir yapı sunar, özellikle karmaşık bağlantılar, daha fazla evrişim katmanı ve etkili ölçeklenebilirlik gibi özellikleri vurgular.

2.4.5. CNN

Evrişimli Sinir Ağı (CNN veya Convolutional Neural Network), görüntü tanıma, nesne algılama ve diğer görsel analiz görevlerinde kullanılan bir yapay sinir ağı mimarisidir. CNN, görüntüyü farklı katmanlarda işleyerek analiz etmektedir. Bu katmanlar Evrişim Katmanı, Havuzlama Katmanı ve Tam Bağlantılı Katman olarak sıralanmaktadır. Evrişim katmanı, girdi verisinde farklı özellikleri tespit etmek ve bu özellikleri öğrenmek için kullanılır. Bu katman, filtre matrislerini kullanarak girdi verisi üzerinde gezinir ve özellik haritaları veya özellik çıktıları oluşturur. Evrişim işlemi, verinin lokal özelliklerini belirlemeye yardımcı olur.

Havuzlama katmanı, evrişim katmanının çıkışlarını alır ve boyutlarını küçültmek, hesaplama yükünü azaltmak ve özellikleri daha genelleştirmek için kullanılır. Tam bağlantılı katmanı, özellik haritalarını düzleştirerek bir vektör haline getirir ve geleneksel yapay sinir ağları gibi çalışır. Bu katman, düzleştirilmiş girişi alır ve sınıflandırma, regresyon veya diğer çıktıları üretmek için kullanır. Ağın sonuçlarını üreterek istenen çıktıları elde etmemizi sağlar.

3. Bulgular ve Tartışma

Tablo 1'de akciğer kanseri ve Tablo 2'de meme kanseri için her bir çalışma kapsamında kanser türü, kullanılan algoritmalar, veri seti ve veri türü derlenip tablolaştırılmıştır. İncelenen çalışmalardaki modellerin başarımı, doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (sensitivity), özgüllük (specificity), F-puanı ve AUC (ROC eğrisinin altındaki alan) metrikleri ile Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 1. Akciğer kanseri kapsamında incelenen çalışmaların özeti

Referans	Kanser Türü	Algoritmalar	Veri Seti	Veri Türü
(Dirik, 2023)	Akciğer Kanseri	Naive Bayes Lojistik Regresyon Karar Ağacı Rastgele Orman Gradient Boosting Destek Vektör Makinesi	309 kişinin yanıtlarından oluşan akciğer kanseri anketi	Yapılandırılmış Anket Verisi
(Alomar ve ark., 2023)	Akciğer Kanseri	ResNet-50 InceptionV3	Kaggle üzerinden elde edilen Akciğer BT görüntüleri	Görüntü Verisi
(Subramanian ve ark., 2020)	Akciğer Kanseri	AlexNet + SVM AlexNet + Deep kNN AlexNet Model + softmax	100 görüntü (50 kanserli, 50 normal) veri artırımı teknikleri kullanılarak genişletilmiştir.	Görüntü Verisi
(Bouamrane ve Derdour, 2023)	Akciğer Kanseri	K-En Yakın Komşu Destek Vektör Makinesi Wide-Resnet-50-2-weight Karar Ağacı Rastgele Orman VGG-19 EfficientNetV2-L EfficientNet-B7	LIDC-IDRI veri seti	Görüntü Verisi
(Aziz ve ark., 2023)	Akciğer Kanseri	Yapay Sinir Ağları Destek Vektör Makinesi K-En Yakın Komşu Naive Bayes	LIDC-IDRI veri seti	Görüntü Verisi
(Lathakumari ve ark., 2023)	Akciğer Kanseri	EfficientNetB2	1000 akciğer BT görüntüsü (Eğitim 613 görüntü, Test 72 görüntü, Doğrulama 315 görüntü)	Görüntü Verisi
(Mohalder ve ark., 2021)	Akciğer Kanseri	CatBoost Karar Ağacı Lojistik Regresyon Doğrusal Diskriminant	LC25000 veri seti	Görüntü Verisi

		Analizi		
(Peng ve Wu, 2023)	Akciğer Kanseri	AlexNet	LC25000 dataset	Görüntü Verisi

Tablo 2. Meme kanseri kapsamında incelenen çalışmaların özeti

Referans	Kanser Türü	Algoritmalar	Veri Seti	Veri Türü
(Allugunti, 2022)	Meme Kanseri	CNN Destek Vektör Makinesi Rastgele Orman	150'den fazla hastaya ait, meme kanseri olan veya olmayan toplamda 1000'den fazla görüntü	Görüntü Verisi
(Iqbal ve ark., 2020)	Meme Kanseri	K-En Yakın Komşu Çok Katmanlı Algılayıcı Destek Vektör Makinesi Rastgele Orman	Wisconsin Breast Cancer veri seti	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Kadhim ve Kamil, 2023)	Meme Kanseri	Doğrusal Diskriminant Analizi Karar Ağacı Rastgele Orman Gradient Boosting Passive Aggressive Lojistik Regresyon Naive Bayes Nearest Centroid Destek Vektör Makinesi Perceptron	Wisconsin Breast Cancer veri seti (Diagnostic)	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Lee ve Sun, 2022)	Meme Kanseri	K-En Yakın Komşu Yapay Sinir Ağları Lojistik Regresyon	Wisconsin Breast Cancer veri seti	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Naji ve ark., 2021)	Meme Kanseri	Destek Vektör Makinesi Rastgele Orman Lojistik Regresyon Karar Ağacı K-En Yakın Komşu	Wisconsin Breast Cancer veri seti (Diagnostic)	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Zhou, 2022)	Meme Kanseri	Lojistik Regresyon	Wisconsin Breast Cancer veri seti (Diagnostic)	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Akbar ve ark., 2023)	Meme Kanseri	CNN DenseNet121 EfficientNetV2	BreakHis veri seti	Görüntü Verisi
(Altan, 2020)	Meme Kanseri	CNN	DDSM veri seti	Görüntü Verisi
(Das ve ark., 2023)	Meme Kanseri	Destek Vektör Makinesi Rastgele Orman Karar Ağacı Lojistik Regresyon	Wisconsin Breast Cancer veri seti (Diagnostic)	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Ak, 2020)	Meme Kanseri	Lojistik Regresyon K-en yakın komşu Destek Vektör	Wisconsin Breast Cancer veri seti	Yapılandırılmış Veri (Numerik)

		Makinesi Naive Bayes Karar Ağacı Rastgele Orman Rotation Forest		
(Benhassine ve ark., 2020)	Meme Kanseri	Destek Vektör Makinesi Yapay Sinir Ağları Rastgele Orman Naive Bayes	Mammographic Image Analysis Society	Görüntü Verisi
(Mahmud ve ark., 2023)	Meme Kanseri	ResNet-50 ResNet-101 VGG-16 VGG-19	2453 Histopatoloji Görüntüsü (Kaggle)	Görüntü Verisi
(Salama ve Aly, 2021)	Meme Kanseri	InceptionV3 DenseNet-121 ResNet-50 VGG-16 MobileNetV2	DDSM veri seti	Görüntü Verisi
(Manjunathan ve ark., 2023)	Meme Kanseri	Rastgele Orman Karar Ağacı Lojistik Regresyon	Wisconsin Breast Cancer veri seti (Diagnostic)	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Mishra ve Agarwal, 2022)	Meme Kanseri	Destek Vektör Makinesi Naive Bayes Lojistik Regresyon K-En Yakın Komşu	Wisconsin Breast Cancer veri seti (Diagnostic)	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Mahoro ve Akhloufi, 2024)	Meme Kanseri	EfficientNet-B7 ResNet-50 VGG-16 DenseNet-201	DMR-IR veri seti	Görüntü Verisi
(Akash, 2024)	Meme Kanseri	Lojistik Regresyon K-en yakın komşu Rastgele Orman Karar Ağacı XGBoost	Meme biyopsi örnekleri	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Promtan ve ark., 2023)	Meme Kanseri	Karar Ağacı K-En Yakın Komşu Lojistik Regresyon Naive Bayes	Wisconsin Breast Cancer veri seti (Diagnostic)	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Telsang ve Hegde, 2020)	Meme Kanseri	Naive Bayes Rastgele Orman Lojistik Regresyon Destek Vektör Makinesi K-En Yakın Komşu	Wisconsin Breast Cancer veri seti	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Thabit, 2023)	Meme Kanseri	Naive Bayes K-En Yakın Komşu Rastgele Orman Karar Ağacı Lojistik Regresyon Destek Vektör Makinesi	Wisconsin Breast Cancer veri seti (Diagnostic)	Yapılandırılmış Veri (Numerik)
(Mangukiya ve ark., 2022)	Meme Kanseri	Destek Vektör Makinesi Karar Ağacı Naive Bayes K En Yakın Komşu Adaboost XGboost	Wisconsin Breast Cancer veri seti	Yapılandırılmış Veri (Numerik)

		Rastgele Orman		
(Sayın ve ark., 2023)	Meme Kanseri	VGG ResNet Xception Inception InceptionResNet	BreakHis veri seti	Görüntü Verisi

Tablo 3. İncelenen çalışmaların performans göstergeleri

Referans	Algoritma	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	Özgüllük	F-puanı	AUC
(Dirik, 2023)	Naive Bayes	%91	%92	%97	-	-	%67,2
	Destek Vektör Makinesi	%91	%96	%94	-	-	%44,4
(Alomar ve ark., 2023)	ResNet50	%100	-	-	-	-	-
(Subramanian ve ark., 2020)	AlexNet Model + softmax	%99,52	%99,20	%88,26	-	%93,41	-
(Bouamrane ve Derdour, 2023)	VGG-19	%99,71	%99,96	-	%99,96	-	%99,97
(Aziz ve ark., 2023)	K-En Yakın Komşu	%98,5	-	-	-	-	-
(Lathakumari ve ark., 2023)	EfficientNetB2	%83	-	-	-	-	-
(Mohalder ve ark., 2021)	CatBoost	%99,8	%100	%100	-	%100	-
(Peng ve Wu, 2023)	AlexNet	%99,46	-	-	-	-	-
(Allugunti, 2022)	CNN	%99,67	-	-	-	-	-
(Iqbal ve ark., 2020)	Rastgele Orman	%99,26	%98,99	%100	-	%99,44	-
(Kadhim ve Kamil, 2023)	Gradient Boosting	%97,36	%97,82	%95,74	%98,5	%96,77	-
(Lee ve Sun, 2022)	Yapay Sinir Ağları	%96	-	-	-	-	-
(Naji ve ark.,2021)	Destek Vektör Makinesi	%97,2	%98	%94	-	%96	%96,6
(Zhou, 2022)	Lojistik Regresyon	Model_1: %96,5 Model_2: %93,6	-	-	-	-	-
(Akbar ve ark., 2023)	EfficientNetV2	%98	-	-	-	-	-
(Altan, 2020)	CNN	%92,84	-	%95,30	%96,72	-	-

(Das ve ark., 2023)	Destek Vektör Makinesi	%97,37	%97,62	%95,35	-	-	-
(Ak, 2020)	Lojistik Regresyon	%98,1	-	-	-	-	-
(Benhassine ve ark., 2020)	Destek Vektör Makinesi	%99,41	-	-	-	-	-
(Mahmud ve ark., 2023)	ResNet50	%90,2	-	%94,7	-	-	%90
(Salama ve Aly, 2021)	U-Net + Inception-V3	%98,87	%98,79	%98,98	-	%97,99	%98,88
(Manjunathan ve ark., 2023)	Rastgele Orman	%96,5	%97	%97	-	%97	-
(Mishra ve Agarwal, 2022)	Destek Vektör Makinesi	%98	%99	%97	%98	%98	-
(Mahoro ve Akhloufi, 2024)	ResNet-50	%97,26	-	%97,26	%96,94	-	-
(Akash, 2024)	Lojistik Regresyon	%98,25	-	-	-	-	-
(Promtan ve ark., 2023)	Naive Bayes	%93	%90	%91	-	%90	-
(Telsang ve Hegde, 2020)	Destek Vektör Makinesi	%96,25	%100	%88	-	%94	%99,4
(Thabit, 2023)	Destek Vektör Makinesi	%99,1	-	-	-	-	-
(Mangukiya ve ark., 2022)	XGboost	%98,24	-	-	-	-	-
(Sayın ve ark., 2023)	Xception	%89	%90	%90	-	%90	-

Tablo 1, akciğer kanseri teşhisinde; Tablo 2 ise meme kanseri teşhisinde çeşitli algoritmaların etkili kullanımını araştıran önemli çalışmaları içermektedir. Tablo 3'te belirtilen performans değerleri, yapay zekâ modellerinin kanser teşhisinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

3.1. Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Zaman Karmaşıklığı Analizi

Zaman karmaşıklığı, bir algoritmanın çalışması için gereken zamanın, girdi boyutuna bağlı olarak gösterdiği performansın bir ölçüsüdür. Big O notasyonu ise zaman karmaşıklığını analiz etmek amacıyla kullanılan matematiksel dili ifade etmektedir. Tablo 4, eğitim zaman karmaşıklığı temel alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 4. Makine Öğrenmesi Algoritmaları Zaman Karmaşıklığı Tablosu

Algoritma	Zaman Karmaşıklığı
Destek Vektör Makinesi	$O(n^2 \times d)$ ile $O(n^3)$
Naive Bayes	$O(n \times d \times c)$
Lojistik Regresyon	$O(n \times d)$
Karar Ağacı	$O(n \times d \times \log n)$
K-En Yakın Komşu	$O(1)$
Gradient Boosting	$O(M \times n \times \log n \times d)$
Rastgele Orman	$O(M \times n \times \log n \times d)$
Perceptron	$O(n \times d \times k)$
Doğrusal Diskriminant Analizi	$O(n \times d \times t + t^3)$
Passive Aggressive	$O(n \times d \times k)$
Nearest Centroid	$O(n \times d)$
CatBoost	$O(M \times n \times \log n \times d)$
AdaBoost	$O(M \times n \times d)$
XGBoost	$O(M \times n \times \log n \times d)$
Döndürme Ormanı (Rotation Forest)	$O(M \times (n \times d^2 + d^3))$

n: eğitim örnek sayısı, d: özellik (feature) sayısı, k: iterasyon sayısı, c: Sınıf sayısı, M: ağaç sayısı (ensemble içindeki model sayısı), t: min(n,d) en küçük boyut (matris işlemleri için sınır)

3.2. Derin Öğrenme Algoritmalarının Zaman Karmaşıklığı Analizi

Derin öğrenme modellerinin zaman karmaşıklığını kesin bir formda belirtmek mümkün değildir. Bu modellerin çalışma süreleri birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Modellerin çok katmanlı yapıya sahip olmaları, kullanılan donanımın özellikleri, girdi boyutu ve parametrelerin değişkenliği gibi birçok etken Big O gösteriminin kesin sonuç vermesini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla Tablo 5'te sunulan değerler sabit bir giriş boyutu (224×224×3) baz alınarak hesaplanan FLOPs(Floating Point Operations - Kayan Nokta İşlemleri) değerlerinden türetilmiş yaklaşık temsilleri ifade etmektedir. FLOPs bir modelin hesaplama karmaşıklığını ve işlem yükünü analiz etmekte kullanılır özetle modelin teorik işlem miktarını belirtmektedir.

Tablo 5. Derin Öğrenme Modelleri Yaklaşık Zaman Karmaşıklığı Tablosu

Model	Yaklaşık Zaman Karmaşıklığı
ResNet-50	O(n × 25e9)
ResNet-101	O(n × 44e9)
InceptionV3	O(n × 5.7e9)
Inception	O(n × 5.0e9)
VGG-19	O(n × 19.6e9)
VGG-16	O(n × 15.3e9)
EfficientNet-B7	O(n × 37e9)
EfficientNet-B2	O(n × 1.0e9)
EfficientNetV2	O(n × 24e9)
EfficientNetV2-L	O(n × 55e9)
MobileNetV2	O(n × 0.3e9)
DenseNet-121	O(n × 2.9e9)
DenseNet-201	O(n × 4.3e9)
AlexNet	O(n × 0.7e9)
Xception	O(n × 8.4e9)
AlexNet + SVM	O(n × 0.7e9)
AlexNet + Softmax	O(n × 0.7e9)
AlexNet + Deep kNN	O(n × 0.8e9)

3.3. Algoritma Performanslarının Veri Türüne Bağlı Olarak Değerlendirilmesi

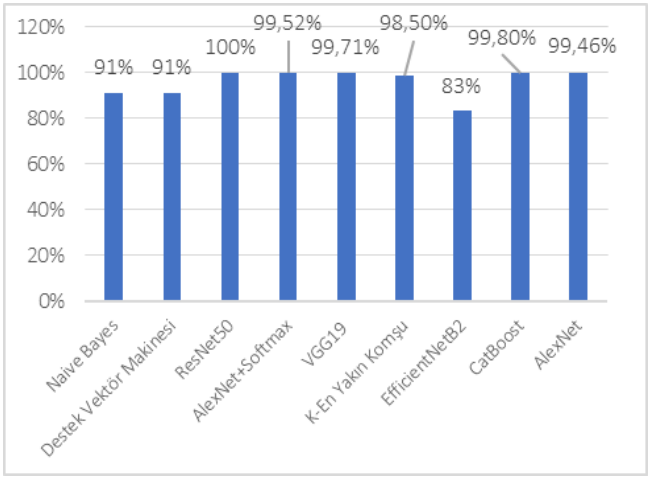
İncelenen çalışmalarda kullanılan veri türleri, göre Tablo 1 ve Tablo 2'de Veri Türü başlığı altında sunulmuştur. Bu bağlamda, yapılandırılmış veri ve görüntü veri türleri algoritma performanslarına göre analiz edilmiş; her iki veri türü için de doğruluk değeri en yüksek ilk 5 algoritma belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 6 ve Tablo 7'de belirtilmiştir.

Tablo 6. Görüntü Verisi İçin En Başarılı İlk 5 Algoritma

Algoritma	Başarı (%)
ResNet-50	100
CatBoost	99,8
VGG-19	99,71
CNN	99,67
AlexNet + Softmax	99,52

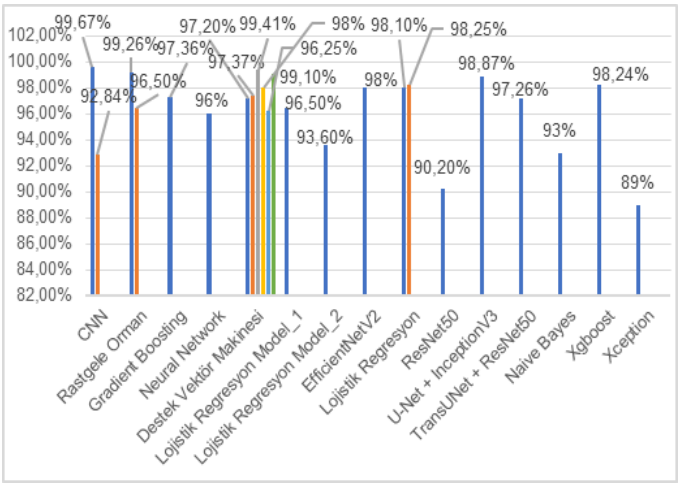
Tablo 7. Yapılandırılmış Veri İçin En Başarılı İlk 5 Algoritma

Algoritma	Başarı (%)
Destek Vektör Makinesi (Thabit, 2023)	99,1
Rastgele Orman	99,26
Lojistik Regresyon	98,25
XGBoost	98,24
Destek Vektör Makinesi (Mishra ve Agarwal, 2022)	98



Şekil 2. Akciğer kanseri için doğruluk değerlerinin grafik üzerinde gösterimi

Şekil 2 'deki grafikte, çeşitli yapay zekâ modellerinin, akciğer kanseri vakalarını doğru bir şekilde teşhis etme oranları gösterilmektedir. İncelenen çalışmalarda elde edilen bulgular ışığında, akciğer kanseri tanısında en başarılı yapay zekâ modeli %100 doğruluk oranıyla vakaların tümünü doğru bir şekilde teşhis eden ResNet50 modelidir. ResNet50 modelini takip eden, %99,80 doğruluk oranıyla CatBoost ve %99,71 doğruluk oranıyla VGG19 modeli olarak belirtilmektedir. İncelenen birçok yapay zekâ modelinin akciğer kanseri teşhisi konusunda yüksek başarı sağladığı görülmektedir.



Şekil 3. Meme kanseri için doğruluk değerlerinin grafik üzerinde gösterimi

Şekil 3'deki grafikte farklı yapay zekâ modellerinin, meme kanseri vakalarını tespit etmedeki başarı oranları sergilenmektedir. Yapılan analizler sonucunda, incelenen yapay zekâ modelleri arasında en yüksek başarı oranını %99,67 ile CNN modeli göstermiştir. Bu başarıyı %99,41 ile Destek Vektör Makinesi ve %99,26 ile Rastgele Orman modeli takip etmektedir. Araştırma kapsamı dahilinde ele alınan çalışmaların büyük bir çoğunluğu grafiklerle desteklenen verilere dayanarak yapay zekâ modellerinin meme kanseri tanısındaki potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

3.4. LLM

LLM, geniş ölçekli bir dil yelpazesine sahip olacak şekilde eğitilmiş bir yapay zekâ modelidir. Büyük ölçekli sinir ağları tarafından desteklenen bu modeller; metin tabanlı verileri anlamlandırma, metin oluşturma, metin özetleme, soru-cevap sistemleri, çeviri ve önerilerde bulunma gibi çeşitli özelliklere sahiptir. Tıp da dahil olmak üzere birçok endüstride yeni olanaklar yaratma potansiyeline sahip olan LLM'in kanser alanında da kullanılabilecek çok yönlü yetenekleri mevcuttur (Naik ve ark., 2024).

Onkoloji literatüründeki güncel çalışmalardan bilgi elde edilebileceği ve bu bilgiler doğrultusunda sağlık profesyonellerine güncel bulgular hakkında bilgi sağlayabilme potansiyeline sahiptir. Hem hasta hem sağlık profesyonellerinin yararlanabileceği bir soru-cevap platformu oluşturulup ilgili rahatsızlığa yönelik semptomlar veya tedavi seçenekleri hakkında bilgi edinilebileceği öngörülmektedir. Büyük ölçekli veri seti analizi ile kanser riskini artırıp azaltan faktörlerin belirlenebileceği, belirli bir kanser türünün zaman içindeki değişiminin incelenebileceği ve bu sayede kanserle mücadele stratejisinde olumlu gelişmelerin izlenmesine katkıda bulunabilir.

3.5 LVM

LVM'ler, görsel verilerden anlamlı bilgi çıkarma konusunda uzmanlaşmış derin öğrenme modelleridir. Büyük miktardaki parametreleri ve hiyerarşik özellik çıkarma yetenekleri sayesinde, geniş ölçekli veri setlerindeki karmaşık görsel özellikleri tanıyarak bilgisayarla görü alanında önemli gelişmeler sağlamaktadır. LVM'ler kapsamlı bir eğitim aşamasından geçmektedir. Eğitim sürecinde özellikle

görüntü tanıma problemlerinde yüksek performans gösteren Evrişimsel Sinir Ağları kullanılır bununla birlikte LVM'ler kademeli olarak özellik çıkaran çok sayıda katmana sahiptir. Etiketli görüntülerden oluşan kapsamlı veri setleri ile beslenen model, çeşitli görsel işlevlerde verimli olarak kullanır hale gelmektedir. Tarımdan eğlence sektörüne kadar geniş iş sahaları üzerinde etkinlik gösteren LVM'lerin tıp alanında kullanımı da oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Onkoloji için çeşitli kullanım alanlarına sahip olan LVM'lerin BT taramalarını, MR görüntülerini ve diğer tıbbi görüntüleri analiz etmesi ile kanserli lezyon teşhisinin ve yayılma derecesinin saptanması mümkündür. LVM'ler ile patolojik histoloji örneklerini ele almak sadece kanser değil çeşitli hastalıkların doku ve hücrelerde oluşturduğu değişimlerin tespiti için de büyük önem taşımaktadır. Değişimlerin zaman içinde gözlemlenmesi ile de hastalık progresyonunun takibinin yapılabileceği düşünülmektedir. LVM'ler aracılığıyla kanserin nedeni ve gelişimi genetik ve klinik veriler ile ele alınabilir ve olası biyobelirteçler belirlenerek tedavi yöntemlerinin planlanma süreci için optimizasyon sağlanabileceği öngörülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada akciğer ve meme kanseri teşhisi için derin öğrenme ve makine öğrenimi temelli algoritmaların performanslarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. İncelenen çalışmaların özetlenmesiyle birlikte, yapay zekâ modellerinin kullanımında belirgin bir çeşitlilik gözlemlenmektedir; bazı modeller yaygın olarak kullanılırken diğerleri daha az rağbet görmekte ve düşük oranlarda kullanılmaktadır.

Akciğer kanseri teşhisi bağlamında incelenen sekiz çalışmada elde edilen doğruluk oranı %83 ile %100 arasında seyretmektedir. Bu kapsamda ele alınan çalışmalarda yirmi iki farklı yapay zekâ modeli kullanılmaktadır. En yüksek başarı oranına ResNet-50 modeli ile ulaşılırken, en düşük başarı oranına sahip model EfficientNetB2 olarak gözlemlenmektedir.

Meme kanseri teşhisi açısından ise araştırmaya dahil edilen yirmi iki çalışmanın doğruluk oranı %89 ile %99,67 arasında değişmektedir. Meme kanseri teşhisi için dikkate alınan çalışmalarda otuz farklı yapay zekâ modeli kullanıldığı belirlenmiştir. En yüksek başarı oranına sahip model CNN iken en düşük başarıya sahip model Xception olarak gözlemlenmektedir.

Literatür taramasının ardından gerçekleştirilen LLM'ler ve LVM'lerin onkoloji alanında kullanımı incelenmiş ve mevcut bilgilerin analiz edilmesi ile bu modellerin onkoloji alanında etkili bir şekilde kullanılabileceği konusunda çeşitli önerilerde bulunulmuş aydınlatıcı bir perspektif sunulmuştur.

Sonuç olarak bu çalışma yapay zekâ modellerinin tıbbi teşhis süreçlerine entegrasyonunu akciğer ve meme kanseri teşhisi üzerinden ele alıp bu süreçlerdeki etkinliğinin durumunu değerlendirmektedir. Bununla birlikte LLM'ler ve LVM'ler üzerine yapılan inceleme ile gelecekteki araştırmalar için yol gösterici bir çerçeve sunulması amaçlanmıştır. Modellerin klinik uygulamalarda kullanımının yaygınlaştırılması için daha fazla validasyon çalışmasına ihtiyaç duyulduğu düşünülmektedir. İlgili teknolojilerin kullanımlarının artması ile birlikte daha başarılı analiz yeteneğinin oluşacağı ve bu

sayede yeni tedavi stratejilerinin gelişebileceği ve teşhis süreçlerinde iyileştirmelerin gerçekleşebileceği sonucuna varılmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamıştır.

Kaynakça

Akash MB. Improved breast cancer detection using machine learning. International Journal of Scientific Research in Engineering and Management 2024; 8(5): 1-5.

Ak MFA comparative analysis of breast cancer detection and diagnosis using data visualization and machine learning applications. Healthcare 2020; 8(2): 111.

Akbar W., Soomro A., Ghanghro SA., Haq MIU., Ullah M. Performance evaluation of deep learning models for breast cancer classification. 2023 IEEE International Conference on Emerging Trends in Engineering, Sciences and Technology (ICES&T), 9-11 Ocak 2023, sayfa no:1-4, Bahawalpur, Pakistan.

Allugunti VR. Breast cancer detection based on thermographic images using machine learning and deep learning algorithms. International Journal of Engineering in Computer Science 2022; 4(1): 49-56.

Altan G. Deep learning-based mammogram classification for breast cancer. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering 2020; 8(3): 171-176.

Alomar A., Alazzam M., Mustafa H., Mustafa A. Lung cancer detection using deep learning and explainable methods. 2023 14th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), 21-23 Kasım 2023, sayfa no:1-4, Irbid, Ürdün.

Benhassine NE., Boukaache A., Boudjehem D. A new CAD system for breast cancer classification using discrimination power analysis of wavelet coefficients and support vector machine. Journal of Mechanics in Medicine and Biology 2020; 20(06): 2050036.

Bouamrane A., Derdour M. Enhancing lung cancer detection and classification using machine learning and deep learning techniques: A comparative study. 2023 International Conference on Networking and Advanced Systems (ICNAS), 21-23 Ekim 2023, sayfa no:1-6, Cezayir.

Çifçi M. Derin öğrenme metodu kullanarak BT görüntülerinden akciğer kanseri teşhisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 2022; 24(71): 487-500.

Das N., Borah J., Sarmah K. Diagnosis and classification of breast cancer using multiple machine learning algorithms. 2023 International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT), 5-6 Mayıs 2023, sayfa no:221-226, Gharuan, Hindistan.

Dirik M. Machine learning-based lung cancer diagnosis. Turkish Journal of Engineering 2023; 7(4): 322-330.

Aziz A., Hussain SK., Ramay SA., Arshad R., Niazi M., Mushtaq Z., Ibrahim U., Khan AA., Afzal MB. Machine learning approaches for early detection of lung cancer. Journal of Computing & Biomedical Informatics 2023; 6(1): 407–418.

International Agency for Research on Cancer. IARC. https://www.iarc.who.int/ (Erişim Tarihi: 29 Ağustos 2024).

Iqbal HN., Bou Nassif A., Shahin I. Classifications of breast cancer diagnosis using machine learning. International Journal of Computers 2020; 14: 86-86.

Kadhim RR., Kamil MY. Comparison of machine learning models for breast cancer diagnosis. IAES International Journal of Artificial Intelligence 2023; 12(1): 415.

Lathakumari KR., Ramachandra AC., Avanthi UC., Ronald CB., Bhavatharani T. Classification of non-small cell lung cancer using deep learning. 2023 International Conference on Applied Intelligence and Sustainable Computing (ICAISC), 16-17 Haziran 2023, sayfa no:1-5, Dharwad, Hindistan.

Lee M., Sun Z. Machine learning methods for breast cancer diagnosis. Journal of Student Research 2022; 11(3).

Mahmud MI., Mamun M., Abdelgawad A. A deep analysis of transfer learning based breast cancer detection using histopathology images. 2023 10th International Conference on Signal Processing and Integrated, 23-24 Mart 2023, sayfa no:198-204, Noida, Hindistan.

Mahoro E., Akhloufi MA. Breast cancer classification on thermograms using deep CNN and transformers. Quantitative InfraRed Thermography Journal 2024; 21(1): 30-49.

Mangukiya M., Vaghani A., Savani M. Breast cancer detection with machine learning. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology 2022; 10(2): 141-145.

Manjunathan N., Gomathi N., Muthulingam S. Early detection of breast cancer using machine learning. 2023 International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS), 14-16 Haziran 2023, sayfa no:165-169, Coimbatore, Hindistan.

Mishra S., Agarwal BM. Diagnosis and classification of cancer using machine learning techniques. 2022 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), 2-4 Aralık 2022, sayfa no:1-5, Delhi, Hindistan.

Mohalder RD., Sarkar JP., Hossain KA., Paul L., Raihan M. A deep learning based approach to predict lung cancer from histopathological images. 2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT), 14-16 Eylül 2021, sayfa no:1-4, Khulna, Bangladeş.

Naik N., Khandelwal A., Joshi M., Atre M., Wright H., Kannan K. Applying large language models for causal structure learning in non-small cell lung cancer. 2024 IEEE 12th International

Conference on Healthcare Informatics (ICHI), 3-6 Haziran 2024, sayfa no:688-693, Orlando, FL, ABD.

Naji MA., El Filali S., Aarika K., Benlahmar EH., Ait Abdelouhahid R., Debauche O. Machine learning algorithms for breast cancer prediction and diagnosis. Procedia Computer Science 2021; 191: 487-492.

Peng CC., Wu JW. Deep learning-assisted lung cancer diagnosis from histopathology images. 2023 IEEE 5th Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS), 2-4 Haziran 2023, sayfa no:17-20, Tainan, Tayvan.

Promtan S., Khongthong P., Choksuchat C. Breast cancer prediction of benign and malignant tumors by classification algorithms. 2023 4th International Conference on Big Data Analytics and Practices (IBDAP), 25-27 Ağustos 2023, sayfa no:1-6, Bangkok, Tayland.

Salama WM., Aly MH. Deep learning in mammography images segmentation and classification: Automated CNN approach. Alexandria Engineering Journal 2021; 60(5): 4701-4709.

Sayın İ., Soydaş MA., Mert YE., Yarkataş A., Ergun B., Sözen Yeh S., Üvet H. Comparative analysis of deep learning architectures for breast cancer diagnosis using the BreaKHis dataset. arXiv preprint, arXiv:2309.01007.

Subramanian RR., Mourya RN., Reddy VP., Reddy BN., Amara S. Lung cancer prediction using deep learning framework. International Journal of Control and Automation 2020; 13(3): 154-160.

Telsang VA., Hegde K. Breast cancer prediction analysis using machine learning algorithms. 2020 International Conference on Communication, Computing and Industry 4.0 (C2I4), 17-18 Aralık 2020, sayfa no:1-5, Bangalore, Hindistan.

Thabit QQ. Deep and machine learning for improving breast cancer detection. Engineering and Technology Journal 2023; 8(12): 3156-3163.

Veranyurt Ü., Deveci A., Esen MF., Veranyurt O. Makine öğrenmesi teknikleriyle hastalık sınıflandırması: Random forest, k-nearest neighbour ve adaboost algoritmaları uygulaması. Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Stratejileri Araştırma Dergisi 2020; 6(2): 275-286.

Zhou Z. Breast cancer diagnosis with machine learning. 4th International Conference on Computer Engineering, Information Science and Internet Technology (CII 2022), Highlights in Science, Engineering and Technology 2022; 9: 73-75.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2594-2616, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2594-2616, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Tekstil Bazlı ve Kompozit Yapıda Yara Örtücü Malzemeler: Bir Derleme Çalışması

Emel Ceyhun SABIR[1*]

[1]Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, 01330, Sarıçam, Adana

[1]https://orcid.org/0000-0002-2385-1524
*Sorumlu yazar: emelc@cu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 10.03.2025
Kabul tarihi:16.05.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Yara örtücüler
Medikal tekstil
Teknik tekstil
Tekstil kompozitleri

ÖZ

Bu çalışmada, medikal tekstil ve mühendislik malzemelerini içeren yara örtücü güncel kompozit malzemeler, türleri, yara iyileştirmedeki performansları geniş kapsamlı olarak araştırılmış ve karşılaştırılmalar yapılmıştır. Yara örtüsü, terim olarak tekstili çağrıştırmakla birlikte medikal tekstil kapsamında değerlendirilmesi gerekmektedir. Yara örtücüler ile yapay doku konuları çoğunluklar birbirine karıştırılmaktadır. Bu iki konu, canlı dokuların dikkate alınmasını gerektirse de birbirinden kesinlikle ayrılmalıdır. Son yıllarda yara örtüsü görevi görüp aynı zamanda dokuya entegre olabilecek ileri çalışmalara rastlanmaktadır. Yara, vücutta sağlıklı epitel doku kaybıdır ve farklı şekillerde oluşabilir. Öncelikle yara çeşitleri ve yaranın iyileşme süreci açıklanmış, yaraya uygun geliştirilen yara örtücüler birbirinden ayrılan yönleriyle birlikte ele alınmıştır. Yara örtücüler büyük ölçüde tekstil bazlıdır, ancak son yıllarda dokuyu koruyan, yarayı iyileştiren ve canlı konforunu ön planda tutan yenilikçi örtücülerin geliştirildiği görülmüş olup çalışmada bunlara yer verilmiştir. Sonuç olarak bahsedilen yara örtücüler karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir.

Textile-Based and Composite Wound Dressing Materials: A Review Study

Research Article

Article History:
Received: 10.03.2025
Accepted: 16.05.2025
Published online: 15.12.2025

Keywords:
Wound dressings
Medical textiles
Technical textile
Textile composites

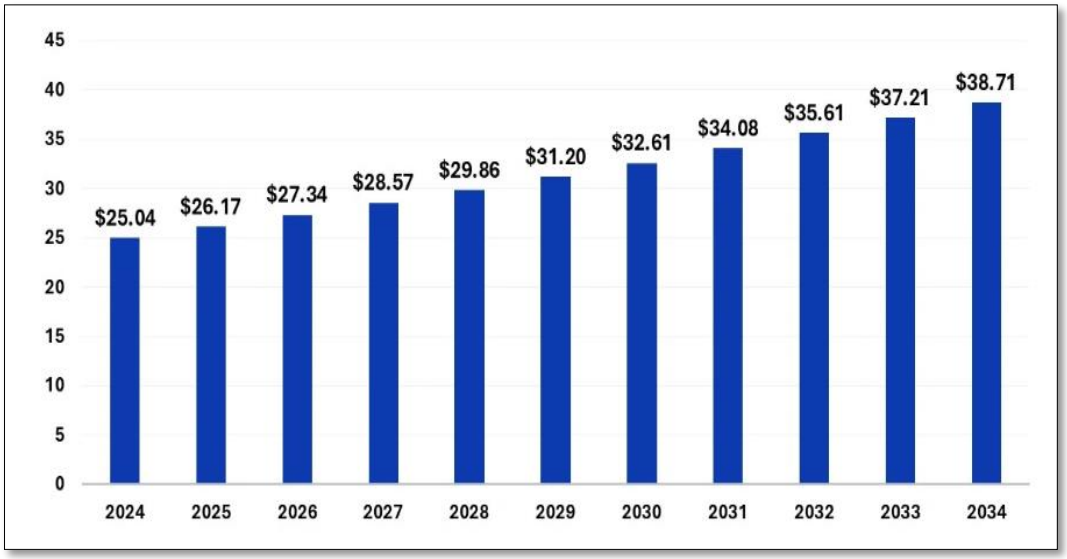
ABSTRACT

In this study, current wound dressing materials including medical textile and engineering materials; their types, wound healing performances have been extensively investigated and compared. Although the term wound dressing evokes textile, it should be evaluated within the scope of medical textile. Wound dressings and artificial tissue issues are often confused. These two issues require considering living tissues but should definitely be separated from each other. In recent years, advanced studies have been encountered that can serve as a wound dressing and at the same time integrate with the tissue. Wound is the loss of healthy epithelial tissue in the body and can occur in different ways. First of all, wound types and the healing process of the wound are explained, and wound dressings developed suitable for the wound are discussed together with their distinguishing aspects. Wound dressings are largely textile-based, but in recent years, it has been seen that innovative dressings that protect the tissue, heal the wound and prioritize living comfort have been developed and these are included in the study. As a result, the mentioned wound dressings are summarized comparatively.

To Cite: Sabır EC. Tekstil Bazlı ve Kompozit Yapıda Yara Örtücü Malzemeler: Bir Derleme Çalışması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2594-2616.

1.Giriş

Son yıllarda tekstil teknolojisindeki ve teknik tekstillerdeki yenilikler, tekstil malzemesini giyim alanı dışına taşımakta, genel olarak teknik tekstil olarak adlandırılan bir alanda şaşırtıcı uygulamalar ortaya koymaktadır. Dünya medikal tekstil sektörü pazar giderek büyümektedir. Şekil 1, 2024 yılı verilerinden yola çıkarak 2034'e kadarki öngörüyü göstermektedir. Gelecek on yılda dünya medikal tekstil pazarının 25,04 milyar $'dan 38,71 milyar $'a ilerleyeceği tahmin edilmektedir. Tıbbi tekstiller vücudun dış kısmındaki yaraların iyileşmesi için harici uygulamada geniş bir kullanıma sahiptir. Bu malzemeler, sağlık çalışanlarının hastanede hastaları tedavi ederken korunmasına yardımcı olmaktadır (Anonim, 2025).



Şekil 1. Dünya medikal tekstil pazarı (https://www.precedenceresearch.com, 2025)

Son zamanlarda tıbbi tekstiller alanında, özellikle daha küçük, daha hızlı, daha hafif ve daha verimli malzemeler kullanımı büyük araştırma konusu olmaktadır. Polimerik nanofiber ve nanopartiküller, kaplama yoluyla veya eğirme ile tekstillere farklı özellikler kazandırmak için kullanılmakta, antimikrobiyal, UV koruyucu, yara pansumanı, hemostatik aktivite ve ilaç verme gibi işlevsel özellikler kazandırılmaktadır (Tassaw ve ark., 2024). Tekstil ve hammadde sektörü, uzun yıllara dayanan üretim tecrübesi ve geniş üretim kapasitesi ile küresel tedarik zincirlerinde kritik bir konuma sahiptir (Sağlam ve Baran, 2025). Dünyanın yaşadığı küresel felaketlerde ki son felaket olan COVID-19 salgınında maske formu ile tekstilin insan sağlığını koruyan üstün bir rol üstlendiğine de şahit olunmuştur. Tekstil, sadece günlük bir ihtiyaç ürünü olmanın ötesindedir. Günümüzde gelişen teknolojilerle tekstilin insan sağlığı alanında; giyilebilir teknolojiler, ilaç salınımı, sensörler, enerji depolama, hijyen ürünleri, yapay dokular, yara örtücüler ve medikal tekstiller gibi akıllı teknoloji ürünleri olarak yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu teknolojilerde tekstil malzemesi; lifler, filament, iplik, dokuma ve örme kumaş, dokusuz yüzey, karmaşık dokuma ve kompozit tekstil gibi farklı yapılarla yer almaktadır. Tekstil

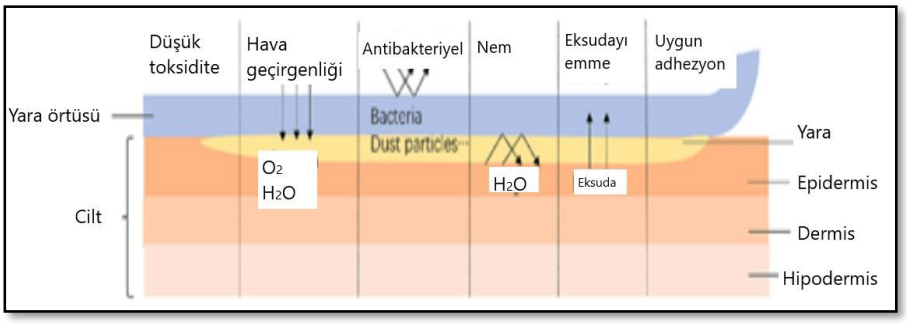
yapılarında kullanılan malzeme doğal ve yapay kaynaklı olabilir. Doğal lifler genellikle yaranın bakımı için kullanılır ki pamuk, keten ve ipek bunlara örnek verilebilir. Yapay lifler ise, polyester, poliamid, poliporopilen, poliüretan ve politetrafloraetilen şeklindedir. Diğer lifler ise doğal kaynaklı polimerlerden elde edilen alginat, protin, poliglikolik asit, rejenere selülozlar, kitin, kitosan, hyalüronik asid gibi yapılardır. Bu liflerle birlikte kullanılan ve lif olmayan karbon ve gümüş de yara örtücülerde etkili diğer malzemelerdir (Gupta ve ark., 2010). Tıbbi amaçla kullanılan tekstil üretimi, farklı form ve malzemeler ile gerçekleştirilir. Bununla birlikte bu ürünler farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir (Ersoy ve ark., 2015; Joshi ve Purwar, 2019).

Yara örtücüler, pek çok araştırmacının üzerinde çalıştığı oldukça karmaşık bir alandır. Yara tedavisinde yara örtüleri (wound dressing), zarar gören doku ve hücreleri dışarıdan gelecek etkenlere karşı koruyan, hücre üretimini başlatarak iyileşme sürecini güvenli şekilde sürdürülmesini sağlayan büyük öneme sahip araçlardır. Yara örtüsü en temel fonksiyon olarak, epitel hücre hareketlerine izin vererek nemli ve ılık bir ortam, hava alışverişi ve antibakteriyel özellikleri sağlamalıdır. Yara; kuru, enfekte, akut, kronik ve eksüdalı biçimde olabileceği gibi farklı özellikleri de bünyesinde bulundurabilir. Bu nedenlerle yara bakımı için gerekli olan yara örtüsü tek tip olmayabilir (Söğüt, 2021). Yara örtüsünün yara ile uyumu, hem klinik hem de ekonomik yük getiren önemli bir sorundur (Punjataewakupt ve Aramwit, 2022). "Geleneksel bir yara sargısı, yara ile hemen temas halinde olan gazlı bezle lifli bir malzemeden oluşan emici bir ped içerir. Yayılan yara sıvısı böylece yara örtüsünün boşluklarına ve lifin etrafına uzanacak ve böylece sargı en sonunda yara yüzeyine yapışkan ve mekanik olarak sabitlenecek ve yaraya koruyucu bir örtü oluşturacaktır. Yaygın olarak kullanılan yara örtüleri, pamuklu gazlı bez, köpükler, süngerler, pamuk tamponlar veya diğer lifli malzemeleri içerir." (Joshi ve Purwar, 2019). İyi bir yara tedavisi için çevresel koşullar, sosyal koşullar, hastanın sağlık durumu ve kullanılan yara örtüsü birlikte değerlendirilmelidir (Söğüt ve Sabır, 2023). Sargı bezi, gazlı bez olarak bilinen pamuklu yara örtücüler geleneksel bir yara örtücüler olup, yaranın iyileşme sonrası iyi bir yara yüzeyi elde etmek için çok etkili olarak kabul edilir (Söğüt, 2021). Tekstil yüzeyleri ve tekstil kompozitleri esaslı yara örtücü malzemeler farklı özelliklere sahiptir ve bu özelliklere bağlı olarak performansları da değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada, tekstil kaynaklı ve tekstil kompozit malzemelerin yara örtüsü kullanımına yönelik güncel gelişmeler ele alınmıştır. Öncelikle yara hakkında bilgi verilmiş ve daha sonra örtü türleri açıklanmıştır.

2. Yara Örtücüler ve Özellikleri

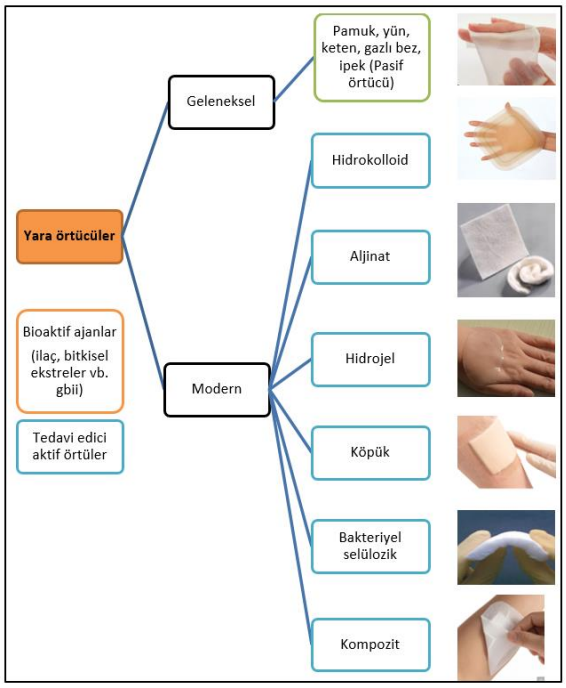
Yara örtücü malzemeler bir tekstil yapısı olabileceği gibi bir kaplama malzemesi şeklinde de bulunabilir. Yaranın nemli tutulması, yara bölgesinde gaz alışverişinin olması ve yara çevresindeki sağlıklı dokulara zarar verilmemesi iyileşme süreci için çok önemlidir. Bu nedenle yara çeşidi önemlidir ve yaranın durumuna göre en uygun yara örtüsü seçilir. Modern örtüler; dokunun canlılığını ve hücrelerin çoğalma yeteneğini yara dehidrasyonunu önleme yoluyla korur (Kumar ve ark., 2004). Yara örtüleri interaktif,

biyoaktif ve pasif örtüler şeklinde sınıflandırılır (Paul ve Sharma, 2004). Geleneksel olarak bilinen pasif örtüler, gazlı bez ve sargı bezidir. *Pasif örtü*, sadece yarayı kapatır ve yara eksüdasının buharlaşmasına izin verip yaranın kurumasını sağlar. Bunlar bakterilerin yara ortamında üremesini engelleyen ve iyileşme sürecinde aktif etkisi olmayan örtüler değildir (Hanna ve Giacopelli, 1997; Boateng, 2007). Yaranın iyileşmesinin dinamik bir süreç olduğu anlaşılmış olup, pasif yara örtücüleri etkin iyileşmede yeterli değildir. Son araştırmalarla yara iyileşmesinin kuru değil nemli bir ortamda daha hızlı gerçekleştiği ortaya konulmuştur. *İnteraktif örtüler*, polimerik film ve köpüklerdir. Bunlar, şeffaf, nem ve gazlara karşı geçirgendir. *Biyoaktif örtüler* ise, aktif yara örtücü olarak tanımlanmış olup, kollajen, aljinatlar hidrokolloidler ve kitosan gibi biopolimerlerdir. İdeal bir yara örtüsünün farklı fonksiyonları Şekil 2'de verilmiştir. Ciddi hasar görmüş cilt dokusu kendini yenilemede başarısız olur. Yara bölgesini korumak ve iyileşme sürecini hızlandırmak için büyük çabalar harcanmasına rağmen, geleneksel pansumanlar için hala pansuman sonrası iyileşmeye çalışan cildin zarar görmesi gibi rahatsız edici ikilemler bulunmaktadır. Süper ıslanabilir malzemeler biyo-arayüzün tasarımında önemlidir. Biyo-sıvılar (kan ve eksüda), süper ıslanabilir hemostatik biyo-arayüzleri ile sağlanabilmektedir (Christgau ve ark., 2007; Horch ve ark., 2010; Zong ve ark., 2022; Yuan ve ark., 2023). Cilt dokusu, yara ve yara örtücü ile yara örtülerinden beklenenler Şekil 2'den görülebilir (Jayakumar ve ark., 2011).

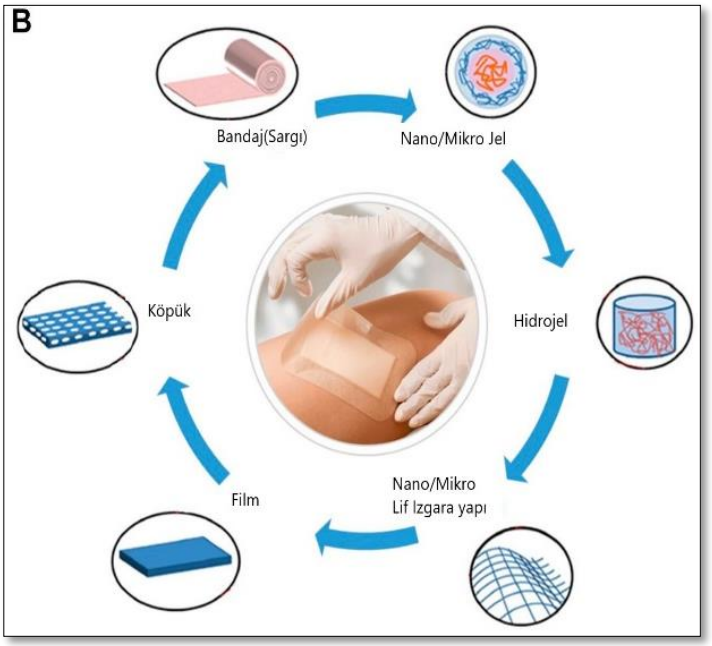


Şekil 2. Yara örtüsünün fonksiyonlarının şematik gösterimi (Yuan ve ark., 2023)

Şekil 3 günümüzde ticari olarak kullanılan geleneksel ve modern şeklinde ayrılan yara örtücüleri ve Şekil 4 ise yara örtücü çeşitlerine göre malzemenin aldığı şekilleri göstermektedir (Zheng ve ark. 2020). Geleneksel yara örtücüler gazlı bez olarak da bilinen örtücülerdir. Modern yara örtüleri; hidrokolloidler, aljinat örtüler, köpükler, şeffaf filmler, antibakteriyel etken madde içerenler, büyüme faktörü içerenler, vitamin ve mineral içerenler, biyoaktif yara örtüleri, doku mühendisliği ürünleri, greft ve greft eşdeğerleri şeklindedir (Kurtoğlu ve Karataş, 2009; Söğüt ve Sabır, 2023).



Şekil 3. Ticari Yara örtücülerin sınıflandırılması (Zheng ve ark. 2020).



Şekil 4. Farklı yara örtü biçimleri (Zheng ve ark., 2020)

2.1. Yara Örtüsü Özellikleri

Yara örtücülerden beklenen özellikler pek çok çeşitte olup aşağıda sıralanmıştır:

Sıvı Kontrolü: Yara örtüsü, bakterilerin hücrelere tutunma riskini azaltmak ve bandajdan çıkabilecek yara sıvısının sızmasını önlemek için eksudayı absorblamalı ve epidermal tabakanın iyileşmesi ve yenilenebilmesi için gerekli olan nemli ortamı sağlayabilmelidir. Tekstil bazlı yara örtücülerin bu

özelliklerinin iyi olduğu çalışmalarla ortaya konulmuştur. Özellikle kronik yara için ideal pansuman ve yara iyileşmesi için sıvı kontrolü, diğer bir deyişle, nem emilimi en gerekli özelliktir (Chen ve ark., 2012).

Koku Giderilmesi: Yara örtüsü, yaradan kaynaklı mikro organizmalar nedeniyle oluşabilecek hoş olmayan kokuları kontrol altına alabilmelidir. Yara iyileşirken koku oluşturan mikro organizmalar yara etrafında veya yara örtüsü ile terleyen cilt arasında çoğalarak bio-film görünümünde bir koloni oluşturur (Candan, 2018). Koku giderici örtüler, bu bio-film oluşumunu önlemeye yönelik bir malzemeden seçilmelidir.

Mikrobiyal Kontrol: Mikro organizmaları öldürebilen malzemeler antimikrobiyal malzeme olup, bu malzemelerden sadece bakterilere karşı etkili olanlar antibakteriyel malzeme olarak adlandırılır (Üreyen ve ark., 2008). İltihaplı yaralar için antibakteriyel özelliğe sahip yara örtücü malzemeler, mikrobiyal kontrol özelliğine sahip olmalıdır. Antimikrobiyal tekstil malzemeler, gümüş (nanogümüş dahil) ve bakırın kullanımı (Wang ve Russel, 2010), gliserin ilavesi (Jiang ve ark., 2023), usnik adit (usnic acid) (Rodeigues ve Thilagavati, 2022), fitokimyasallar (C. odorata özleri (%5) (Resmi ve Amsamani, 2022) gibi çalışmalar son yıllarda antimikrobiyal ajanlar olarak özellikle dikkat çekmiştir. Nem seviyeleri, tekstil antimikrobiyal madde aktiviteleri üzerinde en büyük etkiye sahip olan çevresel faktör olduğunu göstermektedir (Pinho ve ark., 2015).

Fiziksel Bariyer: Dış ortamdan gelebilecek olan yabancı maddeleri, partiküllleri veya yaranın aktivasyonunu artırabilecek olan sıvı veya bakterilerin alınmasını engellerken içteki nem dengesini koruyabilecek fiziksel bir bariyer özelliğinin sağlanması gerekir (Söğüt ve Sabır, 2023).

Ölü Dokuların Temizlenmesi (Debridman): Yara iyileşme sürecini hızlandırarak hasarlı ve ölü dokuların mevcut epitel yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlamak için uygun pH değeri, nem oranı, ideal yüzey oluşumunun sağlanması gereklidir.

Kanama Etkisi: Yara örtüsü, travmatik ve ağır cerrahi yaralarda oluşan büyük kan kayıplarının engellenmesi için olabilecek en hızlı şekilde kanamanın durdurulması amacıyla kanın pıhtılaşmasını sağlayabilmelidir.

Düşük Yapışkanlık: Yara örtüsünün düşük yapışkanlık özelliği, yaranın bir kısmı veya tamamının yapışmaması, hasta konforu, örtünün çıkarılırken ağrı yapmaması ve yaranın iyileşmesi açısından önemli ve gereklidir.

Isı Yalıtımı: Isı kaybının önlenmesi ve ideal ısının sağlanması yara örtüsünün gerekli işlevlerindendir.

Yara İzinin Giderilmesi: Değişen estetik algı, yaranın iz bırakmaması.

Maliyet: Yara örtüsünün malzemesi ve bakımı açısından maliyetinin düşük olması.

Pansuman-zaman: Verimlilik açısından minimum örtü değişimi sağlamalı.

Olumsuz Etkiler: Alerjik reaksiyon göstermemeli, iyileşme sürecinde örtünün fiziksel ve kimyasal yapısı değişmemeli, cilt ve ortam ile kimyasal reaksiyona girmemelidir (Söğüt ve Sabır, 2023).

Yerinde Sabit Durma: Hastanın günlük aktiviteleri esnasında yara örtüsünün yerinden oynamaması ve sabit durması.

2.2. Yara örtücüler

Bir yara, akut ya da kronik, hastanın koşullarına göre değişkendir. Örnek olarak, yarada yoğun eksüdasyon varsa, bunu emebilecek bir yara örtüsü kullanılmalıdır. Eğer yara kuruysa, nemli ortam sağlayacak bir örtücü seçilmelidir (Schultz, 2003). Modern yara bakımı, yaranın doğru değerlendirilmesi, ihtiyacın tespit edilmesi ve yaranın ihtiyacı olan nemli ortamın sağlanması veya tutulması şeklinde tanımlanır. Malzemesine göre modern yara örtücüler, özellikleri ve örtüden beklenen performansa göre incelenmiştir.

Hidrokolloidler

Hidrokolloidler, jelatin veya pektin gibi çeşitli doğal veya sentetik polimerlerden üretilebilen jel formundaki yara örtücülerdir. Bu malzemeler genellikle katmanlıdır. Dış katman koruma ve destekleme görevi görür ve film, köpük veya elyaf formunda olabilir. Bu destek malzemesinin üzerine, hidrofilik partiküller aracılığıyla dağıtılan bir yapıştırıcıdan oluşan lamine kompozit eklenir. Hidrokolloid örtüde kullanılan tipik destekleyici malzemeler, polyester dokusuz yüzeyler veya poliüretan membran filmlerdir (Gupta ve ark., 2010). Hidrokolloid yara örtücüler, eksüdası az ve orta seviye olan yaralarda, bası yaraları, yanıklar, travmatik yaralar ve kompresyon tedavisine cevap vermeyen bacak ülserlerinde kullanılması için ideal bir malzemedir. Bu örtüler, yaraya doğrudan yapıştığı için kullanımı kolaydır, ağrıyı dindirir, yarayı tıkayarak yabancı cisimcikleri geçirmezler ve anti-bakteriyel bir bariyer oluşturarak yaranın enfekte olma ihtimalini düşürürler. Yara, eksüda ile temas ettiğinde aktif olur ve kohezif veya hidrofilik olabilen bir jel yapısına dönüşebilirler. Hidrokoloidler, yaranın boş kısmına doğru şişerler, aynı zamanda epitelizasyon hızını ve kollajen üretimini de artırır. Hidrokolloidler su geçirmez olduğundan hastalar banyo veya duş yapabilir.

Aljinat Örtüler

Aljinat, ilk olarak Speakman tarafından tanımlanmıştır. 1944'te wet-spinning teknolojisi ile lif olarak üretilen, kahverengi su yosunlarından ekstrakte edilen, güvenli kabul edilen, suda çözünür, polimerlerle jel yapıları oluşturan bir lineer polisakarit olan kalsiyum aljinat tuzu 1940'lardan beri yara tedavisinde kullanılmaktadır (Speakman ve Chamberlain, 1944; Oin, 2006). Aljinat jeller, kanamalı ve yüksek eksüdalı yaralarda etkilidir ve ağırlıklarının 15-20 katı kadar sıvı emebilir. Aljinatlar yara eksüdası ile temas edince güçlü hidrofilik jel oluşturur (Gupta ve ark. 2010). Alginat örtüler antibakteriyel özelliğe sahip olmamasına rağmen; bakteriler jel içerisinde hapsolur. Esnek fiber olarak üretilen aljinat örtüler oyuk yaralar için çok uygundur, yaradan kolayca temizlenebilir ve yara iyileşirken oluşan granülasyon

dokusuna hiç zarar vermeden değiştirilebilirler (Kim ve ark., 2008). Aljinat örtüler nemli ortam istediklerinden, yara için gerekli olan nemli ortamdan nemi alıp kurumaya neden olacağı için, kuru ve nekrotik doku ile kaplanmış yaralarda tercih edilmemelidir. İncelenen son çalışmalarda (Clark, 2017) yara pansumanındaki bu sorunlar nedeniyle aljinat pansumanların yaygın olarak kullanılmadığı belirtilmiştir.

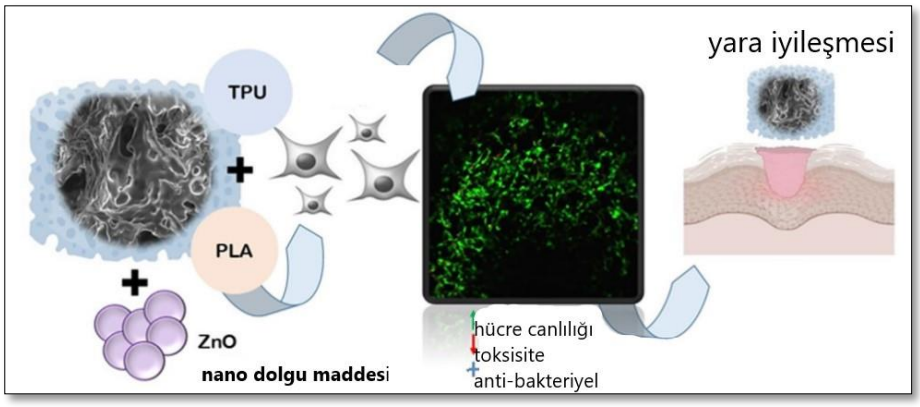
Hidrojeller

Hidrojeller yapılarında yüksek oranda su barındırabilirler (Hanna ve Giacopelli, 1997) ve yüksek absorpsiyon kapasitesine ve ağrı azaltıcı özelliğe sahiptirler. Hidrojel örtüler nemli yapıdadır, yaranın ısısını hidrojel ile düşürür ve serinletici bir etki yaratır, ayrıca yara yüzeyine yapışmazlar. Hidrojeller, protein ve hücre gibi biyolojik bileşenleri zayıf absorbe etme eğilimi gösterir, bakterilere karşı yetersiz bariyer özelliği nedeniyle ikinci bir örtü gerektirirler ve bu nedenle enfeksiyonlu yaralar için tavsiye edilmez. Hidrojel örtüler; elastik yaprak, amorf jel ya da film olarak uygulanan önemli biyomalzemelerdendir. Ayrıca kolay şekil alırlar, yara yüzeyinden kolayca temizlenirler ve kurumuş olan yarayı nemlendirerek iyileşme için gerekli nemli ortamı sağlarlar (Söğüt, 2021). Hidrojeller, mükemmel biyouyumlulukları, hücre dışı matrisi taklit eden yapıları ve ilaç yükleme kabiliyetlerinin yanı sıra, zayıf çevresel uyum ve potansiyel ilaç direncine sahiptir. Jiang ve ark. (2023), insan vücudunun yüzeysel dokusu olan ciltteki yaralarda kolayca kolonize olan *S. aureus* bakterisine karşı glihidrojel tekstil örtülerinin antibakteriyel performansını artırmak için klindamisin uygulamış ve örtünün antibakteriyel özelliğini önemli ölçüde artırmışlardır. Çalışmada, Hofmeister etkisine dayalı yaş eğirme (wet spinning) teknolojisi ile üretilen yeni jelatin gliserin hidrojel (glihidrojel) liflerine dayalı ilk hidrojel tekstil pansumanı geliştirilmiştir. Bu yara örtücü ile, geleneksel hidrojellere göre daha kısa, 14 günde iyileşme sağlanabilmiştir. -80°C'de bile etkili tekstil bazlı yara örtücü geliştirilmiştir.

Köpükler

Köpük örtüler, esnek, yüksek absorpsiyon kapasitesine sahip, yumuşak, gözenekli yapıda yara örtücülerdir. Yumuşak silikon, yaraya nazikçe temas eden alt tabaka, yüksek emici poliüretan köpük orta tabaka ve nefes alabilir poliüretan film kaplı üst katmandan oluşurlar. Köpük örtüler hidrofilik yapılardır ve bu özellik nedeniyle hidrofobik destek yardımıyla yara sıvısının sızmasını önler ve bakterilerin geçişini kısmen engeller (Söğüt, 2021). Köpükler, yüksek emme kabiliyetine sahip olduğu için nem, buhar, oksijen ve gaz geçirgenliğini sağlar ancak dışardan sıvı geçirmez ve yapışmazlar. Köpük örtüler, kolayca çıkarılır, termal izolasyon sağlar ve nemi korurlar, bu nedenle uygulama da rahatlık sağlarlar. Köpük örtü oyuk biçimindeki yaranın oyuğu içine yerleştirildiğinde şişerek genişler ve böylece yaraya uyum sağlar. Bu şişme hali yara duvarına hafif bir basınç yapar ve yaradan kaynaklanan ödemin azalmasını sağlar. Temizlenmeleri kolay olsa da bakteriyel kontaminasyonu

yeterince engelleyemez (Söğüt, 2021). Nekrotik yaralarda ve orta derecede eksüdalı yaralarda kullanılır ancak kuru ve kabuklu yaralar için kullanımları uygun değildir. Özellikleri nedeniyle köpük yara örtücüler özellikle ülserleşmiş yaralarda, diyabet yaralarında verimli performans gösterebilmektedir (Hargis ve ark. 2024). Köpükler, poliüretan (PU) ve silikon bazlı olabilirler. PU köpük örtüler, yüksek dayanıklılık ve esnekliğe sahiptir, su tutma kapasiteleri yüksektir, absorbe eden tabaka boyunca eksüdanın düzgün dağılımını kolaylaştırırlar ve yarı geçirgen ikincil örtü ile dış sızıntıyı önler (Hanna ve Giacopelli, 1997). PU köpük yara örtücü, ıslak yara yüzeyine yerleştirildiği zaman, kılcal etki sayesinde yara sıvısı köpük içerisine absorbe olur ve örtünün diğer tarafına geçer. Köpük, kuru yara yüzeyine yerleştirildiğinde ise poliüretan destek tabakası nem kaybını azaltmakta ve yara yüzeyinin kurumasını önlemektedir" (Söğüt ve Sabır, 2023). Lee ve ark. (2016) yaptıkları bir araştırmada Medifoam® N köpük malzemenin mükemmel düzgünlüğe sahip, küçük gözenek ve hücre boyutlarında, mükemmel sıvı emme özelliğinde olup, diğer poliüretan köpüklerden yara iyileşmesine daha iyi bir performans verdiğini göstermişlerdir. Köpük yara örtücülerde polilaktik asit (PLA) ile harmanlanmış termoplastik poliüretana (TPU) ağırlıkça %5 oranında parçacık boyutu 40 nm olan çinko oksit (ZnO) nanopartiküller eklenmesinin yara iyileşmesine antibakteriyel etkisi araştırılmıştır (Bužarovska ve ark. 2023). Şekil 5'ten bu çalışmadaki uygulama görülebilir. Araştırma sonucunda TPU oranındaki artışın yara iyileşmesinde daha iyi sonuç verdiği ve ZnO varlığının antibakteriyel etki sağladığı belirtilmiştir.

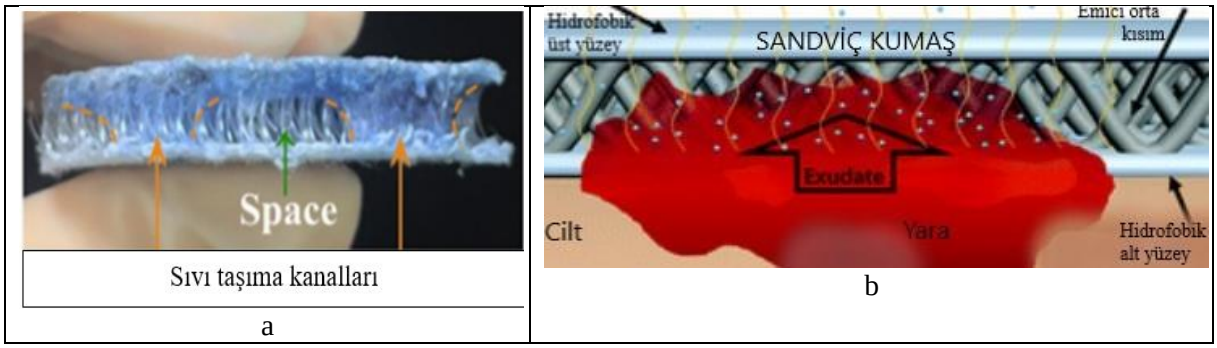


Şekil 5. TPU köpüklerinin PLA ile harmanlanması, ZnO ilavesi ve yara örtüsü uygulaması (Bužarovska ve ark. 2023)

Sandviç Kumaşlar

Sandviç (spacer) kumaşlar iki kumaş tabakasının bir bağlantı ipliği veya tabakası ile bağlanması sonucu elde edilen uç boyutlu yapılardır (Ertekin ve Marmaralı, 2012). Sandviç kumaşlar, iki dış kumaş katmanının bir yığın iplik katmanıyla birbirine bağlandığı bir tür 3D tekstil yapılarıdır. Bu ara iplik katmanları nedeniyle, dış katmanlar arasında genellikle 1,5 ila 10 mm arasında değişen belirli bir mesafe oluşturulabilmektedir. Emici yara örtüsü olarak sandviç kumaşlar, üç boyutlu ve üç katmanlı kompozit bir yapı şeklinde tasarlanmaktadır (Yang ve Hong, 2016). Yapılan bir çalışmada; seçilen iki dış kumaş

katmanının dış yüzeyleri elektro-eğirme (electrospinning) yöntemi ile bir poliüretan ve polisitren nanolif membranı ile sırasıyla kaplanmıştır. Sonuç olarak polisitren nanolif membran poliüretandan daha iyi, çok iyi su buharı ve hava geçirgenliği göstermiştir. Sandviç kumaşın ara iplikleri pamuk olan tencel olandan daha uzun süre sıvı tutabilmiştir. Sandviç kumaş bazlı örtülerin, ticari köpük örtülere göre daha iyi sıvı emme, hava geçirgenliği ve yarayı nemli tutma özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir (Yang ve Hu, 2017). Sandviç kumaşların çok fonksiyonlu olarak ele alındığı başka bir çalışmada; ara kumaş, agar/sodyum aljinat/kalsiyum iyon çift ağlı aerojel, metilen mavisi ve $AgNO_3$ katkılı termoplastik poliüretan nanofiber membrandan oluşan yeni birçok işlevli yara örtücü (DNCD) olarak tasarlanmıştır. Tek yönlü sıvı taşıma ve emicilik testleri, DNCD örtünün, sıvıları sadece iki saniye içinde tek yönlü olarak taşıyabildiğini ve %875,3'lük bir sıvı emilim oranına sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Sandviç kumaş ve sıvı taşıma kanalları tarafından oluşturulan benzersiz açık yapı, mükemmel hava geçirgenliğinin yanı sıra uygun bir su buharı iletim hızı sağlamıştır Sandviç kumaşlardaki iplikler, kumaşın üst ve alt katmanlarını birbirine bağlar. Bir sandviç Şekil 6'da görüldüğü gibi kumaş bazlı pansuman sıvı akışını yönlendirebilirse, böylece biosıvının hedeflenen ve etkili bir şekilde taşınımını sağlayabilir (Lyu ve ark. 2025).



Şekil 6. Sandviç kumaş yara örtüsü a) Yara sıvısının taşınma kanalları (Lyu ve ark. 2025) b) Sandviç kumaşın yaradaki işlevi (Yang ve ark., 2017)

Bakteriyel Selülozik Yara Örtücüler

Bakteriyel selüloz umut verici bir biyopolimer türüdür. Yara eksüdasını kontrol edebildiği ve yara için nemli bir ortam sağlayabildiği için iyileştirmede olumlu katkı sağlar. Bununla birlikte, antibakteriyel aktivitenin olmaması nedeniyle bu yara örtüsüne antibiyotik ekleme, inorganik antibakteriyel ajanlar veya organik antibakteriyel ajanlarla birleştirme yapılır. Böylece selüloz bazlı antibakteriyel kompozit yara örtücüler son yıllarda üzerinde çok durulan modern örtücüler olarak dikkat çekmektedir (Zheng ve ark., 2020). Nanokompozit formlarda birkaç üretim tekniğinin bir arada kullanılması yoluyla elde edilen yara örtücülere yönelik nanoyapıya zencefil ilavesi (Sorourian ve ark. 2025), diyabetliler için bakteriyel selülozik yara örtücüler (Mo ve ark. 2025) benzeri çalışmaların arttığı görülmektedir. Kenaf, sisal, rami, jüt, kenevir, keten, hindistan cevizi lifi, muz ve bambu gibi doğal lifler biokompozit üretiminde kullanılabilmektedir. Doğal liflerden üretilen biokompozitler, insan vücudu tarafından kabul

edilebilirliği, orta düzeyde mekanik performansı ve çevresel faydaları nedeniyle yara pansumanı olarak kullanılabildiği gibi, ilaç dağıtımı, ortopedik uygulamalar, doku mühendisliği gibi biyomedikal alanlarda da kullanılmaktadır (Kuram, 2024).

Kitosan Yara Örtücüler

Kitosan biyopolimerinin ve nanoparçacık formunun tekstil yüzeyine uygulanması ile ilgili birçok çalışma olduğu görülmektedir (Sabır ve ark., 2017). Gümüş partiküllerinin kitosan-o-metoksi polietilen glikol ile kapsüllendiği ve pamuklu kumaşa konvansiyonel daldırma-kurutma yöntemiyle uygulandığı bir çalışmaya rastlanmıştır (Abdel-Mohsen ve ark., 2012). Başka bir çalışmada, iyonik jelleşme yöntemiyle üretilen kitosan nanoparçacıklarına çiçek aromaları eklenmiş ve böylece hoş koku salınımı yapmaları sağlanmıştır (Hu ve ark., 2011). Thomas ve ark. (2011) pamuklu kumaşa ilk olarak kitosan biyopolimerini kimyasal olarak bağlamışlar, ardından gümüş nanoparçacıkları da kumaşa aplike ederek yüksek antibakteriyel etkiye sahip tekstil yapıları üretmişlerdir. Abdelhady (2012) çalışmasında, kitosan/çinko oksit nanoparçacıkları sentezlemiş ve elde ettikleri hibrid nanoparçacıkları pamuklu kumaş üzerine aplike ederek antibakteriyel ve UV koruyucu tekstil yapıları üretmişlerdir. Gouda ve ark. (2010) kitosan nanoparçacıklara bakır iyonları yüklemiş ve bu nanoparçacıkları antibakteriyel bitim işlemi malzemesi olarak pamuklu kumaşlara uygulamışlardır. Arif ve ark. (2015) farklı olarak kitosan nanoparçacıklarını gümüş iyonları ile yüklemek için düşük miktarda gümüş eklemenin kitosanın antibakteriyel etkisini çarpıcı bir şekilde artırdığını tespit etmişlerdir. Yüzey işlevselliğini geliştirmek için, tekstil yapıları uygun polimer çözeltileri ile işlenebilir. Bir biyopolimer olan kitosanın (CS), geleneksel ped-dry-cure yöntemi kullanılarak bir yün-viskon iğneleme işlemi ile elde edilmiş dokusuz yüzey (nonwoven) üzerine farklı konsantrasyonlarda CS uygulandığı ve yara pansumanı olarak kullanıldığı bir çalışma mevcuttur. Kan alımı ve antimikrobiyal etkinlik, CS ile işlenmiş numuneler için değerlendirildiğinde %0,3 CS ile işlenmiş numunelerin iyi emicilik ve mükemmel antimikrobiyal özellikler gösterdiği gösterilmiştir (İslam ve ark., 2013). Yıldırım ve Küçük, kitosan ve jelatin esaslı, sarı kantaron (*Hypericum perforatum*) katkılı yara örtücü filmleri çözelti dökme yöntemi ile hazırlamışlar, antibakteryal aktiviteleri gram pozitif (*S.Aureus, B.Subtilis*) ve gram negatif (*S.Typhi, E.coli*) mikroorganizmaları için agar disk difüzyon metodunu kullanarak tüm filmlerin dört farklı mikroorganizmaya karşı inhibisyon çapı oluşturarak antibakteriyel etki gösterdiğini belirlemişlerdir. Sarı kantaron içeren kitosan esaslı filmlerin yara örtücü film olarak kullanılma potansiyellerinin olduğu görülmüştür (Yıldırım ve Küçük, 2020). Yara iyileşmesinin çeşitli ihtiyaçlarını karşılamak için kitosan içeren gelişmiş yara örtücü malzemeler farklı teknolojilerle üretilip farklı fonksiyonlar için birleştirilebilmektedir. Yapılan bir çalışmada kitosan-TiO_2 yara örtücü çok katmanlı olarak üretilmiş, taban katmanı olarak amin fonksiyonelleştirilmiş poliakrilonitril nanolif membran, orta katman olarak TiO_2 ve yara temas katmanı olarak kitosan nanolif membran iskelesi, yara iyileşmesini desteklemek için

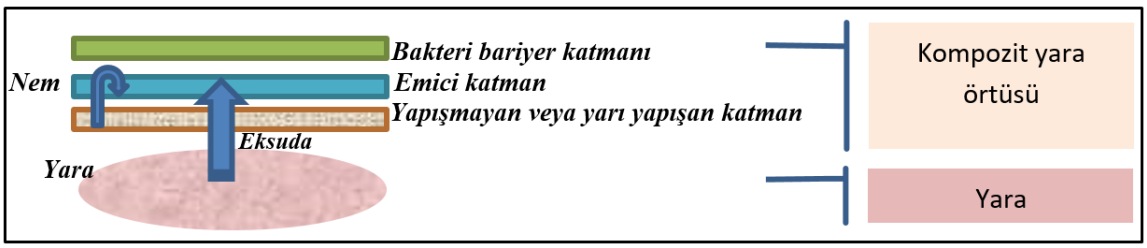
elektrospinning, yüzey fonksiyonelleştirme ve elektrospreyleme yoluyla sırayla üretilmiştir. Elde edilen çok katmanlı kitosan nanolif membran yara örtücü, 41,94° su temas açısıyla yeterli morfoloji, gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü ve hidrofilite göstermiştir. Yapılan in vitro analiz ile mükemmel hücre canlılığı çoğalması olduğu görülmüş, dört tür bakteri patojenine (M. luteus, S. flexeneri, S. aureus ve K. pneumonia) karşı aktif olduğu ve ileri yara iyileşmesi için umut verici olduğu belirtilmiştir (Khan ve ark., 2025).

Kompozit Yara Örtücüler

Yara örtüsü araştırmaları, mekanik korumanın yanı sıra, yara örtüleri yara ile etkileşime girmeli ve iyileşme sürecini iyileştirmelidir. Bu, iki veya daha fazla polimerik malzemenin en iyisini birleştiren kompozit yara örtüleri ile mümkündür. Kompozit yara örtüleri, birden çok işlev sağlayan farklı bileşenlerin fiziksel olarak tek bir örtüde birleştirilmesiyle elde edilen çok katmanlı ürünlerdir. Şekil 7, kompozit bir yara örtücüde olması gereken en temel katmanları göstermektedir. Kompozit yapı bileşenlerinin işlevleri; bakteri bariyeri, emilim, yara bölgesine yarı yapışma veya yapışmama, yapışkan bir kenarlık şeklindedir. Emici katman nemi sağlar ve tüm katmanlar, yara eksudasının üst katmana doğru ilerlemesini sağlanacak şekilde tasarlanır. Kompozit yara örtücüleri, yapışkan kenarlıdır ve aşağıdakilerden oluşur:

a) Üzerinde mevcut olan fiziksel (kimyasal olmayan) bir bakteri bariyeri pansuman pedinin tamamı ve yapışkan bordüre doğru uzanır,
b) Aljinat veya diğer elyaf jelleştirici sargılardan farklı bir emici tabaka-köpük, hidrokolloid veya hidrojel.
c) Yara bölgesi üzerinde yarı yapışkan veya yapışkan olmayan bir tabaka.

Toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilen ve diğer özellikleri nedeniyle en yaygın kullanılan yara pansuman malzemelerinden biri olan pamuk, imalat için olduğu kadar daha hızlı ve etkili yara kapama için yapı iskelesi olarak da kullanılır (Rao ve ark., 2021). Bu sebeple pamuklu tekstil ürünlerine yönelik kompozit yara örtüsü geliştirme yönünde birçok çalışma yapılmıştır.



Şekil 7. Kompozit yara örtüsünün şematik görünümü

Yara örtücülerde antibakteriyel özellik için yapıya eklenen maddelerden birisi de nisindir. Nisin, 1969 yılında Dünya Sağlık Örgütü ve 1988 yılında Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından insan tüketimi için gıda güvenli bir biyokoruyucu madde olarak onaylanmış tek bakteriyosindir (Chan ve ark., 2023). Güneş

ve Albayrak (2021) çalışmalarında, antibakteriyel nisin katılımı ve biyouyumlu karboksimetil kitosan (CMCht) aljinat emdirme ile modifiye edilmiş pamuk hidrojel kompozit yara örtüleri üretmişlerdir. Araştırmacılar, üretilen hidrojel kompozit yara örtülerinin akut yaralar için gözenekli, uygun su buharı iletim hızına da sahip antibakteriyel (bakteri: *Staphylococcus aureus*), yüksek su alma kapasiteli, viskoelastik, fibroblast hücresi üzerinde sitotoksisite göstermeyen kısa süreli bir örtü malzemesi olarak uygun olacağını belirtmişlerdir. Selülozik malzemeler hala yara tedavisinde en çok kullanılan malzemelerdir. Önemleri, tekstil mühendisliği alanında bu konuyla ilgili yayın sayısına yansımıştır. Tekstil yara örtüsü yaradan çıkarma sırasında ağrıya neden olabilmektedir ancak iyileşme sonrası en iyi yara yüzeyinin pamuklu yara örtüleri ile elde edilmekte olduğu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Bununla birlikte, selülozik yara örtüleri, nemli ortamı koruyacak ve pamuğun ilaç verme kabiliyetini de geliştirecek olan hidrojellerle daha işlevsel hale getirilebilir (Pinho ve Soares, 2018).

Pamuklu yara örtüsü kompozit bir malzemeye dönüştürülerek tasarlanabilir. Montaser ve ark. (2020), yaptıkları araştırmada yanık yaraları için pamuklu kompozit iyileştirme malzemesi geliştirilmişlerdir. Pamuklu gazlı bez kumaşlar önce katyonize edici madde olarak Quat 188 ile modifiye edilmiş, sonra gümüş nanoparçacıklar (Ag NP'ler) dahil edilmiş ve daha sonra oksitetrasilin hidroklorür ilacı (S1) ile yüklenmiştir. İkinci adımda, kitosan (CS), farklı miktarlarda salisilaldehit (SA) ile Schiff bazı reaksiyonu yoluyla salisil-imin-kitosan biyopolimeri üretmek üzere reaksiyona sokulmuştur ve salisil-imin-kitosan biyopolimeri oksitetrasilin hidroklorür ilacı üzerine kaplanmıştır. Sonuçta, modifiye pamuklu yara örtücü bezlerin %şişme oranı kapasitesi, %dehidrasyon oranı ve antimikrobiyal olarak biyomedikal tekstillerde, antimikrobiyal ve yanık yarası iyileştirme amaçlı olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Rao ve ark. (2021) pamuklu tekstil yara örtüsüne SNPNP'ler (SNPCF'ler) nanopartiküller emprenye etmişler ve bu yara örtülerinin çıplak pamuklu gazlı bezden daha iyi bir su temas açısı sağladığınıhem de Gram-negatif bakteriler (*Klebsiella aerogenes ve Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa ve Bacillus subtilis*) üzerinde etkili olduğunu göstermişlerdir. Sonuç olarak; SNPCF'lerin antimikrobiyal ve yara iyileştirici ajan olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Nem koşulları ve sıcaklık değişiklikleri, yara yönetimini etkileyen iki temel faktördür. Isıya duyarlı hidrojeller, yara bölgesinde nemli bir ortam sağlayabildikleri ve bölge enfekte olduğunda yarayı tedavi etmek için ek biyoaktif moleküller salabildikleri için ideal pansuman malzemeleridir. Sun ve ark. (2021) çalışmalarında, tekstil bazlı kompozit yara örtüsü için matris olarak pamuklu kumaş kullanmışlar, ısıya duyarlı bir hidrojel ve kitosan-g-poli(N-vinil kaprolaktam)'i (CS-gPVCL) kaplama tekniği ile takviye etmişlerdir. Bu pamuklu kompozit yara örtüsü, su buharı geçirgenliği ve sıcaklığa tepki olarak ilaç salma davranışı gibi yara yönetimi özellikleri gösterdiği, termo-duyarlı-hidrojel-işlevselleştirilmiş tekstilin aktif bir yara örtüsü olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Kompozit tekstil bazlı yara örtüleri, genel olarak antibiyotik gibi etken maddenin yara örtücü matris malzemeye emdirilmesi yoluyla elde edilmektedir.

Örneğin, povidon-iyot tekstil kaynaklı örtüler; yara örtüsüne gümüş (Mai ve ark., 2003), antibiyotik (Bruin ve ark., 1990), polivinilalkol ve sodyum aljinat eklenmesi (Kim ve ark. 2008), gentamisin yüklü kollajen, implant (Bruin ve ark., 1990; Steenfos, 1994), A, C gibi vitaminler eklenmesi (Lazovic ve ark., 2005) yoluyla elde edilebilmektedir. Pamuk gibi selüloz yara örtücülerin üstün özelliklerini geliştirmek için antibakteriyel ajanlar, hidrojel, alginat gibi fonksiyonel özellikler kazandırılan kompozit yapıların kullanılmasına gelecekte daha çok ağırlık verilebilir.

İpekli Yara Örtücüler

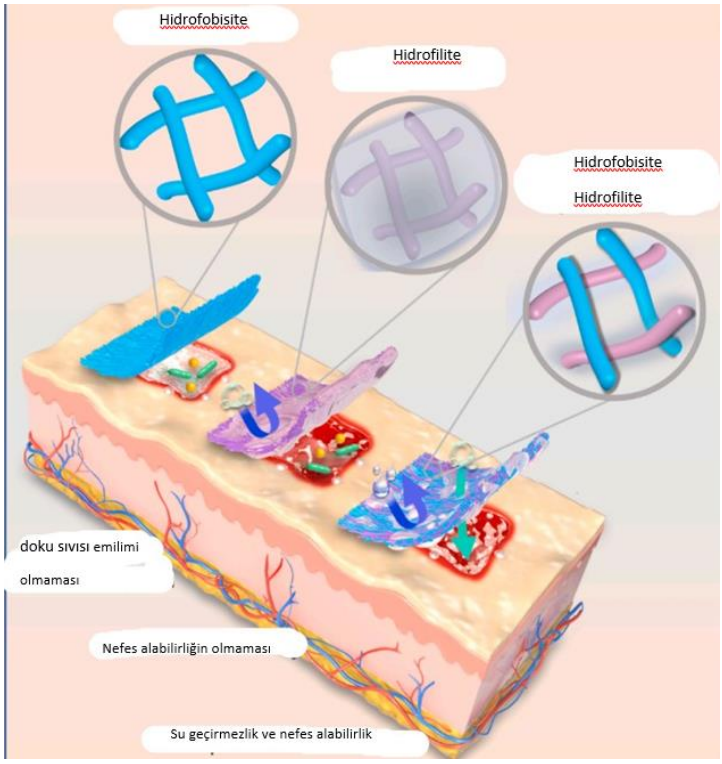
İpek (SF); ipek böceği ve örümcekler tarafından özel epitel hücreleri içinde sentezlenen lif yapılı bir proteindir. Yaygın olarak Bombyx mori (B. mori) ipek böceği, Nephila calavipes ve Araneus diadematus gibi bazı örümcek türlerinden elde edilir (Aras ve Kazancı, 2019). SF, mükemmel biyolojik ve mekanik özellikleri sayesinde, bir yara sargısı gibi çeşitli yeni biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır. Spesifik olarak, mekanik sertlik, çok yönlülük, biyouyumluluk, biyolojik olarak parçalanabilirlik, su buharı geçirgenliği ve hafif bakterisidal özellikleri, SF'ye yara pansumanı uygulamaları için mükemmel bir biyomateryal malzeme özelliği kazandırmaktadır. Patil ve ark, ipek lifinin yara örtücü bir materyal olarak kullanımında farklı formlara yönelik yapılan araştırmaları derlemişler ve ipekli yara örtücülerin mükemmel pansuman malzemeler olduğu sonucuna ulaşmışlarıdır (Patil ve ark., 2020).

SF'ye dayalı pansumanlar şu anda çok çeşitli kronik ve akut (özellikle yanık yaraları) yaraların tedavisinde kullanılmaktadır. Biyomalzeme olarak hazırlanan SF ve türevleri süngerler, hidrojeller, nanolifli matrisler, yapı iskeleleri, mikro/nanopartiküller ve kompozit filmler olarak mevcuttur. SF'ye dayalı süngerler, daha yüksek gözeneklilik, daha yüksek mekanik mukavemet, epitel hücresinin hızlı çoğalması ve fibroblast çoğalması yoluyla kollajen birikimi özelliklerine sahiptir. SF'nin hidrojelleri, yanık için gerekli bir malzeme olarak kabul edilebilir. SF bazlı hidrojeller nemli ortam sağlar. Yara iyileşme özelliklerini iyileştirmek için PEG, PVA, aljinat ve hyaluronik asit gibi farklı polimer türleri kullanılarak SF bazlı kompozit filmler geliştirilmiştir. SF ve PVA bazlı kompozit filmler, biyouyumluluk, daha yüksek mukavemet ve esneklik, gaz bariyeri özelliği ve daha yüksek şişme kapasitesi gibi faydalı özellikler göstermiştir. Nanoteknoloji destekli SF kompozit filmlerin mükemmel antibakteriyel aktivite, mekanik özellik, sitotoksik olmama, hücre tutunma özelliği ve su/buhar geçirgenliği olduğu güçlü bir şekilde kanıtlanmıştır.

Biyoaktif Örtüler

Biyoaktif örtüler, "doğal doku veya biyosentetik kaynaklardan üretilen doku mühendisliği ürünlerini de kapsayan malzemelerdir" (Söğüt, 2021). Bu teknolojideki ürünler genellikle kollajen, hiyalüronik asit, kitosan, aljinatlar ve elastin gibi polimerleri bir arada bulundururlar. Biyomateryallerin, doğal ekstraselüler matriks bileşenlerini içerme, biyolojik olarak parçalanabilir olma gibi avantajları vardır.

Üstelik bu biyomateryallerden bir kısmı normal yara iyileşim sürecinde ve yeni doku oluşumunda aktif rol oynamaktadır. Bu özellikleri nedeniyle biyomateryaller, toksik olmama ve biyouygunluk açısından yara tedavisi için ilgi çekici seçenekler haline gelmiştir (Söğüt, 2021; Ueno ve ark. 1999). Anti-inflamatuar ve antioksidan özelliklere sahip biyoaktif bileşikler açısından zengin bitki özleri, doku onarımını ve yara iyileşmesine önemli ölçüde katkıda bulunabilirler. Ancak, bu özütlerin toz formları, zayıf suda çözünürlük, in vitro sınırlı salınım ve tehlikeye atılmış su geçirmezlik ve nefes alabilirlik dahil olmak üzere çeşitli sınırlamalarla karşı karşıyadır. Xu ve ark. (2024) tekstil yüzeyi üretim teknolojilerinden elektro-eğirme metoduyla hidrofobik *polilaktik asit- H. rhamnoides* L. PEE ve hidrofilik *polivinilalkol-Ag* (PLA-PEE/PVA-Ag) ile birlikte akıllı ve biyoaktif bir yara örtüsü üretmişlerdir. PVA , örtünün akıllı su geçirmezliği, nefes alabilirliği ve interstisyel sıvı emilimi, yara iyileşmesini hızlandıran nemli bir ortam yaratması da sağlanabilmiştir (Xu ve ark. 2024). Bahsedilen yara örtüsü uygulaması Şekil 8'de şematik olarak açıklanmıştır.



Şekil 8. Çok fonksiyonlu biyoaktif yara örtüsü (Xu ve ark, 2024)

Antimikrobiyaller ve büyüme faktörleri gibi etken maddeler, yara bölgesine uygulanmak üzere, bu biyomateryaller içerisine yerleştirilmek suretiyle kullanılır (Tyrone ve ark., 2000). Kollajen, yara iyileşme sürecinde, iyileşmenin başlamasından en son skar doku oluşumuna kadar tüm aşamalarda çok önemli bir işlev görmektedir (Purna ve Babu, 2000). Kollajen fibroblast oluşumunu uyarır ve endotel hücrelerin yaralanmış dokuya göçlerini hızlandırır, biyomatrisler ise sıvı ve yara atığı toplama özelliğine sahiptir (Adhirajan ve ark., 2009). Kollajen matrisler bazı çalışmalarda farklı grup antibiyotikler gibi

etken madde deposu olarak da kullanılmışlardır (Ruszczak ve Friess, 2003). Hiyalüronik asit de kullanılan bir diğer bioaktif malzemedir. Hiyalüronik asit hidrofilik özelliği ile bilinir (Oh ve ark., 2010), doğal yapısı gereği biyouygun ve biyolojik olarak parçalanır özelliktedir ve hidrojel filmler polimerik ilaç taşıyıcı biyomateryal olarak değerlendirilmiştir (Luo ve ark., 2000). Bu çalışmalara son yıllarda çok fonksiyonlu biyoaktif yara örtüsü çalışmaları hızla eklenmektedir.

3. Yara Örtücülerin Malzeme Türüne Göre Karşılaştırmalı Analizi

Bu çalışmada incelenen yara örtücülerin fiziksel olarak karşılaştırılması Tablo 1'de, materyal olarak karşılaştırılması ise Tablo 2'de verilmiştir. Çizelgelerde kullanım alanları ve yara üzerindeki performans değerlendirmesi yer almaktadır. Yara örtücülerle ilgili geniş kapsamda yapılan çalışmalardan tekstil esaslı yara örtücülerin çoğunun geleneksel olduğu, modern tekstil bazlı yara örtücülerin ise nanolif formda elde edildiği ve fonksiyonel özellikler kazandırıldığı görülmüştür.

Tablo 1. Fiziksel şekillerine göre yara örtücülerin performansı (Söğüt ve Sabır, 2023)

Modern Yara Örtücüler	**Kullanım Alanları**	**Performans Değerlendirmesi**
Köpük	Diyabetik ayak ülserinde, ülserleşmiş yarada kullanılır	Takviye edilebilme özelliği sayesinde kullanım alanı geniştir. Absorplama özelliği yüksektir.
Şeffaf Filmler	Eksudasız yüzeysel yaraya uygulanır.	Değiştirmesi ve ergonomik olarak kullanımı uygundur. Diğer örtülerin jel ya da dolgu malzemelerinin yaraya sabitlenmesi içindir.

Yaranın özelliklerine göre yara örtüsü seçimi önem kazanmaktadır. Günlük hayatta modadan araç lastiklerine kadar her alanda tekstil yapılarının, lif, iplik, dokuma, örme ve dokusuz yüzey şeklinde tüm formlarıyla geniş bir ürün yelpazesinde kullanıldığı görülmektedir. Teknolojik gelişmeler yardımıyla geliştirilen yeni ürünler, hijyen ve tıbbi tekstil gibi teknik tekstillerin ve tekstil kompozitlerinin gündelik hayattaki payı gittikçe artmaktadır. İnsan nüfusunun artışıyla hastalıklar ve enfeksiyonlarda hijyen büyük bir önem arz etmektedir. Karşılaşılacak problemlere karşı alınan önlemler ve çözümler, kompozit, elektro-eğirme, nanoteknoloji vb. yeni teknolojiler sayesinde üretilebilen tek kullanımlık tekstil hijyen ürünlerine ve sağlık alanında etkili tıbbi tekstillere yönelimleri gerektirmektedir. COVID-19 küresel pandemi sürecinde tekstil mamulü olan maske gibi ürünlerin insan yaşamını korumada ne kadar etkili olduğu açıkça görülmüştür. Yara tedavi materyallerinden olan yara örtücülerin üretiminde önemli bir faktör olan yara sıvısı oranının değişkenliği ve yara çeşitliliği gibi bir çok gerekliliğin sağlanmasının en büyük zorluk olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Son yıllardaki yenilikçi çalışmalarda tekstil tabanlı nanolif ve kompozit yapıda yara örtülerinin çok fonksiyonlu ve çok bileşenli olarak üretilmesi, nemli ortam, gaz geçirgenliği, yeni doku oluşturma hızı ve antibakteriyel özellikte iyileşme gibi elzem özelliklerin sağlanması yönünde umut vermektedir.

Tablo 2. Materyale göre yara örtücülerin performans değerlendirilmesi (Söğüt ve Sabır, 2023)

Malzeme	Kullanım Alanları	Performans Değerlendirmesi
Hidrokolloid	• Artiyel ve venöz ülser • Ameliyat sonrası yaralar • 3. Derece yanıklar	İnce ve esnek yapısı nedeniyle yara bölgesine uygulaması kolaydır. Değiştirme sıklığı az olduğu için hava alışverişi yüksek olması gerekmeyen yaralar için tercih edilebilir.
Aljinat	• Venöz, diyabetik, basıç ülserleri • 3. ve 4. derece yanıklar	Yara yüzeyindeki, sıvıyı ağırlığının 20 katına kadar absorbe edebilir ve az değiştirme yeterlidir. Hidrokolloidlere göre daha çok tercih edilir. Ama eksudası düşük yaraya uygulanır ise yarayı kurutur.
Hidrojeller	• Yüzeysel yaralanmalar • Eksudası düşük yaralar	Anti bakteriyellik oranı düşüktür. Hidrojel yara örtücüler kullanım esnasında ikincil pansuman yani ek bir sargı bezi takviyesine ihtiyaç duyar. Sadece yüzeysel yaralanmalarda tercih edilebilir.
Kitosan	• Yanık yaralarında • Diyabet kaynaklı ülser • Yatak yaraları • Yüksek eksudalı yaralar	İkincil bir pansuman takviyesine ihtiyaç duyulabilir. Yenilenebilir kaynak olması, biyouyumlu ve biyoçözünür olması üretim için avantaj sağlamaktadır. Anti-bakteriyel özelliği ve yara yüzeyindeki istenmeyen eksudayı absorplama özelliği yüksektir.
Selüloz	• Yanık • Ülser	Tek başına yara örtücü özelliği için yeterli değildir. Yaraya yapışır. Bu özellik bazı yara tipleri için avantaj iken bazıları için dezavantaj olmaktadır.
Gümüş	• Basıç, venöz, diyabetik ülseri • Ameliyat sonrası yaralar • Enfekte olan veya enfekte riski yüksek derin yaralar	Yara onarımı en yüksek yara örtücülerdendir. Antibakteriyel özellikleri geniş performans aralığındadır. Dolgu malzemesi olarak da tercih edilebilir olması kullanım oranını artırılmaktadır.
Kollojen	• Enfekte olmayan yaralar • Kronik yaralar	Ağırlığının 10 katı kadar sıvıyı absorbe eder. Küçük kanamalar için tercih edilir. Performans aralığı tek başına az iken destekleyici yara örtüleri ile performans değeri artırılabilir. Anti bakteriyel özellikleri düşüktür.

Çalışmada ele alınan yara örtücülerin tercih edileceği durumlar aşağıda özetlenmiştir:

- Köpük yara örtücüler, yaranın nemli kalmasında,
- Kitosan (gümüş içerenler tercih edilir) yara örtücüler, antibakteriyellik özelliğinde,
- Kitosan, gümüş ve köpük yara örtücüler, pansuman ve zaman verimliliği için,
- Kitosan, aljinat ve kollojen yara örtücüler, eksudayı absorbe etmede,
- Aljinat ve kitosan yara örtücüler, yüksek eksudalı ağır yaralarda,
- Hidrokolloid yara örtücüler, düşük eksudalı ve ideal hava alışverişinde,
- Hidrojel yara örtücüler, yüzeysel yaralanma ve kanama olan yaralarda.

4. Sonuç

Yara örtücüler, son yıllarda gelişen materyaller ve yenilikçi çalışmalarda üzerinde en çok çalışılan konulardan birisidir. Bu çalışma ile görülmüştür ki yara örtücülerden beklenen sabit özellikler belirli olmakla birlikte yara hakkındaki karmaşık beklentiler kullanılması istenen yara örtücülerde değişikliğe neden olmaktadır. Bu komplike durumlardan bazıları sıralanırsa; yaranın türü, iyileşmeden beklenen süreç, hızlı/yavaş iyileşme, doku yenilenmesi beklentileri, uygulamadan beklenen kolaylık/zorluk,

antibakteriyel özellikler, diyabet gibi özel yara türleri şeklinde belirtilebilir. Bu konudaki güncel çalışmalarda öne çıkanlar; nemli ortam sağlamada daha iyi performans, antibakteriyel bariyer oluşturma, yaradaki hava geçirgenliğini sağlayabilme, yara dokusundaki yenilenmeye katkı sağlama, pansuman değişikliğinde doku zedelenmesi yapmama, varsa ilaç salınımımı yapabilme, hoş koku yayma, biyouyumluluk, ulaşılabilirlik ve ekonomiklik şeklinde sıralanabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye tamamıyla katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Anonim. Medical textiles market size, share, and trends 2025 to 2034. https://www.precedenceresearch.com/medical-textiles-market, 2025. (Erişim 21 Nisan 2025)

Abdelhady MM. Preparation and characterization of chitosan/zinc oxide nanoparticles for imparting antimicrobial and UV protection to cotton fabric. International Journal of Carbohydrate Chemistry 2012; 12.

Abdel-Mohsen AM., Abdel-Rahman RM., Hrdina R., Imramovsky A., Burgert L., Aly AS. Antibacterial cotton fabrics treated with core-shell nanoparticles. International Journal of Biological Macromolecules 2012; 50(5): 1245-1253.

Adhirajan N., Shanmugasundaram N., Shanmuganathan S., Babu M. Collagen-based wound dressing for doxycycline delivery: in-vivo evaluation in an infected excisional wound model in rats. Journal of Pharmacy and Pharmacology 2009; 61(12): 1617-1623.

Aras O., Kazancı M. Kullanılan farklı çözücülerin ipek fibroin-pva kompozit süngerlerin yapısına olan etkisi. Tekstil ve Mühendis 2019; 26(115): 224-232.

Arif D., Niazi MBK., Ul-Haq N., Anwar MN., Hashmi E. Preparation of antibacterial cotton fabric using chitosan-silver nanoparticles. Fibers and Polymers 2015; 16(7): 1519-1526.

Ather and Harding. Wound management and dressing, Rajendran, S. (Ed.). Advanced textiles for wound care. The Textile Institute Book Series, Second Ed. 2019; Woodhead Publishing.

Boateng JS., Matthews KH., Stevens HN., Eccleston GM. Wound healing dressings and drug delivery systems: a review. Journal of Pharmaceutical Sciences 2008; 97(8): 2892-2923.

Bruin P., Jonkman MF., Meijer HJ., Pennings AJ. A new porous polyetherurethane wound covering. Journal of Biomedical Materials Research 1990; 24(2): 217-226.

Bužarovska A., Selaru A., Serban M., Pircalabioru GG., Costache M., Cocca M., Gentile G., Averous L., Dinescu S. Biobased multiphase foams with ZnO for wound dressing applications. Journal of Materials Science 2023; 58(46): 17594-17609.

Candan C. https://www.tekstilteknik.com.tr/koku-buyuk-problem/ (Erişim Nisan 2018).

Chan KT., Song X., Shen L., Liu N., Zhou X., Cheng L., Chen J. Nisin and its application in oral diseases. Journal of Functional Foods 2023; 105: 105559.

Chen XJ., LV AF., Gao J., Wang L. Moisture dressings: A new revolution in wound care, Proceedings of 2012 International Forum on Biomedical Textile Materials. June 8-9, 2012, Shanghai, China, 2012;243-246.

Christgau M., Caffesse RG., Schmalz G., D'Souza RN. Extracellular matrix expression and periodontal wound-healing dynamics following guided tissue regeneration therapy in canine furcation defects. Journal of Clinical Periodontology 2007; 34(8): 691-708.

Chu HQ., Xiong H., Zhou XQ., Han F., Wu ZG., Zhang P., Huang XW., Cui YH. Aminoglycoside ototoxicity in three murine strains and effects on NKCC1 of striavascularis. Chinese Medical Journal 2006;119(12): 980-985.

Clark M. Alginates in dressings and wound management. In Alginates and Their Biomedical Applications 2017; (pp. 213-22). Singapore: Springer Singapore.

Das S., Baker AB. Biomaterials and nanotherapeutics for enhancing skin wound healing. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 2016; 4: 82.

Ersoy Y., Duran M., Tayyar AE. Tıbbi tekstiller ve yara örtüsü. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2015; 3: 451-458.

Ertekin G., Marmaralı A. The compression characteristic of weft knitted spacer fabrics. Journal of Textile & Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon 2012; 22(4).

Gouda M., Hebeish A. Preparation and evaluation of cuo/chitosan nanocomposite for antibacterial finishing cotton fabric. Journal of Industrial Textiles 2010; 39(3): 203-214.

Gunes OC., Ziylan Albayrak A. Antibacterial polypeptide nisin containing cotton modified hydrogel composite wound dressings. Polymer Bulletin 2021;78(11): 6409-6428.

Gupta B., Agarwal R., Alam MS. Textile-based smart wound dressing, Indian Journal of Fibre & Textile Research 2010; 35: 174-187.

Hanna JR., Giacopelli JA. A review of wound healing and wound dressing products. The Journal of Foot and Ankle Surgery 1997; 36(1): 2-14.

Horch RE., Bleiziffer O., Kneser U. Physiology and wound healing. Plastic and Reconstructive Surgery 2010; (pp. 3-10), London: Springer London.

Hargis A., Yaghi M., Bermudez NM., Gefen A. Foam dressings for wound healing. Current Dermatology Reports 2024; 13(1): 28-35.

Hu J., Xiao ZB., Zhou RJ., Ma SS., Li Z., Wang MX. Comparison of compounded fragrance and chitosan nanoparticles loaded with fragrance applied in cotton fabrics. Textile Research Journal 2011; 81(19): 2056-2064.

Islam S., Arnold L., Padhye R. Application of chitosan on wool-viscose nonwoven for wound dressing, Journal of Biobased Materials and Bioenergy 2013; 7(4): 439-443.

Jayakumar R., Prabaharan M., Kumar PS., Nair SV., Tamura HJBA. Biomaterials based on chitin and chitosan in wound dressing applications. Biotechnology Advances 2011; 29(3): 322–337.

Jiang S., Deng J., Jin, Y., Qian B., Lv W., Zhou Q., Mei E., Neisiany RE., Liu Y., You Z., Pan J. Breathable, antifreezing, mechanically skin-like hydrogel textile wound dressings with dual antibacterial mechanisms. Bioactive Materials 2023; 21: 313-323.

Joshi M., Purwar R. Composite dressings for wound care, In Advanced Textiles for Wound Care, Woodhead Publishing Series in Textiles 2019; 313-327.

Khan R., Haider S., Wahit MU., Rahman SU., Hameed S., Haider A., Aqif M., Bukhari IA., Abd Razak SI. Preparation of amine-functionalized polyacrylonitrile-TiO_2-chitosan multilayer nanofibers as a potential wound dressing: Characterization and investigation of in vitro cell viability, proliferation and antibacterial study. International Journal of Biological Macromolecules 2025; 141006.

Kim JO., Choi JY., Park JK., Kim JH., Jin SG., Chang SW. Development clindamycin-loadedwound dressing with polyvinylalcohol and sodiumalginate. Biological and Pharmaceutical Bulletin 2008; 31(12): 2277-2282.

Kumar TRS., Bai MV., Krishnan LK. A freeze-dried fibrin disc as a biodegradable drug release matrix. Biologicals 2004; 32(1): 49-55.

Kuram E. Natural fiber-based polymer composites for biomedical applications. Journal of Biomaterials 2024; 1-58.

Kurtoğlu AH., Karataş A. Yara tedavisinde güncel yaklaşımlar: modern yara örtüleri. Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi 2009; 38(3): 211-232.

Lazovic G., Colic M., Grubor M., Jovanovic M. The application of collagen sheet in open wound healing, Ann. Burns Fire Disasters 2005; 18: 151-158.

Lee SM., Park IK., Kim YS., Kim HJ., Moon H., Mueller S., Jeong YI. Physical, morphological, and wound healing properties of a polyurethane foam-film dressing. Biomaterials Research 2016; 20(1): 15.

Luo Y., Kirker KR., Prestwich GD. Crosslinked hyaluronic acid hydrogel films: New biomaterials for drug delivery. Journal of Controlled Release 2000; 69: 169-184.

Lyu Y., Yu L., Qi L., Meng J., Wang Y., Liu Y., Xue T., Zhi C. Construction of 3D-fabric-based triple-decker agar/sodium alginate/Ca2+ dual-network composite for wound dressing. International Journal of Biological Macromolecules 2025; 304: 140883.

Mai LM., Lin CY., Chen CY., Tsai YC. Synergistic effect of bismuth subgallate and borneol, the major components of Sulbogin® on the healing of skin wound. Biomaterials 2003; 24(18): 3005-3012.

Mo M., Wu C., Chen Y. Bacterial cellulose-based superabsorbent hydrogel for wet wound dressing. Molecules 2025; 30(3): 737.

Montaser A., Rehan M., El-Senousy WM., Zaghloul S. Designing strategy for coating cotton gauze fabrics and its application in wound healing. Carbohydrate Polymers 2020; 244: 116479.

Oh EJ., Park KT., Kim KS., Kim JS., Yang JA., Kong JH. Target specific and long-acting delivery of protein, peptide and nucleotide therapeutics using hyaluronic acid derivatives. Journal of Controlled Release 2010; 141(1): 2-12.

Paul W., Sharma C. Chitosan and alginate wound dressings: a short review. Trends Biomaterials Artificial Organs 2004; 18(1): 18-23.

Pinho E., Soares G. Functionalization of cotton cellulose for improved wound healing. Journal of Materials Chemistry B 2018; 6: 1887-1898.

Pinho E., Soares G., Henriques M., Grootveld M. Antibacterial activity of textiles for wound treatment. AATCC Journal of Research 2015; 2(5): 1-7.

Patil PP., Reagan MR., Bohara RA. Silk fibroin and silk-based biomaterial derivatives for ideal wound dressings. International Journal of Biological Macromolecules 2020; 164: 4613-4627.

Punjataewakupt A., Aramwit P. Wound dressing adherence: A review, Journal of Wound Care 2022; 31(5): 406-423.

Purna SK., Babu M. Collagen based dressings - A review. Burns 2000; 26(1): 54–62.

Qin Y. The characterization of alginate wound dressings with different fiber and textile structures. Journal of Applied Polymer Science 2006; 100: 2516-2520.

Rao BR. Kumar R., Haque S, Kumar JM., Rao TN, Kothapalli RV., Patra CR. Ag2[Fe(CN)5NO]-fabricated hydrophobic cotton as a potential wound healing dressing: An in vivo approach. ACS Applied Materials Interfaces 2021; 13(9): 10689-10704.

Resmi G., Amsamani S. Antibacterial and wound healing efficacy of *Chromolaena* odorata treated dressings. Indian Journal of Fibre Textile Research 2022; 47(1): 78-86.

Rodeigues M., Thilagavati, G. Development and study of textile–based hydrogel wound dressing material, Industria Textila 2022; 73(1): 40-47.

Ruszczak Z., Friess W. Collagen as a carrier for on-site antibacterial drugs. Advanced Drug Delivery Reviews 2003; 55(12), 1679-1698.

Sağlam M., Baran Ş. Tekstil sektörünün geleceği: Mevcut durum değerlendirmesi ve gelecek öngörüleri 2025; MÜSİAD Teknik Rapor, ss.1-88, MÜSİAD Tekstil, Deri ve Hazır Giyim Sektör Kurulu Raporu,
URL:https://avesis.ticaret.edu.tr/yayin/baa489af-dc6d-4119-9187-abfafe32fe79/tekstil-sektorunun-gelecegi-mevcut-durum-degerlendirmesi-ve-gelecek-ongoruleri (Erişim 13 Mayıs 2025).

Sabır EC., Taş M., Küçükgülmez A. Karides atıklarından Elde Edilen Kitosan Biyopolimerinin Yünlü Kumaşların Antibakteriyel Özellikleri Üzerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2017; 32(3): 47-54.

Schultz GS., Sibbald RG., Falanga V., Ayello EA., Dowsett C., Harding K., Romanelli M., Stacey MC., Teot L., Vanscheidt W. Wound bed preparation: A systematic approach to wound management. Wound Repair and Regeneration 2003; 11(1): 1-28.

Sinno H., Prakash S. Complements and the wound healing cascade: an updated review. Plastic Surgery International 2013; 1: 146764.

Sorourian G., Pourmadadi M., Yazdian F., Rashedi H., Nigjeh MN., Sorourian M., Pandey S. Preparation of antibacterial nanofiber nanocomposites based on bacterial cellulose. BioNanoScience 2025; 15(2): 238.

Söğüt R., Sabır EC. Yara örtücü malzemeler. 9. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Kongresi, 16-17 Nisan 2023, İstanbul.

Söğüt R. Yara örtücü ve yapay doku alanlarında tekstil kompozitlerinin kullanımı ve performans araştırması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi 2021; (Ulusal Tez Merkezi Tez No: 672623).119 sayfa. Adana/Türkiye.

Speakman JB., Chamberlain NH. The production of rayon from alginic acid. Journal of the Society of Dyers and Colourists 1944; 60(10): 264-272.

Steenfos HH. Growth factors and wound healing. Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery and Hand Surgery 1994; 28(2): 95-105.

Suarato G., Bertorelli R., and Athanassiou A. Borrowing from nature: Biopolymers and biocomposites as smart wound care materials. Front Bioeng Biotechnol 2018; 6 (Oct): 1–11.

Sun XZ., Wu JZ., Wang HD., Guan C. Thermosensitive Cotton textile loaded with cyclodextrin-complexed curcumin as a wound dressing. Fibers and Polymers 2021; 22(9): 2475–2482.

Tassw DF., Birlie B., Mamaye T. Nanotechnologies past, present and future applications in enhancing functionality of medical textiles: a review. The Journal of The Textile Institute 2024; 1-21.

Thomas V, Bajpai M, Bajpai SK. In situ formation of silver nanoparticles within chitosan-attached cotton fabric for antibacterial property. Journal of Industrial Textiles 2011; 40(3): 229-45.

Thomason HA., Lovett JM., Spina CJ., Stephenson C., Mcbain AJ., Hardman MJ. Silver oxysalts promote cutaneous wound healing independent of infection. Wound Repair Regen 2018; 26: 144–152. doi: 10.1111/wrr.12627

Tyrone JW., Mogford JE., Chandler LA., Ma C., Xia Y., Pierce GF., Mustoe TA. Collagen-embedded platelet-derived growth factor DNA plasmid promotes wound healing in a dermal ulcer model. Journal of Surgical Research 2000; 93(2): 230-236.

Ueno H., Yamada H., Tanaka I., Kaba N., Matsuura M., Okumura M., Kadosawa T., Fujinaga T. Accelerating effects of chitosan for healing at early phase of experimental open wound in dogs. Biomaterials 1999; 20: 1407-1414.

Üreyen ME., Çavdar A., Koparall AS., Doğan A. Yeni geliştirilen gümüş katkılı antimikrobiyal tekstil kimyasalı ve bu kimyasal ile işlem görmüş kumaşların antibakteriyel performansları. Tekstil ve Mühendis 2008; 15(69): 25-31.

Wang XD., Russel SJ. Antimicrobial textile materials in healthcare and medical wound dressings, Proceedings of 2009 International Textile Science and Technology Forum 2010; 10-17.

Xu D., Feng Y., Song M., Zhong X., Li J., Zhu Z., Wang J. Smart and bioactive electrospun dressing for accelerating wound healing. Chemical Engineering Journal 2024; 496: 153748.

Yang Y., Hu H. Spacer fabric-based exuding wound dressing–Part II: Comparison with commercial wound dressings. Textile Research Journal 2017; 87(12): 1481-1493.

Yang Y., Bechtold T., Redl B., Caven B., Hu H. A novel silver-containing absorbent wound dressing based on spacer fabric. Journal of Materials Chemistry B 2017; 5(33): 6786-6793.

Yıldırım N., Küçük İ. Sarı kantaron (Hypericum perforatum) katkılı kitosan ve jelatin esaslı yara örtücü filmlerinin üretimi ve karakterizasyonu (Preparing and characterization of St.John's Wort (Hypericum perforatum) incorporated wound dressing films based on chitosan and gelatin), Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2020; 35(1): 127-135

Yuan N., Shao K., Huang S., Chen C. Chitosan, alginate, hyaluronic acid and other novel multifunctional hydrogel dressings for wound healing: A review, International Journal of Biological Macromolecules 2023; 240: 124321.

Zheng L., Li S. Luo J., Wnag X. Latest advances on bacterial cellulose-based antibacterial materials as wound dressings. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 2020; 8: 593768.

Zong S., Zhang H., Ma Z., Xin Q., Lu Y., Shi P. Qin M., Li J., Sing C. Recent advancements in wound management: Tailoring super wettable bio-interfaces. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 2022; 10: 1106267.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2617-2634, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2617-2634, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Teknolojinin İş Sağlığı ve Güvenliği Üzerindeki Yansımaları: Dijitalleşme ve Yenilikler

Derya ÇEVİK TAŞDEMİR[1*]

[1]Gaziantep Üniversitesi Oğuzeli MYO, Gaziantep

[1]https://orcid.org/0000-0002-0006-9652
*Sorumlu yazar: deryaceviktasdemir@gmail.com

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 15.03.2025
Kabul tarihi:08.06.2025
Online Yayınlanma:15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
İş sağlığı ve güvenliği
Dijitalleşme
Operatör 4.0
Operatör 5.0

ÖZ

Teknoloji, birçok alanda gelişim göstererek karşımıza çıkmakta ve beraberinde olumlu ve olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Hayatımızın her alanında yaygın olarak kullanılan teknolojinin, çalışma ortamlarına getirdiği yadsınamaz bir gerçekliktir. Bu nedenle, çalışma ortamının temel unsurları olan çalışanların ve işverenlerin bu teknolojik değişime uyum sağlaması gerekmektedir. Bu makalede, önemli bir teknolojik gelişme olarak kabul edilen dijitalleşmenin İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) üzerindeki etkileri ve bu alandaki yeni teknolojik uygulamalar örnekleriyle ele alınmaktadır. Teknolojik gelişmeler, Endüstri 4.0 ve Operatör 5.0 kavramları ile İSG alanındaki dijitalleşme eğilimleri çerçevesinde ilişkilendirilerek güncel gelişmelerin farklı bakış açılarından aktarılması hedeflenmektedir. Bu makale, birçok çalışan için çalışma ortamında yerleşik ve zorlayıcı kurallar içeren İSG algısının yeniden değerlendirilmesine katkı sunmasının yanı sıra, akademik alanda bu konudaki tartışmalara yeni bir boyut kazandıracağı ve işverenlere de dijitalleşmenin İSG uygulamalarındaki potansiyelini anlama ve uygulama konusunda yol gösterici olacağı değerlendirilmektedir.

Reflections of Technology on Occupational Health and Safety: Digitalization and Innovations

Reviews

Article History:
Received: 15.03.2025
Accepted: 08.06.2025
Published online:15.12.2025

Keywords:
Occupational health and safety
Digitalization
Operator 4.0
Operator 5.0

ABSTRACT

Technology has been developing in many areas and has positive and negative consequences. It is an undeniable reality that technology, which is widely used in all areas of our lives, brings to working environments. Therefore, employees and employers, who are the basic elements of the working environment, need to adapt to this technological change. In this article, the effects of digitalisation, which is considered as an important technological development, on Occupational Health and Safety (OHS) and new technological applications in this field are discussed with examples. It is aimed to convey current developments from different perspectives by associating technological developments, Industry 4.0 and Operator 5.0 concepts within the framework of digitalisation trends in the field of OHS. In addition to contributing to the re-evaluation of the perception of OHS, which includes established and coercive rules in the working environment for many employees, this article is expected to bring a new dimension to the discussions on this issue in the academic field and to guide employers in understanding and implementing the potential of digitalisation in OHS practices.

To Cite: Çevik Taşdemir D. Teknolojinin İş Sağlığı ve Güvenliği Üzerindeki Yansımaları: Dijitalleşme ve Yenilikler. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2617-2634.

1. Giriş

Günümüzde toplumun her yönünü dönüştürmek için teknolojinin kullanımına odaklanılmakta ve bu teknoloji; akıllı şehirler, akıllı fabrikalar, akıllı makineler gibi alışkın olmadığımız karmaşık yapıları beraberinde getirmektedir. Tüm dijital sistemlerin çalışan ile doğrudan ya da dolaylı etkisi bulunmaktadır. Bu sebeple dijital sistemlerin tasarımında İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) faktörlerinin dikkate alınması önem arz etmektedir.

Dijitalleşmenin üretim sistemlerine yeterli esneklikle uyumlaştırılamaması durumunda, beklenen faydalar olumsuz sonuçlara dönüşebilir. İnsan odaklı dijitalleşmedeki temel amaç; çalışanların "fiziksel", "bilişsel" ve "duygusal" yeteneklerini geliştirme yeterliliği kazandırmaktır. Özellikle Operatör 4.0 yaklaşımı, endüstri 4.0 kapsamında çalışanların dijital araçlarla desteklenmesini ve üretkenliklerinin artırılmasını hedeflerken, Operatör 5.0 ise insan merkezli bir yaklaşımla çalışanların refahını ve güvenliğini ön planda tutarak daha sürdürülebilir ve güvenli çalışma ortamları oluşturmayı amaçlamaktadır. Örneğin, Operatör 4.0 tipolojisini temel alan İşbirlikçi Operatör 4.0 yaklaşımı, fiziksel görevlerde işbirlikçi robotlar (cobot'lar) doğrudan etkileşim içinde çalışmanın insanlar için faydalarını ortaya koymaktadır. Diğer bir ifadeyle işbirlikçi robotlar, insanlar ve robotlar fiziksel görevleri yerine getirirken farklı düzeylerde işbirliğine izin verir ve "fiziksel" yeterlilik kazandırır. Akıllı Operatör 4.0 yaklaşımı, insanların yazılım robotlarıyla çalışmasının ne gibi avantajları olduğunu açıklıyor. Yazılım robotları sayesinde insanlar, farklı ve karmaşık robotlarla sanki bir insanla etkileşim kuruyormuş gibi kolayca iletişim kurabiliyor. Bu durum, çalışanlara akıllı sistemleri kullanarak birlikte problem çözmek gibi "düşünsel" görevleri daha iyi yapma ve yeteneklerini geliştirme fırsatı sunuyor (Ruppert ve ark., 2022; Gladysz ve ark., 2023). Bilişsel modelleme, güvenli ve verimli insan-robot ve insan-yapay zeka işbirliği için çalışan davranışını anlama ve tahmin etme konusunda güçlü bir araçtır (Stefana ve ark., 2021; Ruppert ve ark., 2022). Çalışan davranışlarının sebeplerini anlamak ve dolayısıyla bu davranışları öngörmek; İSG' nin gelişimi ve davranış odaklı İSG' ni oluşturmak için oldukça önemlidir (Grindle ve ark., 2000; Nişancı Demirören, 2020). Çeşitli bilgi ve becerilere, farklı kültürlere ve eğitim düzeylerine sahip işçilerin dijital ya da modern üretim gücüne dâhil olmalarının oldukça zor olduğu kabul edilmeli ve bu uyarlama için sosyal perspektiflerin oluşturulması gerekmektedir. Bu bağlamda, bu çalışma, dijital dönüşümün İSG üzerindeki etkilerini ve Operatör 4.0 ve 5.0 gibi yeni nesil operatör yaklaşımlarını incelerken, aynı zamanda İSG alanındaki evrimi İSG 4.0 ve İSG 5.0 kavramları çerçevesinde ele alarak alanyazına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Mevcut bulgular, insan-makine işbirliğinin potansiyel faydalarını ve bilişsel modellemenin İSG uygulamalarındaki önemini vurgulayan diğer çalışmalarla örtüşmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, İSG profesyonelleri, işverenler ve akademisyenler için dijitalleşme süreçlerinde insan odaklı yaklaşımların benimsenmesinin ve çalışanların adaptasyonunu destekleyici stratejiler geliştirilmesinin önemini vurgulayarak pratik uygulamalara ve gelecekteki araştırmalara yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır.

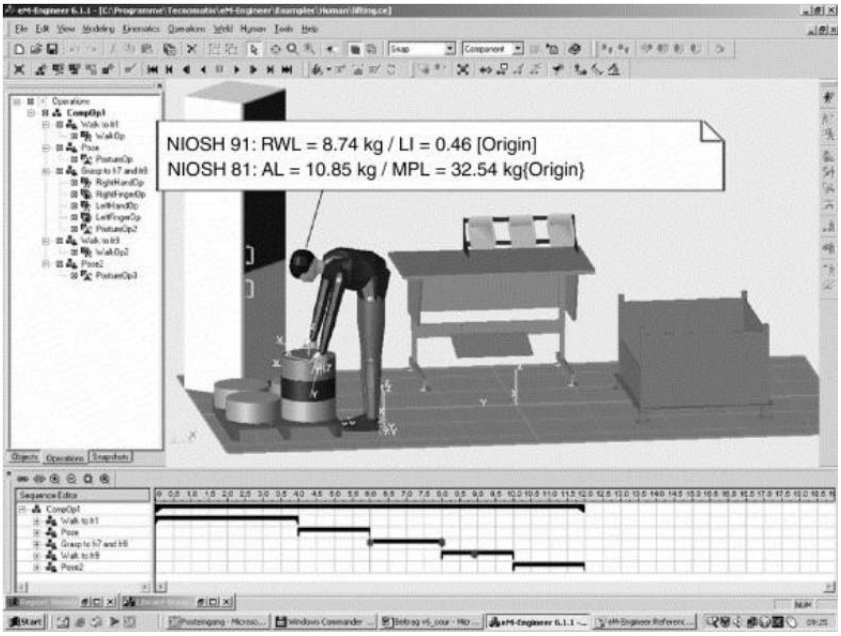
2. Dijital Fabrikalar, Akıllı ve İşbirlikçi Üretim Alanları (ICMS)

Dijital fabrika, bir üretim sisteminin temel süreçleri ve kaynakları açısından planlanmasını, gerçekleştirilmesini, işletilmesini ve sürekli iyileştirilmesini destekleyen dijital yöntemler, modeller ve araçlar ağıdır. Dijital fabrika kapsamında işletme yönetimi, üretim mühendisliği ve organizasyonel konular tartışılıyor olsa da İSG ile ilgili konular da ele alınmaya başlamıştır (Zülch ve Grieger, 2005).

3D modelleme veya simülasyon programları gibi bir dizi araçla, üretim süreçleriyle birlikte bölgesel olarak veya işyerlerinin tamamının dijital görüntüsü oluşturulabilmektedir. Böylece, simülasyonlar aracılığıyla planlanan sistemdeki zayıflıkların incelenmesi yapılabilmektedir.

Üretimin en önemli parçası kuşkusuz ki insandır. Ancak üretimin tüm yönlerinin bütünsel modellemesi, özellikle de insan faktörünün modellenmesi insanın karmaşık yapısı nedeniyle oldukça zordur. Çünkü çalışanlar; takım tezgâhları, robotlar, bilgisayar sistemleri, diğer çalışanlar vb. gibi farklı üretim kaynakları ile bütünleşik olarak çalışır. Bütün bunlara ek olarak, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG), genel üretim performansı, mevcut üretim araçları, işgücü eğitimi ve işçiler arasındaki etkileşim gibi çeşitli faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu bağlamda, İSG'nin geliştirilmesi için Akıllı İşbirlikçi Üretim Alanlarına (ICMS) veya akıllı fabrikalara duyulan ihtiyaç belirginleşmektedir. ICMS ve akıllı fabrikalar, kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılamak üzere genişletilebilen modüler bileşenlerden oluşmaktadır. ICMS, yarı otomatik üretim sistemlerinde gerçek zamanlı izlemeye dayalı kontrol mekanizmaları sağlamayı amaçlamaktadır. Bu sayede, insan ve makine arasında hassas bir iş birliği ortamı tesis edilerek üretim süreçlerinin optimizasyonu hedeflenmektedir. ICMS' nin temel odak noktası, üretim süreçlerinin daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamak ve bu süreçlerdeki insan-makine etkileşimini iyileştirmektir (Nagy ve ark., 2022). Böylelikle otomasyonla ilgili hataların ve kazaların nedenleri önlenebilir (Ruppert ve ark., 2022).

Dijital fabrikalar kapsamında yapılan ergonomik araştırmalar; İSG' nin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Ergonomi, insan-makine ve insan-bilgisayar etkileşimlerini iyileştirerek sistemlerin performansını iyileştirme amacını taşır. Bu kapsamda önleyici bir işlevde kullanılmasının yanında, mevcut bir iş sisteminin yeniden tasarlanmasında başarıyla uygulanabilmektedir (Stefana ve ark., 2021). İnsan-makine etkileşimlerinin etkili bir şekilde planlanması ve doğrulanması için Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü (NIOSH) tarafından belirlenen standartlar, Hızlı Üst Ekstremite Değerlendirmesi (RULA) gibi ergonomik analiz araçlarında kullanılır. Bu standartlar, işyerlerindeki fiziksel etmenleri değerlendirerek, çalışanların üst vücut pozisyonlarını analiz eder ve olası ergonomik riskleri belirlemeye yardımcı olur. Ayrıca, İSG açısından uygun önlemler alınabilir ve çalışma koşulları daha güvenli hale getirilebilir. Bu üst düzey analizler üretim ve robotik sistemlerin bilgisayar simülasyonu ile gösterilir (Kakaraparthi ve ark., 2022). Şekil 1'de bir işyerinin ergonomik açıdan incelenmesi gösterilmektedir.



Şekil 1. Bir işyerinin ergonomik incelenmesi (Zülch Grieger, 2005)

Bu inceleme, çalışanların fiziksel etkileşimlerini ve üst vücut pozisyonlarını değerlendirerek potansiyel ergonomik riskleri belirlemeyi amaçlar. NIOSH standartları ve RULA gibi araçlar kullanılarak gerçekleştirilen bu analizler, İSG' ni iyileştirmek için alınması gereken önlemlerin belirlenmesine yardımcı olur. Üretim ve robotik sistemlerin bilgisayar simülasyonları aracılığıyla bu tür üst düzey analizlerin gösterilmesi, insan-makine etkileşimlerinin etkili bir şekilde planlanması ve doğrulanması açısından kritik bir öneme sahiptir (Kakaraparthi ve ark., 2022).

Psikososyal risk faktörleri arasında yer alan ve İSG' nin yanında iş tatmini, iş doyumu vb. birçok kavramla bağlantılı olan "stres" kavramı, dijital fabrikalar içinde de yerini almıştır. Birçok çalışmayla fiziksel risk etmenlerinin (gürültü, aydınlatma, termal konfor vb.) stresi etkilediği bunun da dolaylı olarak çalışan sağlığını etkilediği bilinmektedir (Clarke Cooper, 2004; Aytac, 2015). Gelişen teknolojilerde Çalışma Yeri Tanılama ve Optimizasyon Modülü (ADAMO) gibi programlar aracılığıyla bağımsız değişkenlerin stresi nasıl etkilediği belirlenebilmektedir (Zülch ve Grieger, 2005). Bu tür yazılımlar, işyeri ortamındaki çeşitli faktörlerin (örneğin, iş yükü, çalışma saatleri, sosyal destek eksikliği gibi psikososyal risk etmenleri) çalışanlar üzerindeki stres düzeyine etkisini analiz etmeye olanak sağlamaktadır. Dijital fabrika ortamlarında simülasyon ve modelleme ile farklı senaryoların stres üzerindeki potansiyel etkileri önceden değerlendirilebilir ve böylece daha sağlıklı ve ergonomik çalışma koşulları tasarlanabilir (Zülch ve Grieger, 2005).

3. Operatör 4.0

Mevcut ve gelecekteki iş sistemlerinin tasarımında dijitalleşme ve bağlantının yaygınlaşması, Endüstri 4.0'ın temelini oluşturmaktadır ve bu durum, 'Operatör 4.0' kavramını da şekillendirmektedir. Akıllı dijital üretim ortamlarının yaygınlaşmasıyla, operatörlerin sağlığını, güvenliğini ve motivasyonunu desteklemeye yönelik yeni yaklaşımlar ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, siber-fiziksel sistemlerin entegrasyonuyla birlikte ortaya çıkan yeni risklerin dikkate alınması kritik önem taşımaktadır. Operatör 4.0, üretken yapay zeka ile donatılmış makinelerin, çevreleri ile bağımsız ve esnek bir şekilde etkileşim içinde canlı varlıklar gibi üretim faaliyetlerinde bulunduğu bir aşamayı temsil eder (Mishiba, 2024). Bu bağlamda Operatör 4.0, insan-otomasyon etkileşimini destekleyen ve giyilebilir teknolojileri içeren bir dizi temel bileşenleri konu almaktadır (Romero ve ark., 2018). Yenilikçi bir kavram olarak operatör 4.0, işbirlikçi ve güçlendirici teknolojilerin; hem çalışanlar hem de üretim sistemleri için sunduğu faydaları içermektedir (Gladysz ve ark., 2023). Bu sistem, çalışanların akıllı makinelere entegrasyonunu kolaylaştırmanın yanı sıra, 'akıllı operatörlerin' yeni beceriler ve yeteneklerle donatılmasını hedeflemektedir (Romero ve ark., 2016).

Ancak bu dönüşümde, insanı makineyle ikame etmekten ziyade, organizasyonların yeniden yapılandırılması ve mevcut insan yeteneklerinin dijital teknolojilerle optimize edilmesi ve geliştirilmesi üzerine odaklanılmalıdır. Gelecekteki iş sistemleri, insan faktörlerini göz önünde bulundurarak, operatörlerin güvenliğini ve etkinliğini en üst düzeye çıkaracak şekilde tasarlanmalıdır. İSG 4.0 ve siber-fiziksel sistemlerin ilerlemesi, Operatör 4.0'ın rolünü ve gereksinimlerini anlamak açısından hayati öneme sahip olup, İSG 5.0'a doğru evrilen iş sağlığı ve güvenliği yaklaşımlarının temelini oluşturmaktadır (Ávila-Gutiérrez ve ark., 2022).

Hem üretim süreçlerindeki karmaşıklıkların yönetilmesi hem de İSG' nin iyileştirilmesi için bilişsel ve fiziksel iş yüklerinin azaltılması kritik öneme sahiptir. Bilişsel yük, bir çalışanın belirli bir görevi tamamlarken harcadığı zihinsel çabayı ve bu çabanın, çalışanın bilişsel sistemi üzerindeki etkilerini ifade etmektedir. Bu anlayış doğrultusunda, İSG alanındaki sistemlerin geliştirilmesi sırasında sadece fiziksel yük değil, bilişsel yükler de Operatör 4.0 prensipleriyle uyumlu bir şekilde ele alınmalıdır.

3.1. Giyilebilir Dış İskelet Sistemleri ile Güçlendirilmiş Operatör

Giyilebilir dış iskelet sistemleri, insan vücuduna entegre edilerek operatörlerin doğal hareketlerine izin veren ve fiziksel güçlerini artırmak amacıyla tasarlanmış biyomekanik sistemlerdir. Bu konsept, endüstriyel uygulamalarda uzun yıllardır varlığını sürdürmekte olup, temel amacı operatörlerin manuel görevlerini yerine getirirken motorlu mekanizmalar aracılığıyla güçlerini desteklemektir. Giyilebilir dış iskelet sistemleri, iş süreçlerini basitleştirmenin yanı sıra, insan ve teknolojiyi bir araya getirerek fiziksel stresi önemli ölçüde azaltma potansiyeli sunar. Böylelikle, operatörlerin işlevselliği artırılırken eş zamanlı olarak iş güvenliği ve verimlilik düzeyleri de yükseltilmiş olur. Özellikle ağır eşyaların güvenli bir şekilde kaldırılması ve taşınması ile zorlu duruş pozisyonlarında daha uzun süre çalışabilme

yeteneğinin artırılması gibi konularda ilave güç sağlayarak, İş Sağlığı ve Güvenliğinin önemli bir dalı olan ergonomi açısından kayda değer avantajlar sunmaktadır (Romero ve ark., 2016).

Motorlu dış iskeletler genellikle operatörlere sadece ek koruma, destek ve güç sağlamakla kalmaz, aynı zamanda manuel operasyonların ergonomisini iyileştirerek ağır iş yükünden kaynaklanan yaralanmaları ve iş kazalarını azaltmada kritik bir rol oynayarak işgücünün sosyal sürdürülebilirliğine önemli katkılarda bulunur. Endüstriler bu sayede hem üretkenliklerini hem de iş kalitelerini artırabilirken, yaşlanmaya bağlı olarak fiziksel güçlerinde azalma yaşayan ancak değerli bilgi ve deneyime sahip operatörlerini kritik pozisyonlarda daha uzun süre istihdam etme imkanı bulabilirler (Romero ve ark., 2016). Giyilebilir teknolojilerin İSG uygulamalarındaki büyük potansiyeline rağmen, bu teknolojilerin etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi bazı temel gereksinimlere bağlıdır (Mishiba, 2024). Öncelikle, giyilebilir cihazlar aracılığıyla sağlanan sağlık izleme verilerinin doğruluğu ve anlamlılığı, potansiyel sağlık sorunlarının erken aşamada tespit edilmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. İkinci olarak, bu cihazlardan elde edilen büyük miktardaki verinin analiz edilerek risk tahmin modelleri oluşturulması, iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesinde proaktif bir yaklaşım sunar. Ancak, bu sürecin başarısı için en kritik unsurlardan biri, çalışanların hassas sağlık bilgilerinin gizliliğini koruyacak uygun ve güvenli veri yönetimi sistemlerinin tesis edilmesidir. Şekil 2'de, Hyundai tarafından geliştirilen bir giyilebilir dış iskelet sistemi görülmektedir.



Şekil 2. Giyilebilir dış iskelet sistemleri (Hyundai Giyilebilir Robot, 2016)

Şekil 2'de görseli sunulan giyilebilir dış iskelet sistemleri, insan-makine etkileşimi kapsamında iş gücünü desteklemek ve ağır yüklerin taşınmasını kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. Görseldeki dış iskelet, kullanıcının fiziksel kapasitesini artırarak özellikle sanayi, montaj ve bakım gibi fiziksel efor gerektiren alanlarda kas-iskelet sistemi hastalıklarının önlenmesine katkı sağlamaktadır. Ergonomik destek sağlaması açısından iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

3.2. Arttırılmış Gerçeklik ile Bilişsel Etkileşim

Artırılmış Gerçeklik (AG), akıllı operatörün gerçek dünyadaki fabrika ortamını, kendi çalışma alanına gerçek zamanlı olarak yerleştirilen dijital bilgi ve medya ile zenginleştiren bir teknolojidir. Bu nedenle AG, bilginin operatörün dijital dünyasından fiziksel dünyasına kesintisiz bir şekilde aktarımını iyileştiren teknoloji olarak düşünülebilir. AG teknolojisi, insan hatalarını azaltan ve aynı zamanda özerkliği arttıran bir dijital yardım sistemi haline gelerek, manuel işlemler sırasında akıllı operatörü gerçek zamanlı olarak desteklemek için önemli avantajlar sunabilir (Romero ve ark., 2016). Ayrıca, makine kaynaklı yaşanabilecek iş kazalarının azalmasına olanak tanıyabilir.

3.3. Sanal Gerçeklik ile Bilişsel Etkileşim

Sanal teknolojilerin gelişmesiyle birlikte, sanal gerçeklik (SG) güvenlik eğitiminin uygulanması konusu kabul görmüştür. Geleneksel eğitim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, SG kullanıcıların risksiz bir ortamda çalışma sahasına erişmeleri için bir platform sunmaktadır. Sanal simülasyonla etkileşim, cihaz çalıştırma deneyimi ve ayrıca 'neden-sonuç' öğrenmesi sunar (Ji ve ark., 2023). Deneyime dayalı öğrenme, güvenlik davranışı için önemlidir. Çünkü deneyim eksikliği gerçekçi olmayan iyimserliğe yol açabilmektedir (Zeitlin, 1994), bu da iş kazalarının temelinde önemli yer edinen 'bana bir şey olmaz' anlayışını beraberinde getirmektedir. SG, çalışanların eğitiminde dünyanın birçok yerinde yararlanılan bir teknolojidir. Bu teknoloji sayesinde kullanıcılar sanal gerçeklik ortamında hata yapabilir ve sonuçlarını uygulamalı olarak görebilirler. Böylelikle, öğrenme daha etkili hale gelmektedir.

3.4. Giyilebilir Takip Cihazları ile Sağlıklı Operatör

Giyilebilir Takip Cihazları, egzersiz aktivitelerini, stres seviyelerini, kalp atış hızını ve diğer sağlık ölçümlerini ölçmek için tasarlanmış cihazlardır. Giyilebilir cihazlar, kısa sürede tüketici elektroniği pazarında önemli bir konuma gelmekle beraber ve birçok endüstrinin ihtiyaçlarını karşılamanın yeni bir yolu olarak görülüyor. İSG sektörü de bunlardan biri. Örneğin, inşaat sektöründe, inşaat işçilerinin yakınlık tespiti ve fizyolojik izlenmesi yoluyla sağlık ve güvenlik yönetimi için iş yerinde giyilebilir cihazların kullanımı (Choi ve ark., 2017); lojistik sektöründe, ellerin kullanılmasını gerektirmeyen işleri basitleştirmek için giyilebilir barkod tarayıcı eldivenlerin kullanılması, ve bazı şirketlerin, çalışanların sağlıklı beslenme alışkanlıklarını teşvik etmek ve kurumsal refahı iyileştirmek için giyilebilir cihazların kullanımını bunlar arasında sıralanmaktadır (Mardonova Choi, 2018).

Ayrıca, çalışma ortamında giyilebilir cihazlar sayesinde takip edilebilecek stres seviyeleri ile insan hatalarının önüne geçilebileceği düşünülmektedir. Benzer şekilde, kapalı alanlara girişlerde kullanılan gaz ölçüm cihazlarına sistemin entegre edilmesiyle ölümcül iş kazalarının önüne büyük oranda geçilebileceği değerlendirilmektedir (Romero ve ark., 2016).

3.5. İş Birlikçi Robotlar

İşbirlikçi robotlar, çeşitli tekrarlayan ve ergonomik olmayan görevleri gerçekleştirebilen ve çalışmak üzere özel olarak tasarlanmış endüstriyel robotlardır. Yapay zeka destekli otonom robotların tanıtımıyla I4.0'ın operasyonel verimliliği artırması ve risklerin azalması beklenmektedir (Sanchez-Pi ve ark., 2015). Kolay atölye programlaması da dahil olmak üzere güvenlik (örneğin kuvvet algılama ve çarpışma) ve sezgisel etkileşim teknolojileri aracılığıyla akıllı operatörle doğrudan işbirliği içinde bulunurlar ve güvenlik bariyerlerine ihtiyaç duymazlar (Romero ve ark., 2016). İşbirlikçi robotlar güvenlik bariyerine ihtiyaç duymasa da çalışanları korumak için tehlikeli robot alanlarına erişimi kısıtlamak önemlidir. Çünkü çalışanlar kalite kontroller için sürece müdahale etmek veya malzeme teslim etmek üzere robota güvenli bir şekilde erişmeye ihtiyaç duyabilirler (SICK, 2019). Bu nedenle işbirlikçi robotların türü ne olursa olsun, ekstra güvenlik önlemleri gerektiren pek çok uygulama vardır. Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) tarafından ISO/TS 15066 standardı yayınlanmıştır. Bu standart endüstriyel robot sistemleri için güvenlik gereksinimlerini ve işbirlikçi robotların güvenli bir şekilde çalıştırılmasına ilişkin rehberliği kapsamaktadır.

İşbirlikçi robotların popüler örnekleri ülkemizde sadece fabrikalarda değil gıda, sağlık alanı gibi çeşitli hizmet sektörlerinde de karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca uzun vadede maliyetlerden de tasarruf sağlayacağı değerlendirilmektedir.

3.6. İnsan Siber Fiziksel Sistemler

İnsan Siber Fiziksel Sistemler (İSFS), insanları, dijital teknolojileri ve fiziksel nesneleri bir araya getiren ve aralarındaki etkileşimi destekleyen çok katmanlı sistemlerdir (Li ve ark., 2022). Bu sistemlerde, insanların bir şeyi algılaması, değerlendirip karar vermesi ve buna göre hareket etmesi süreçleri, siber-fiziksel sistemlerin otomatik kontrol mekanizmalarıyla birlikte uyum içinde çalışır. Yani, insan beyni ve akıllı makineler sanki tek bir bütün gibi hareket ederek görevleri yerine getirerek daha karmaşık ve verimli sistemler oluşturulabilir. İSFS, insan faktörünü merkeze alarak, sistemin güvenliğini, verimliliğini ve performansını artırmayı hedefler. Özellikle sağlık hizmetleri, akıllı ulaşım sistemleri ve endüstriyel otomasyon gibi alanlarda, insan-makine iş birliğini optimize ederek daha esnek ve uyarlanabilir çözümler sunar. Bu sistemler, sensörler, veri analitiği ve yapay zeka gibi teknolojilerden yararlanarak, insan davranışlarını analiz eder ve sistem performansını iyileştirmek için geri bildirim sağlar. Örneğin, cerrahi robotlar, akıllı giyilebilir cihazlar ve otonom araçlardaki sürücü destek sistemleri bu kapsamda değerlendirilmektedir. İSFS, siber ve fiziksel sistemlerle insan iletişimini ve işbirliğini destekler. İSFS'in temel amaçları, bu sistemlerin öncelikle operatörlerin hem zihinsel hem de

bedensel gereksinimlerine uyum sağlayarak iş süreçlerini iyileştirmeyi hedeflediği görülmektedir. Bunu gerçekleştirmek için İSFS, insanların hem sanal hem de gerçek dünyada makinelerle dinamik ve kesintisiz bir etkileşim kurmasını sağlar. Bu etkileşim, akıllı insan-bilgisayar etkileşim teknikleriyle desteklenirken, Nesnelerin İnterneti ve giyilebilir teknolojiler gibi çeşitli yenilikçi araçlardan da faydalanılır. İSFS'lerin nihai amacı, insanların fiziksel, duyusal ve bilişsel yeteneklerini geliştirerek daha verimli, güvenli ve insan odaklı çalışma ortamları oluşturmaktır (Sun ve ark., 2020).

Bu sistemler; fiziksel üretim varlıkları ile bilişim sistemlerini eşzamanlı bir şekilde entegre ederek, sensör verilerini işleyip öğrenerek faaliyetlerini otomatik olarak düzenleyebilme kapasitesine sahiptir. Ayrıca, diğer siber-fiziksel varlıklarla ve insanlarla iletişim kurabilirler ve yüksek veri gizliliği ve güvenliği sağlayan arayüzler veya sistemler olarak tanımlanabilirler (Palamutçuoğlu ve Gerşil, 2022).

3.7. Akıllı Kişisel Koruyucu Ekipmanlar

Günümüzde kullan kişisel koruyucu donanımlar (KKD) pasif koruyucu ekipman olarak düşünülebilir. Gelişen teknoloji ve akıllı sistemlere eğilimden nasibini KKD'ler de alarak "aktif ve akıllı KKD" üretimi başlamıştır. Akıllı KKD (AKKD), temel olarak akıllı giyilebilir cihazların geliştirilmesi ve çalışma ortamı sensörlerinin entegrasyonu ile oluşturulmuştur. Gerçek zamanlı veri toplama ve analizini kullanarak akıllı KKD, tehlike tanımlama ve risk yönetimine proaktif bir yaklaşım sunar. Fizyolojik parametrelerin, çevre koşullarının ve potansiyel tehlikelerin izlenmesini sağlayarak, çalışanları anında geri bildirim ve erken uyarı sistemleriyle güçlendirir. Ayrıca, kablosuz bağlantı yoluyla çalışanlar arasında gelişmiş iletişim ve iş birliğini teşvik ederek acil durumlara zamanında yanıt verilmesini ve etkili koordinasyonu sağlar (Rasouli ve ark., 2024).

Genel olarak, AKKD'ler; çalışanları toksinler, yüksek sıcaklıklar veya gürültü seviyeleri gibi risk faktörlerine ve yakınından geçen tehlikeli nesnelere potansiyel maruziyet konusunda uyararak çalışanların sağlık ve güvenliğini etkin bir şekilde koruyabilir.

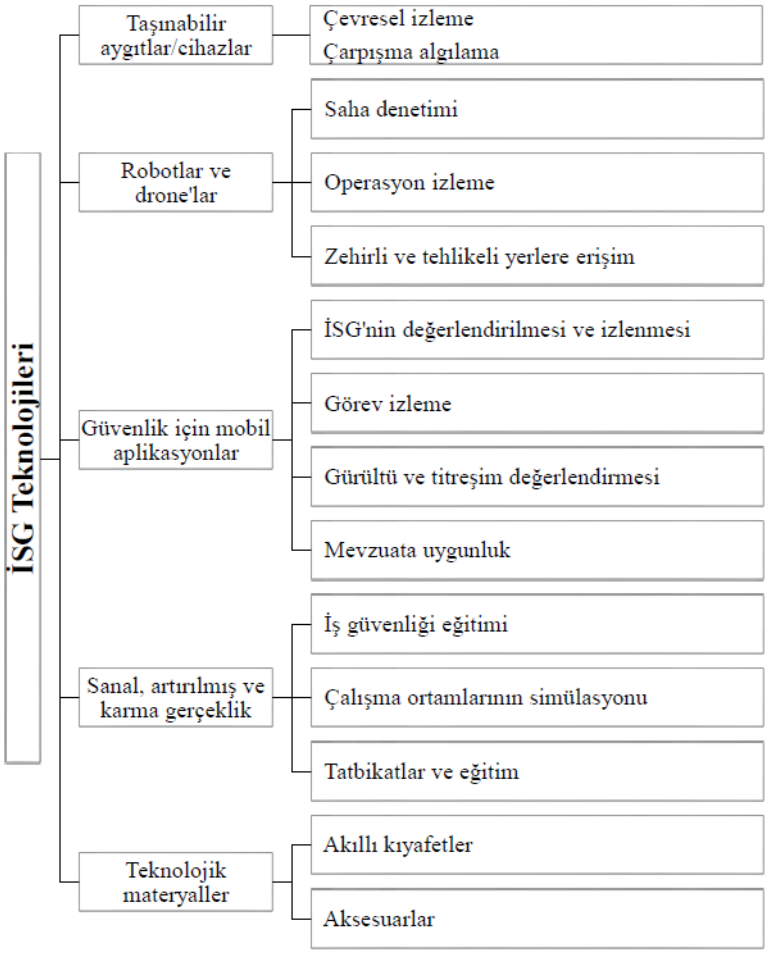
4. Operatör 5.0

Operatör 5.0, operatör 4.0 süreçlerinin sonuçlarına dayalı olarak geliştirilen bir kavramdır (Gladysz, 2023). Operatör rollerini daha özgün, esnek ve akıllı hale getirmeyi, operatörlerin otomasyon, yapay zeka ve diğer dijital teknolojilerle daha yakından işbirliği yapmalarını ve üretim süreçlerini daha verimli ve esnek bir şekilde yönetmelerini hedefler. Operatör 4.0 yaklaşımında çalışanlar daha çok izleme ve düzeltici müdahale görevleriyle ilişkilendirilirken 5.0 yaklaşımında çalışanlar, makinelerle ve diğer sistemlerle daha etkileşimli bir rol oynar. Diğer bir ifade ile operatör 4.0' da çalışanlar, belirli talimatları izlemek ve iş süreçlerini yönetmekle görevlidir. Ancak operatör 5.0 yaklaşımı operatörlerin daha fazla özgünlük ve esneklikle çalışmalarını destekler (Golovianko ve ark., 2023). Bu bilgiler doğrultusunda Operatör 5.0 yaklaşımının insan faktörünü daha fazla vurgulayan bir yaklaşım olduğunu ancak Operatör 4.0 yaklaşımının ise daha çok otomasyon ve dijitalleşme süreçlerini kapsadığını ifade etmek mümkündür (Nahavandi, 2019; Romero Stahre, 2021).

Endüstriyel dönüşümün bir sonraki aşaması olan Operatör 5.0 bağlamında, İSG de İSG 5.0 olarak adlandırılan yeni bir modele evrilmektedir. Bu durum, iş güvenliğinde köklü bir değişiklik anlamına gelmektedir. Artık riskleri daha iyi yönetmek ve tehlikeleri önceden görüp kontrol etmek için Yapay Zeka, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve anlık veri analizleri gibi modern teknolojiler kullanılmaktadır. İSG 5.0, değişen iş koşullarına ayak uyduran kapsamlı bir güvenlik sistemi kurmak için insan-makine etkileşimini sağlamaktadır. Burada amaç, güvenliği sadece bir zorunluluk olarak değil, işletme yönetiminin ayrılmaz bir parçası olarak gören bir anlayış oluşturmak. Bu sayede gerçek zamanlı bilgi paylaşımının olduğu, geçmişteki iş anlayışından farklı, bağlantılı bir çalışma ortamı oluşmaktadır (Pasman ve Behie, 2024). İSG 5.0, dijitalleşme ve bağlantının getirdiği yeni riskleri ele alırken, aynı zamanda İSG'nin yenilikçi, dijital ve kültürel dönüşümlerini birer değer kaynağı olarak görülmektedir. Avrupa Birliği'nin Gündem 2030 hedefleri, İSG 4.0'dan 5.0'a geçişi kolaylaştıracak bir çerçeve sunarken, bu geçişin güvenlik bilimi ve karmaşık sistemler perspektifinden ele alınması önem taşımaktadır. Gelecekteki İSG stratejileri, dijital teknolojileri insan odaklı bir yaklaşımla entegre ederek daha sürdürülebilir ve güvenli çalışma ortamları oluşturmayı hedeflemelidir (Ávila-Gutiérrez ve ark., 2022).

5. İSG Alanındaki Güncel Dijital Eğilimler

İSG alanında hızla gelişen teknolojiler, iş kazalarını önleme ve güvenli çalışma ortamları oluşturmada önemli bir rol oynamaktadır. Giyilebilir cihazlar, yapay zekâ, sanal gerçeklik, drone teknolojileri ve mobil uygulamalar gibi yenilikler, İSG profesyonellerine daha etkili araçlar olarak hizmet verme potansiyeline sahiptir. Anlık veri toplama, tehlikeli görevlerde robot kullanımı, kolay erişilebilir güvenlik bilgileri, risk simülasyonları ve teknolojik materyaller, modern İSG uygulamalarının temelini oluşturarak; iş süreçlerini daha güvenli ve verimli hale getirmektedir. Son on yılda İSG alanında bilimsel makalelerdeki yeni teknolojiler ve uygulamalar değerlendirildiğinde Şekil 3’de gösterilen sınıflandırmayı sunmak mümkündür (Flor-Unda ve ark., 2023).



Şekil 3. İSG teknolojileri (Flor-Unda ve ark., 2023).

Şekil 3'te belirtildiği gibi "İSG Teknolojileri" ana başlığı altında, taşınabilir aygıtlar/cihazlar, robotlar ve dronlar, güvenlik için mobil uygulamalar, sanal, artırılmış ve karma gerçeklik ve teknolojik materyaller olmak üzere beş temel kategori ile sıralanmaktadır. Her bir ana kategori, sağ tarafta daha spesifik uygulama alanlarına ayrılmıştır. Örneğin, taşınabilir aygıtlar/cihazlar çevresel izleme ve çarpışma algılama gibi amaçlarla kullanılırken, robotlar ve dronelar saha denetimi ve operasyon izleme gibi tehlikeli veya ulaşılması zor görevlerde değerlendirilmektedir. Güvenlik için mobil uygulamalar İSG'nin değerlendirilmesi ve takibi, görev izleme, gürültü ve titreşim değerlendirmesi ve mevzuata uygunluk gibi çeşitli işlevler sunmaktadır. Sanal, artırılmış ve karma gerçeklik teknolojileri ise iş güvenliği eğitimi, çalışma ortamlarının simülasyonu ve tatbikatlar için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Son olarak, teknolojik materyaller kategorisi altında akıllı kıyafetler ve aksesuarlar gibi kişisel koruyucu donanımların teknolojik entegrasyonu vurgulanmaktadır. Bu yapı, İSG alanında teknolojik gelişmelerin ne kadar geniş bir yelpazede uygulama potansiyeline sahip olduğunu açıkça göstermektedir. İSG'ndeki teknolojik cihazların amacı; çalışan için işçi güvenliğine yönelik sınırlamaları azaltmak ve çalışanların görevlerini gerçekleştirilme kolaylığını artırmaktır. Bu cihazların esneklikleri, hızları ve bilgi toplamadaki doğrulukları nedeniyle iş güvenliğinin izlenmesi için çok uygundur.

İşletmelerdeki dijitalleşmenin İSG üzerindeki yenilikleri ve faydalarını alt başlıklarıyla aşağıdaki gibi açıklanacaktır:

• Robotlar ve Dronlar: Uzaktan izlemeyi mümkün kılarak işyerinde kontrolü arttırabilir, riski azaltabilir ve dolayısıyla verimliliği artırabilir. Bu sistemler, potansiyel bir yangın anında veya çalışanları riske atabilecek herhangi bir anormal olay durumunda uyarı üretebilmektedir (Khalid Knightly, 2022).

• İşçi Güvenliğine Yönelik Mobil Uygulamalar: İşyeri bilgilerine, eğitime, öğretime, sürekli iletişime ve gerçek zamanlı veri kaydına hızlı erişim sağlar. Koruyucu ekipman kullanımı, mola verme ve su içme konularında uyarılar üreten uygulamalar da mevcuttur. Akıllı saatlerin uygulamaları buna örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca çevrimiçi ilkyardım mobil uygulamaları, internete ve özellikle akıllı cihaz uygulamalarına kolay erişim sayesinde doğru bilginin hızlı bir şekilde kullanıcıya sunulmasına olanak sağlar (Kilshaw Jivan, 2021).

• Akıllı Gözlükler: Eş zamanlı olarak çalışanların görsel görüş alanlarında, görevle ilgili bilgileri görüntülerken eller serbest olarak görevleri gerçekleştirmelerine olanak tanıyabilir (Kim ve ark., 2016). Ayrıca, çalışanları fabrikada konumlandırabilmektedirler. Bu sayede çalışanları dinamik olarak güvenli bir noktaya yönlendirerek acil durumlarda tahliye faaliyetlerini kolaylaştırabilirler.

• Otonom Mobil Robotlar: Tıpkı insanlar gibi, otonom mobil robotlar bağımsız karar alma ve düzeltici eylemler gerçekleştirme yeteneğine sahiptir. Tamamen otonom olan bir robot çevresini gözlemleyebilir, gördüklerine ve/veya tanımak üzere eğitildiği şeylere dayanarak çalışabilir (Loganathan ve Ahmad, 2023). İnsan gücünün yetersiz olduğu durumlarda, çalışanların sağlığını tehdit edebilecek riskli durumlarda kullanım için uygunlardır (Erbil ve ark., 2023). İnsan gücünden tasarruf sağlama potansiyeli de taşımaktadır. Otonom mobil robotlar, özellikle operatörlerin tekrarlanan görevlerden kaynaklanan yorgunluğa maruziyetlerini ve iş yükünü azaltır (Giallanza ve ark., 2024). Operatörler tarafından rutin bir şekilde gerçekleştirilen işlerin iş kazalarına eğilimli olması sebebiyle otonom mobil robotların kullanımı daha sağlıklı ve güvenli çalışma ortamları oluşturacaktır.

• Akıllı Giysiler: Vücut sıcaklığını otomatik olarak düzenlemek amacıyla kumaşa entegre edilmiş akıllı sensörlerden oluşan bir ağ aracılığıyla işlev gösteren giysilerdir. Bu giysiler, sensörler sayesinde vücudun çeşitli bölgelerinin ısısını ölçer ve soğuduğunda kumaş ısınarak belirli bölgelere ısı sağlar. Böylece, işçinin vücut ısısının aşırı soğuk bir ortamda sabit kalmasını sağlayarak işlem yaparken rahat bir ortam oluşturabilir (Edirisinghe, 2015).

• Hareket İzleyen Cihazlar: Düşme veya ani hareket durumunda, çalışanın acil tıbbi müdahaleye ihtiyaç duyması durumunda kablosuz uyarı gönderen, hareketteki hızlı değişikliklere duyarlı ivmeölçerlere dayanan cihazlardır. Kritik zamanlarda, tıbbi müdahale sağlamayı ve böylece işgücünün genel güvenliğini ve refahını artırmayı amaçlamaktadır.

•Akıllı Bilezikler: Çalışanların, işyeri ortamında bulunabilecek zararlı faktörlere maruziyetinin ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Bu tür bilezikler, işçinin yaşamsal belirtilerini izlemenin yanı sıra, zehirlenme riski nedeniyle sağlık açısından olumsuz sonuçlar doğurabilecek çok çeşitli kimyasal maddeleri de tespit edebilir. Ayrıca çevresel değişkenlerin tespiti, çalışanın kullanması gereken

koruyucu ekipman tipinin anlaşılmasına yardımcı olur. Akıllı bilezikler aşırı fiziksel zorlamalardan kaynaklanan potansiyel sağlık ve güvenlik sorunlarının yanı sıra verimlilik kayıplarını da ortaya çıkmadan önce öngörmeyi amaçlar (Hwang Lee, 2017).

• Dahili İletişim Sistemleri ve Kulaklıklar: Giysilere kolayca takılabilen, suya, darbeye ve toza dayanıklı bu cihazlar, çalışanın kulağına takılarak çalışanlar arasındaki iletişimi kolaylaştırmaktadır. İletişim cihazlarının elde taşınmasıyla oluşacak dikkat dağıtıcı faktörlerinde ortadan kalmasını sağlamaktadır (Flor-Unda ve ark., 2023).

• Akıllı Kasklar: Çalışanın hareketlerini izlemek için sensörler kullanan bu cihazlar düşme durumunda daha kısa tepki süreleriyle endüstriyel güvenlikten sorumlu kişilere bildirim göndermektedir. Bu kasklar işçinin doğrusal ivmesini ve fiziksel koşullarını ölçer (Flor-Unda ve ark., 2023). Bununla birlikte kafaya takılan şeffaf ekranlar gibi giderek daha fazla giyilebilir ekranlar türemekte ve talimatların işçiye sözel değil görsel olarak iletilmesini sağlamaktadır (Nakanishi ve ark., 2010).

• Nanomalzemeler ile Akıllı Tekstil: İşyeri ortamında asılı parçacıklara karşı çalışanların korunmasını geliştirmek için kullanılmaktadır. Filtreler, elektrostatik yükler, hidrofobik yüzeyler ve kimyasal işlemler gibi çeşitli parçacık tutma mekanizmalarını içerir. Ayrıca akıllı tekstiller sayesinde malzemenin faz değişimini manipüle ederek termal konfor şartlarını sağlayan malzemelerin olduğu bilinmektedir (Flor-Unda ve ark., 2023).

6. Sonuç

Dijital dönüşüm ve yenilikçi teknolojilerin İSG alanındaki kullanımı, tehlikelerin daha hassas şekilde tanımlanmasını ve iş kazalarının önlenmesini sağlayarak önemli bir etki yaratmaktadır. Bu teknolojiler, çalışanlara gerçek zamanlı veri sunarak tehlikeli koşulları daha etkin değerlendirme imkânı sağlamakta ve proaktif önlemler alınmasına olanak tanımaktadır.

Bu bağlamda, AG ve SG gibi teknolojiler, tehlikeli ortamlarda çalışan bireylerin sanal simülasyonlar yoluyla pratik deneyim kazanmasını sağlayarak gerçek dünyadaki riskleri azaltabilir. Aynı zamanda, çalışanlar bu teknolojiler sayesinde potansiyel tehlikelere karşı daha bilinçli hale gelir ve uygun önlemleri alma konusunda eğitilebilir. Operatör 4.0, akıllı sensörler ve veri analitiği ile çalışanları destekleyerek riskleri azaltırken, Operatör 5.0 ile insan-makine iş birliği daha ileri seviyeye taşınarak çalışanların güvenliği önceliklendirilmektedir.

Verilerin güvenli bir şekilde saklanması, yetkisiz erişimin engellenmesi ve yasal düzenlemelere uygun kullanım, giyilebilir teknolojilerin İSG alanındaki sürdürülebilir ve etik uygulamaları için vazgeçilmezdir. Bu nedenle, güvenilir sağlık izleme, büyük veri analizi ve gizliliğin korunması, giyilebilir teknolojilerin İSG alanında başarılı bir şekilde entegre edilebilmesinin temelini oluşturmaktadır (Mishiba, 2024).

İş yerlerinde etkileşim odaklı dijital sistemlerin entegrasyonu, yalnızca mevcut riskleri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda çalışanların becerilerini artırarak Operatör 4.0 ve Operatör 5.0 perspektifleri doğrultusunda iş güvenliği kültürünü güçlendirmektedir. Ancak bu teknolojilerin başarılı bir şekilde

uygulanabilmesi için uygun güvenlik protokollerinin oluşturulması, çalışanların eğitimi ve sürekli izleme gibi faktörler kritik öneme sahiptir. Bu süreçlerin etkin yönetilmesi, dijitalleşmenin İSG üzerindeki olumlu etkilerini en üst düzeye çıkaracaktır.

Etkin bir şekilde uygulandığında, dijitalleşme mesleki riskleri azaltmanın yanı sıra iş güvenliği kültürünü de güçlendirebilir. Örneğin, uzaktan erişim imkânları sayesinde çalışanlar, potansiyel tehlikelere karşı daha iyi bilgilendirilebilir ve bu da iş güvenliği farkındalığını artırabilir. Ayrıca, dijital teknolojilerin İSG eğitimlerinde kullanılması, eğitim programlarını daha etkileşimli ve etkili hale getirerek çalışanların bilinç düzeyini yükseltebilir.

Tasarımda İSG kapsamında, planlama aşamasındaki bir fabrikada gelecekteki çalışma ortamının kapsamlı bir İSG değerlendirmesine olanak sağlamak için, makro düzeyde daha fazla İSG çalışmalarının dijital fabrika araçları ile uyumlaştırılması temel bir hedef olmalıdır.

Dijitalleşme ve akıllı fabrika dönüşümü, İSG uygulamalarında önemli ilerlemeler sunsa da, beraberinde birtakım potansiyel dezavantajları da getirebilmektedir. Artan karbon emisyonu ve elektrik maliyetleri bunlardan bazılarıdır (Pasman ve Behie, 2024). Artan otomasyon ve siber-fiziksel sistemlerin entegrasyonu, geleneksel fiziksel riskleri azaltma potansiyeli taşırken, siber güvenlik tehditleri ve veri bütünlüğü sorunları gibi yeni riskleri ortaya çıkarabilir. Akıllı sistemlere yetkisiz erişim veya kötü amaçlı yazılım saldırıları, üretim süreçlerinin kontrolünü kaybetmeye, güvenlik sistemlerinin devre dışı kalmasına (Avdibasic ve ark., 2022) ve dolayısıyla ciddi iş kazalarına yol açabilir. Ayrıca, insan-makine etkileşimindeki artan karmaşıklık ve veri odaklı karar alma süreçleri, operatörlerin bilişsel yükünü artırabilir ve yeni psikososyal risklerin oluşumuna zemin hazırlayabilir. Çalışanların sürekli izlenmesi ve büyük veri analizi yoluyla elde edilen kişisel verilerin gizliliği ve etik kullanımı da önemli bir endişe kaynağıdır (Floridi ve ark., 2018; Leesakul ve ark., 2022). Bu nedenle, akıllı fabrikaların İSG uygulamalarında başarılı olabilmesi için, teknolojik altyapının güvenliğinin sağlanması, insan faktörlerinin dikkate alınması ve etik veri yönetimi prensiplerinin benimsenmesi kritik önem taşımaktadır. Ayrıca, yeni teknolojilere uyum sağlanabilmesi için standartların güncellenmesi, otomasyon sistemlerinde çalışanların fiziksel ve bilişsel kapasitelerine uygun görev dağılımı yapılması ve insan-robot işbirliğinin güvenli biçimde sürdürülmesine yönelik çalışan uzmanlığı güçlendirilmelidir. İlerleyen zamanlarda; sanal görev analizi, dinamik risk değerlendirmesi, beceri yönetimi ve duygu sensörleri gibi yenilikçi araçların bir araya getirilmelidir. Bu çerçevede, güvenli ve konforlu çalışma ortamlarının oluşturulması ile veri güvenliğine yönelik koruma mekanizmaları sürekli geliştirilmelidir (EFFRA, 2013; Kagermann ve ark., 2013; De Assis Dornelles ve ark., 2022).

İSG alanındaki kullanımında çalışanların değişime direnci, kültürel engeller ile beceri ve eğitim eksikliği gibi faktörler dijital araçların kullanımını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Bu bağlamda, çalışanlarla daha fazla etkileşim ve eğitim sağlanmasının teknoloji kabulünü artırabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, bu teknolojilerin yüksek maliyetli olması ve özellikle inşaat sahalarında etkin biçimde kullanılabilmesi için doğrudan teknik kapasite gerektirmesi önemli bir dezavantajdır (Dodoo ve ark., 2024). Ayrıca zararlı, monoton ve yüksek riskli görevleri ele almak için üretim sürecine

robotların dâhil edilmesi, çalışanların güvenliğini ve kalitesini iyileştirmek için gerekli olsa da, insanlara yönelik potansiyel yaralanma riski ve aynı çalışma alanında koordinasyon eksikliği oluşturabilmektedir. Bunun yanında, insan emeği ile akıllı ekipmanların entegrasyonunu güçlendirecek disiplinlerarası araştırmaların artırılması, üretim sürecindeki mesleki riskler ile psikososyal etkilerin daha kapsamlı analiz edilmesi ve bilişim teknolojilerinin işyeri tasarımında etkin biçimde kullanılması gerekmektedir. Bu çalışma, etkileşim odaklı dijital sistemlerin İSG üzerindeki etkilerini incelerken daha önce yapılmış çalışmalardaki ve dünyanın farklı yerlerindeki, farklı sektörlerdeki uygulamalar ile sınırlıdır. İlerleyen çalışmalarda, bu konunun uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca, farklı iş ortamlarında teknolojilerin adaptasyonu ve çalışanların bu teknolojilere uyum süreçlerinin incelenmesi, İSG politikalarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Multidisipliner yaklaşımlar benimsenerek, mühendislik, psikoloji ve ergonomi gibi alanlardan uzmanların iş birliği, daha kapsamlı ve etkili sonuçlar elde edilmesine yardımcı olacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Avdibasic E., Toksanovna AS., Durakovic B. Cybersecurity challenges in Industry 4.0: A state of the art review. Defense and Security Studies 2022; 3: 32-49.

Ávila-Gutiérrez MJ., Suarez-Fernandez de Miranda S., Aguayo-González F. Occupational safety and health 5.0—A model for multilevel strategic deployment aligned with the sustainable development goals of agenda 2030. Sustainability 2022; 14(6741): 1-18.

Aytac S. The sources of stress, the symptoms of stress and anger styles as a psychosocial risk at occupational health and safety: A case study on Turkish police officers. Procedia Manufacturing 2015; 3: 6421-6428.

Choi B., Hwang S., Lee S. What drives construction workers' acceptance of wearable technologies in the workplace?: Indoor localization and wearable health devices for occupational safety and health. Automation in Construction 2017; 84: 31-41.

Clarke S., Cooper C. Managing the risk of workplace stress: Health and safety hazards. 1st Ed. London: Routledge; 2004.

De Assis Dornelles J., Ayala NF., Frank AG. Smart Working in industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities. Computers Industrial Engineering 2022; 163(107804): 1-18.

Dodoo JE., Al-Samarraie H., Alzahrani AI., Lonsdale M., Alalwan N. Digital innovations for occupational safety: Empowering workers in hazardous environments. Workplace Health Safety 2024; 72(3): 84-95.

Edirisinghe R., Blismas N. A prototype of smart clothing for construction work health and safety. EEI Publishing In Proceedings of the CIB W099 International Health and Safety Conference: Benefitting Workers and Society through Inherently Safer Construction, 10-11 September 2015, sayfa no: 1-9, Belfast, Northern Ireland.

Erbil ME., Süzen AA., Bayrakçı HC. Otonom mobil robotların (AMR) veri güvenliğinin hibrit şifreleme yaklaşımı. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi 2023; 15(2): 64-72.

EFFRA. Factories of the Future - Multi-annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020. 2013.

Floridi L., Cowls B., Beltramini M., Saunders D., Vayena E. An ethical framework for a good AI society: opportunities, risks, principles, and recommendations. AI and Society 2018; 33(4): 689-707.

Flor-Unda O., Fuentes M., Dávila D., Rivera M., Llano G., Izurieta C., Acosta-Vargas P. Innovative technologies for occupational health and safety: A scoping review. Safety 2023; 9(35): 1-22.

Giallanza A., La Scalia G., Micale R., La Fata CM. Occupational health and safety issues in human-robot collaboration: State of the art and open challenges. Safety Science 2024; 169(106313): 1-18.

Gladysz B., Tran TA., Romero D., van Erp T., Abonyi J., Ruppert T. Current development on the Operator 4.0 and transition towards the Operator 5.0: A systematic literature review in light of Industry 5.0. Journal of Manufacturing Systems 2023; 70: 160-185.

Golovianko M., Terziyan V., Branytskyi V., Malyk D. Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid. Procedia Computer Science 2023; 217: 102-113.

Grindle AC., Dickinson AM., Boettcher W. Behavioral safety research in manufacturing settings. Journal of Organizational Behavior Management 2000; 20(1): 29-68.

Hwang S., Lee S. Wristband-type wearable health devices to measure construction workers' physical demands. Automation in Construction 2017; 83: 330-340.

Hyundai Giyilebilir Robot. https://khosann.com/dis-iskeletlerle-super-kahraman-gucu-dunya-kupasinda-topa-ilk-tekmeyi-dis-iskelet-kullanan-felcli-bir-genc-vurdu/ 2016 [Erişim tarihi: 11 Ekim 2024]

Ji Z., Wang Y., Zhang Y., Gao Y., Cao Y., Yang SH. Integrating diminished quality of life with virtual reality for occupational health and safety training. Safety Science 2023; 158: 1-12.

Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Securing the future of German manufacturing. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0 - Final report of the Industrie 4.0 Working Group 2013.

Kakaraparthi VN., Vishwanathan K., Gadhavi B., Reddy RS., Tedla JS., Samuel PS., Gannamaneni VK. Application of the rapid upper limb assessment tool to assess the level of ergonomic risk among health care professionals: A systematic review. Work 2022; 71(3): 551-564.

Khalid M., Knightly EW. Networked drones for industrial emergency events. 2022; arXiv:2208.00931.

Kilshaw AD., Jivan S. Smartphone apps on burns first aid: A review of the advice. Burns 2021; 47(1): 171-174.

Kim S., Nussbaum Maury A., Gabbard Joseph L. Augmented reality "smart glasses" in the workplace: industry perspectives and challenges for worker safety and health. IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors 2016; 4(4): 253-258.

Leesakul N., Oostveen AM., Eimontaite I., Wilson ML., Hyde R. Workplace 4.0: Exploring the Implications of Technology Adoption in Digital Manufacturing on a Sustainable Workforce. Sustainability 2022; 14(6): 1-24.

Li CHJ., Liang V., Chow YTH., Ng HY., Li SP. A mixed reality-based platform towards human-cyber-physical systems with IoT wearable device for occupational safety and health training. Applied Sciences 2022; 12(23): 1-22.

Loganathan A., Ahmad NS. A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation. Engineering Science and Technology, an International Journal 2023; 40(101343): 1-26.

Mardonova M., Choi Y. Review of wearable device technology and its applications to the mining industry. Energies 2018; 11(3): 1-14.

Mishiba, T. Transforming occupational health and safety regulation: Strategic pathways in the era of Industry 4.0. Journal of Work Health and Safety Regulation 2024; 3(2): 150-168.

Nagy L., Ruppert T., Löcklin A., Abonyi J. Hypergraph-based analysis and design of intelligent collaborative manufacturing space. Journal of Manufacturing Systems 2022; 65: 88-103.

Nahavandi S. Industry 5.0—A human-centric solution. Sustainability 2019; 11(16): 1-13.

Nakanishi M., Taguchi K., Okada Y. Suggestions on the applicability of visual instructions with see-through head mounted displays depending on the task. Applied Ergonomics 2010; 42(1): 146-155.

Nişancı ZN., Demirören J. Davranış odaklı iş güvenliği uygulamalarının iş güvenliği kültürüne etkisi. Yaşar Üniversitesi E-Dergisi 2020; 15: 21-39.

Palamutçuoğlu BT., Gerşil M. 2015-2021 yılları arasında SCI ve SCI Expanded endeksli dergilerde yayınlanan siber-fiziksel üretim sistemleri konulu makalelerin içerik analizi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2022; 20(Özel Sayı): 205-230.

Pasman HJ., Behie SW. The evolution to Industry 5.0/Safety 5.0, the developments in society, and implications for industry management. Journal of Safety and Sustainability 2024; 1(4): 202-211.

Rasouli S., Alipouri Y., Chamanzad S. Smart personal protective equipment (PPE) for construction safety: A literature review. Safety Science 2024; 170(106368): 1-15.

Romero D., et al. Digitalizing occupational health, safety and productivity for the operator 4.0. In: Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0: IFIP WG 5.7 International Conference APMS, August 26-30 2018, sayfa no:473-481, Seoul Korea.

Romero D., Stahre J. Towards the resilient operator 5.0: The future of work in smart resilient manufacturing systems. Procedia CIRP 2021; 104: 1089-1094.

Romero D., Stahre J., Wuest T., Noran O., Bernus P., Fast-Berglund Å., Gorecky D. Towards an operator 4.0 typology: A human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. Proceedings of the international conference on computers and industrial engineering (CIE46), October 2016, sayfa no: 29-31, Tianjin China.

Ruppert T., Löcklin A., Romero D., Abonyi J. Intelligent collaborative manufacturing space for augmenting human workers in semi-automated manufacturing systems. 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2022, sayfa no:1-7: Stuttgart Germany.

Sanchez-Pi N., Martí L., Molina JM., Garcia ACB. Ontology definition and cognitive analysis in ocupational health and security (OHS) environments. In Proceedings of the 30th annual ACM symposium on applied computing, April 13 – 17 2015, sayfa no:201-206, Salamanca Spain.

SICK. Collaborative robot safety made simple with SICK. https://sickusablog.com/collaborative-robot-safety-made-simple/. 2019 (Erişim 20.05.2024).

Stefana E., Marciano F., Rossi D., Cocca P., Tomasoni, G. Wearable devices for ergonomics: A systematic literature review. Sensors 2021; 21(3): 1-24.

Sun S., Zheng X., Gong B., Garcia Paredes J., Ordieres-Meré J. Healthy operator 4.0: A human cyber–physical system architecture for smart workplaces. Sensors 2020; 20(7): 2011.

Zeitlin LR. Failure to follow safety instructions: Faulty communication or risky decisions?. Human Factors 1994; 36(1): 172-181.

Zülch G., Grieger T. Modelling of occupational health and safety aspects in the digital factory. Computers in Industry 2005; 56(4): 384-392.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(5): 2635-2648, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(5): 2635-2648, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Gıda Etiket Okuryazarlığı ve Tüketici Bilinci

Zehra AYBEK[1], Seyda ŞAHİN[2*]

[1]Veteriner Hekim, İstanbul, Türkiye
[2]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Sivas, Türkiye

[1]https://orcid.org/0009-0005-1796-3668
[2]https://orcid.org/0000-0002-8173-7818
*Sorumlu yazar: seydasahin@cumhuriyet.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 22.09.2025
Kabul tarihi:20.11.2025
Online Yayınlanma: 15.12.2025

Anahtar Kelimeler:
Gıda etiketi
Etiket okuryazarlığı
Gıda güvenliği
Bilinçli tüketici
Gıda israfı
Halk sağlığı

ÖZ

Gıda etiketleri, tüketicilerin gıdaların içeriği, besin değerleri ve güvenilirliği konusunda bilgi edinmesini sağlayan temel bilgi kaynaklarındandır. Günümüzde artan gıda çeşitliliği ve endüstriyel üretim nedeniyle, tüketicilerin gıda etiketlerini doğru okuyabilme ve yorumlayabilme becerisi kritik hale gelmiştir. Bu derlemede gıda etiketlemenin tarihsel gelişimi, etiketlerde bulunması gereken zorunlu bilgiler, izlenebilirlik ve gıda güvenliği ilişkisi tüketici bakış açısıyla ele alındı. Ayrıca, gıda israfının önlenmesinde etiket okuryazarlığının önemi ve katkısı değerlendirildi. Sonuç olarak, gıda etiket okuryazarlığının tüketici bilincini artırmak, gıda güvenliğini sağlamak ve halk sağlığını korumak için temel bir gereklilik olduğu vurgulandı. Önümüzdeki dönemde, kamu otoriteleri ve üniversiteler tarafından özellikle aileler başta olmak üzere tüm tüketicilere yönelik daha yaygın eğitim programlarının planlanması ve uygulanması, gıda güvenliği bilincinin artması açısından öncelikli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Food Labeling Literacy and Consumer Consciousness

Reviews

Article History:
Received: 22.09.2025
Accepted: 20.11.2025
Published online: 15.12.2025

Keywords:
Food label
Label literacy
Food safety
Conscious consumer
Food waste
Public health

ABSTRACT

Food labels are a key source of information for consumers about the content, nutritional value, and safety of foods. With the increasing variety of foods and industrial production, consumers' ability to accurately read and interpret food labels has become critical. This review examines the historical development of food labeling, the mandatory information required on labels, and the relationship traceability and food safety from a consumer perspective. Furthermore, the importance and contribution of label literacy to preventing food waste is evaluated. Consequently, it is emphasized that food label literacy is a fundamental requirement for raising consumer awareness, ensuring food safety, and protecting public health. In the near future, public authorities and universities should prioritize the planning and implementation of more widespread educational programs for all consumers, especially families, in order to enhance food safety awareness.

To Cite: Aybek Z., Şahin S. Gıda Etiket Okuryazarlığı ve Tüketici Bilinci. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(5): 2635-2648.

1. Giriş

Etiket, gıda ambalajının veya kabının üzerine yazılmış, basılmış, şablonla basılmış, işaretlenmiş, kabartılmış ya da yapıştırılmış marka, işaret, resim veya diğer açıklayıcı bilgi anlamına gelmektedir. Etiketleme ise gıdanın üzerinde, yanında ya da gıdayla birlikte yer alarak satış veya tanıtım amacına

hizmet eden yazılı, basılı ve görsel tüm bilgileri içermektedir (CAC, 2024). Etiketlemeyle ürünün kalitesi, fiyatı, gerekli özellikleri hakkında doğru bilgi verilmeli ve tüketicinin ürünü diğer ürünlerle karşılaştırmasını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Gıdaların etiketlenmesi, tüketiciyi yalnızca gıda hakkında bilgilendirmek amaçlı değil, aynı zamanda tüketiciyi korumak ve yönlendirmek amacıyla da yapılmaktadır. Ürünün içindekiler, kullanma ve saklama koşulları gibi bilgiler, tüketicinin gıdayı doğru şekilde kullanmasına yardımcı olmaktadır. Etiketleme sayesinde üretilen ürün, gerekli bilgilerle hızlı ve güvenli bir şekilde tüketiciye ulaşabilmektedir (Peker ve Caner, 2006). Bu bağlamda etiket üretici ve tüketici arasında köprü kurmakta ve bu bilgilendirme süreci yetkili kurumlar tarafından incelenerek denetime tabii tutulabilmektedir. Nitekim Tarım ve Orman Bakanlığı güncel uygulamaları sayesinde gıda denetimleri ile güvenilir gıdaya ulaşma konusunda önemli katkılar sağlasa da, "en iyi denetçinin tüketicinin kendisi" olduğu da belirtilmektedir (Menderis, 2024). Bu derlemede, gıda etiketlemenin tarihsel gelişimi, etiketlerde bulunması gereken zorunlu bilgiler, izlenebilirlik ve gıda güvenliği ilişkisi tüketici bakış açısıyla ele alındı.

2.1. Hayvansal Kaynaklı Gıdalarda Etiketlemenin Tarihsel Gelişimi

Geçmişten günümüze kadar toplumlar için gıda güvenliği her zaman büyük bir öneme sahip olmuştur. Gıda tedarik güvenliği kavramı ilk olarak ABD yasaları ile 30 Haziran 1906 tarihinde "Saf Gıda ve İlaç Yasası" ve yine aynı tarihte yayımlanan "Federal Et Denetleme Yasası" olarak yayımlanmıştır. Bu yasalarla, tağşiş edilmiş veya yanlış etiketlenmiş her türlü gıdanın üretimi yasaklanmış, gıdanın içeriği, menşei, miktarı ve varsa taklit durumuna ilişkin bilgilerin etikette yer alması zorunlu kılınmıştır. Ayrıca, etiket bilgilerinin yanlış, abartılı ya da aldatıcı olmaması gerektiği belirtilmiştir (USC, 1906). Bu yasa 1938 tarihinde revize edilerek ambalaj ve kalitesindeki yanlış uygulamalar düzeltilmiş ve yasal olarak uygulanabilir gıda toleransları ele alınmıştır (FDA, 1938). 1958 tarihinde ise yasanın gıda katkı maddelerinde değişikliğe gidilerek, gıda katkı maddelerinin kanserojen nitelik açısından değerlendirilmesi ve kanserojen nitelik taşıyanların güvenli kabul edilmeyeceği yayımlanmıştır (FAA, 1958). 1977 yılında, Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı'na (United States Department of Agriculture, USDA) bağlı bir kuruluş olarak Gıda Güvenliği ve Denetleme Servisi (The Food Safety and Inspection Service, FSIS) kurulmuştur. Et, süt ve kanatlı etinin sağlıklı olması için doğru işaretlenmesini, etiketlenmesini ve paketlenmesini denetlemekle görevli olan bu kuruluş, hayvansal kaynaklı gıdalarda gıda güvenliğini tehdit eden patojen mikroorganizmalar için yeterli önlemler alınmadığını tespit etmiştir. Bu nedenle FSIS, Patojen Azaltma veya Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları (Hazard Analysis and Critical Control Points-HACCP) sistemi kapsamındaki düzenlemelerin uygulamasını gerekli görmüştür. Böylece gıdaların depolanması, taşınması, hazırlanması ve satışında ortaya çıkabilecek biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlikelerin tespiti ve kontrolü için gıda güvenliği izleme sistemi oluşturulmuştur (FSIS, 1996).

Türkiye'de gıdalarda etiketleme bir yasal zorunluluk olarak ilk kez 5179 Sayılı "Gıdaların Üretimi, Tüketimi ve Denetlenmesine Dair Kanun" ile 2004 yılında düzenlenmiş, böylece gıdaların üretimi,

tüketimi ve denetimine ilişkin hükümler yasal çerçeveye kavuşturulmuştur. Ardından, 2010 tarihli 5996 sayılı "Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanunu'nda" veteriner hekimlerin görev ve yetkileri resmi olarak tanımlanmış; hayvansal gıdalar için ayrıntılı etiketleme ve izlenebilirlik zorunlulukları mevzuatta açık bir şekilde düzenlenmiştir (Anonim, 2010; Ergezer ve Gökçe, 2016).

Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından, 8 Mayıs 2025 tarihli ve 32894 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan değişiklikle, "Gıda ve Yemin Resmi Kontrollerine Dair Yönetmelik" kapsamında, gıda güvenilirliğini artırmak ve şeffaflığı sağlamak amacıyla, işletmelere ilişkin bakanlıkça belirlenen bilgileri içeren karekodun, gıdanın satış ve toplu tüketim alanlarında tüketicinin kolayca görebileceği bir yerde bulundurulması zorunlu hale getirilmiştir (TOB, 2025a). Bu yönetmelikle tüketicilerin hakları gözetilmiş; tüketicilerin güvenilir gıdaya erişimlerinin kolaylaştırılması ve gıda işletmelerinin denetim durumlarının şeffaf bir şekilde takip edilebilmesi amaçlanmıştır. Tüketiciler, "Tarım Cebimde" uygulamasını mobil cihazlarına indirerek ilgili işletmenin: Kayıt/onay numarası, unvanı, adresi ve işletmede yapılan en son denetim tarihine ilişkin bilgilere kolaylıkla ulaşabilmektedir. Uygulamanın belirtilen kullanımı şu şekildedir: Uygulamaya giriş yapıldıktan sonra "Gıda Kontrol Menüsü" altındaki "İşletme Denetim Sorgulama" seçeneğine tıklanır. Ardından açılan kamera ile tüketici, işletmedeki kolayca görülebilen karekodu okutarak sorgulama yapabilir ve bu işlem sonucunda yukarıda belirtilen bilgiler ekranda görüntülenmektedir (TOB, 2025b).

2.2. Gıda Etiket Okuryazarlığı ve Tüketici Bilinci

Etiket okuryazarlığı; bireyin gıda ürünlerinin etiketinde yer alan bilgilere erişebilme, bu bilgileri inceleyip anlayarak yorumlayabilme, bunları uygulama sürecine aktarabilme ve gıdanın tedarik zincirini değerlendirebilme yetkinliklerini ifade eden, eleştirel, seçici ve karar süreçlerinde nesnel verilere dayanan bilinçli bir tüketici olma halidir. Bu nitelikleri sahip tüketiciler, yalnızca bireysel düzeyde değil toplumsal açıdan da önemli bir rol üstlenmektedir (Şahin, 2024).

2.3. Hayvansal Kaynaklı Gıdalarda Doğru Bilginin Önemi

Hayvansal kaynaklı gıdalar insan beslenmesinde ve yaşamında vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Sağlıklı beslenmenin temel unsurlarından olan bu gıdalar birçok açıdan sorgulanmalı ve doğru bilgiler aracılığıyla bu gıdalara erişim sağlanmalıdır. Günümüzde bilgi erişimi kolaylığı olsa da doğru bilgiye erişim, bilgiyi anlama, değerlendirme ve sorgulama eylemleri bilinç ve sorumluluğu da beraberinde getirmektedir. Tüketicinin doğru bilgiye erişmesi ve bunu doğru şekilde paylaşması, halk sağlığının korunmasını da doğrudan etkilemektedir. Doğru bilgiye erişim sağlayabilen birey; ürünün içerik bilgisi, beslenme bildirimi, kullanım ve saklama koşulları ile etiket üzerinde yer alan diğer bilgilerin doğruluğunu değerlendirebilmektedir. Bu değerlendirmenin sonucu yalnızca bir karar verme süreci değil; aynı zamanda tüketiciye sosyal sorumluluk bilinci, hak farkındalığı, etik tutum geliştirme ve eleştirel bakış açısı da kazandırmaktadır (Miller ve Cassady, 2015; Kılıç ve Aydın Eryılmaz, 2021).

2.4. İzlenebilirlik ve Gıda Güvenliği

Gıda güvenliğinin sağlanabilmesi için gıda, yem, gıda amacıyla yetiştirilen hayvanlar ve gıdaya dâhil edilecek ham maddelerin üretimden tüketime kadar tüm aşamalarda izlenebilirliği büyük önem taşımaktadır. İzlenebilirlik, ürünün piyasaya arzından sonra gerektiğinde hızlı ve etkili bir şekilde geri çağrılmasına olanak sağlamaktadır (FAO, 2018). İzlenebilirlik, gıdanın çiftlikten çatala kadar takip edilmesini sağlayan; tüketici haklarını yasal düzenlemelerle koruma altına alan ve uluslararası ticaret ile denetim süreçlerinde zorunlu hâle gelen en önemli gıda bilgilendirme araçlarından biri olmuştur (Doğu ve Şireli, 2015). Gıdaların üretici firmalar tarafından güvenlik kontrollerinin yapılması ve kalite kusurlarının en aza indirilmesiyle, gıda kaynaklı hastalıkların ve salgınların önlenmesi sağlanmakta; böylece tüketicinin korunmasına önemli katkı sunmaktadır. İnsan sağlığı için risk teşkil edebilecek durumların erken tespit edilmesi, söz konusu ürünlerin piyasadan geri çekilmesi ve önleyici tedbirlerin alınması açısından büyük önem taşımaktadır (Yaralı, 2019). 5 Haziran 2004 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Gıdaların Üretimi, Tüketimi ve Denetlenmesine Dair Kanun'da: "Gıda, gıdanın elde edildiği hayvan, bitki ya da gıda maddesinde öngörülen veya ortaya çıkması beklenen herhangi bir maddenin tespit edilmesi için üretim işleme ve dağıtım ile ilgili tüm aşamalarda izlenebilirlik tesis edilir" ve "Piyasaya sürülen gıdaların tüketicilerin bilgilendirilmesini kolaylaştırmak amacıyla gerekli bilgileri içerecek şekilde etiketlenmesi ve tanımlanması zorunludur." hükümleri ile izlenebilirlik kavramı yasal olarak resmiyet kazanmıştır (Anonim, 2004).

Gıda güvenliğinin sağlanmasında uluslararası düzeyde kabul görmüş ve bilimsel temellere dayanan etkili yaklaşımlardan biri HACCP sistemidir. HACCP, gıda üretim sürecinde hammadde aşamasından son ürüne kadar ortaya çıkabilecek tehlikelerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve kontrol altına alınmasını amaçlayan süreç kontrol sistemidir. İzlenebilirliği daha sistemli hale getiren HACCP üretim, imalat, depolama, dağıtım ve satış aşamalarında kayıt tutmayı zorunlu kılmaktadır. İmalat aşamasında, ürün takibinin sağlanabilmesi için etiket ve barkod uygulamaları zorunlu olmalı ve ithalatçı firmaların, ithal ettikleri veya dağıttıkları gıdaları mevzuata uygun olmayan durumlarda pazardan geri çekmekle yükümlülüğü bulunmaktadır. Bu konuda yetkili otoritelerin bilgilendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Depolama ve dağıtım aşamalarında, tüm kayıtların eksiksiz tutulması, uygun muhafaza koşullarının sağlanması ve sıcaklık takibinin sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir. Satış aşamasında ise üretimi yapılan ve/veya ithal edilen ürünlerin etiketli olması, son tüketim tarihlerinin geçmemiş olması, satış koşullarının asgari standartlara uygun olması, personelin hijyen eğitimi almış olması ve soğuk zincirin korunması temel gerekliliklerdir (Koç ve ark., 2008).

2.5. Etikette Bulunması Gereken Zorunlu Bilgiler

Etiket üzerinde yer alan bilgilerin net, anlaşılır, kolay okunabilir ve yanıltıcı olmayan nitelikte olması; tüketicinin bilinçli seçim yapabilmesine imkân sağlaması ve silinmeyecek şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Türk Gıda Kodeksi Gıda Etiketleme ve Tüketicileri Bilgilendirme Yönetmeliği'ne göre etiketlerde; ürünün adı, içerik listesi, alerjen bilgisi, net miktarı, son tüketim tarihi veya tavsiye edilen

tüketim tarihi, saklama koşulları, üretici/ithalatçı bilgileri, beslenme bildirimi ve gerektiğinde kullanım talimatı gibi tüketiciyi doğrudan ilgilendiren bilgiler yer alması zorunludur (TGK, 2017). Bu bilgiler aşağıda özetlenmektedir.

2.5.1. Gıdanın Adlandırılması

Gıda ürünlerinin adlandırılmasında, ilgili tebliğlerde belirlenen isimler esas alınmaktadır. Tebliğde belirlenen ismin olmaması durumlarında gıdanın varsa yaygın ya da geleneksel adı beyan edilmelidir. Bunların olmaması durumunda yanıltıcı olmayan bir tanımlama kullanılmalıdır. Marka isimleri, ürün isimlendirmede kabul edilmemektedir (TGK, 2017).

2.5.2. Gıdanın İçindekiler/Bileşenler Listesi

Gıda ürününün içindekiler ya da bileşenler listesi, üretim aşamasında kullanılan tüm bileşenlerin ağırlıkça en çoktan en aza doğru sıralanması esasına göre düzenlenmektedir (TGK, 2017). Hayvansal kaynaklı gıdalardaki (süt ve ürünleri, et ve ürünleri, yumurta ve arı ürünlerin) içindekiler kısmında yer alması gereken bilgiler aşağıda detaylı bir şekilde belirtilmiştir.

2.5.2.1. Süt Ürünleri

Süt ürünlerinde homojenizasyon işlemi yapıldıysa "Homojen Süt" ya da "Homojen Yoğurt" şeklinde belirtilmeli ancak homojenizasyon işlemi yapılmadıysa bu ibare isteğe bağlı bir şekilde eklenebilmektedir. Satışa sunulan ürün inek dışında bir hayvandan elde ediliyorsa "Manda Yoğurdu" ya da "Keçi Sütü" şeklinde belirtilmeli, birden fazla hayvanın sütü bileşimde yer alıyorsa oranları "Koyun Sütü (%55), Keçi Sütü (%40), İnek Sütü (%5)" şeklinde açıkça belirtilmelidir.

Uygulanan ısıl işlem pastörizasyon, ultra yüksek sıcaklık (UHT), sterilizasyon işlemleri mevzuata uygunluk taşımalı ve "Pastörize Yağlı İnek Sütü", "Yarım Yağlı UHT Süt" ve "Sterilize Laktozsuz Süt" gibi ibarelerle yapılan ısıl işleme yer verilmelidir. İçme sütlerinde 100 ml'de bulunan süt yağı (gram) miktarlarına göre sınıflandırma şu şekildedir: tam yağlı sütlerde süt yağı≥ 3,5 g, yarım yağlı sütlerde 1,8 g> süt yağı≥ 1,5 g, yağsız sütlerde süt yağı< 0,15 g şeklinde olmalıdır. Bu oranlar doğrultusunda "Yağlı Süt" veya "Yarım Yağlı Süt" olarak etiket üzerinde yer almaktadır (TGK, 2019).

2.5.2.2. Et Ürünleri

Et ürünün elde edildiği hayvan türü içindekiler bölümünde açık şekilde belirtilmeli; örneğin "Dana Eti" ya da "Kuzu Eti" şeklinde ifade edilmelidir. Eğer üründe lezzet vericiler olarak insan tüketimine uygun tuz, hardal, baharat özütleri veya aromatik bitkiler kullanıldıysa bu bileşenler de açıkça belirtilmelidir. Üründe kullanılan yağ miktarı ve varsa kullanılan yağ kaynakları etiket üzerinde belirtilmelidir. Gıda katkı maddeleri ise ilgili yönetmeliğe uygun şekilde eklenmeli ve etiket üzerinde açıkça belirtilmelidir. Et ve et ürünlerinde kullanılan gıda katkı maddelerinden nitrit ve nitratlar (E249-E252), bakanlığın belirlediği mevzuat kapsamında yalnızca belirli işlenmiş et ürünlerinde (örneğin; sucuk, salam ve sosis)

tanımlanmış maksimum düzeylerde kullanılabilmekte; bunun dışında kullanımı yasaklanmaktadır (TGK, 2017). İşlenmiş et ürünlerinde kullanılan bazı gıda katkı maddeleri: Karminik asit (E120), askorbik asit (E300), difosfatlar (E450), trifosfatlar (E451) ve polifosfatlar (E452) gibi Türk Gıda Kodeksi'nde belirtilen yasal kullanım miktarları aşılmadığı sürece ciddi yan etkilere neden olmamaktadır (Gültekin, 2014; Gültekin ve Akın, 2019). Yine de bu katkı maddelerinin miktarının her bireyde aynı etkiyi göstermeyebileceği unutulmamalıdır. Örneğin, E120 gıda katkı maddesinin kullanımının alerjik reaksiyonları tetikleyebileceği bildirilmiş; Tekrarlayan Aftöz Stomatit (TAS) hastalığındaki etkisini inceleyen bir çalışmada, bu gıda katkı maddesinin hastalığın etiyolojisine katkıda bulunabileceği ortaya konmuştur (Gülseren ve ark., 2017).

2.5.2.3. Yumurta ve Yumurta Ürünleri

Yumurta ve yumurta ürünlerine ilişkin etiketleme tebliğine göre, bileşiminde herhangi bir değişiklik yapıldığı zaman içindekiler kısmında belirtilmelidir. Ürün işleme tabii tutulduysa ve gıda katkı maddesi/maddeleri eklendiyse aynı şekilde içindekiler başlığı altına eklenmesi gerekmektedir (TGK, 2017).

Kanatlı hayvanın yetiştirilme ve beslenme koşullarına göre de isimlendirilmesi aşağıda belirtildiği gibi farklılık göstermektedir (Yüceer, 2021). Yumurtacı tavukların yetiştirilme metodu yumurta üzerinde yer alan kod dizininde en baştaki rakam "Yetiştirme Metodu Kodu" kavramına karşılık gelmektedir. Bu kodlar 0, 1, 2, 3 şeklinde olup: Organik yetiştiricilik için 0, serbest gezen tavuk yetiştiriciliği için 1, kümeste kafessiz yetiştiricilik için 2 ve kafesli yetiştiricilik için 3 olarak otomatik şekilde tanımlanmaktadır. Örneğin günümüzde marketlerde sıkça karşılaştığımız kafesli yetiştiricilikten elde edilen yumurtalar için "3TR060000060000-01" şeklinde bir kodlama yapılmaktadır (TGK, 2017).

2.5.2.4. Arı Kaynaklı Ürünler

Arı kaynaklı ürünler; bal, propolis, polen ve arı sütü gibi çeşitli şekillerde satışa sunulmaktadır. Bu ürünler içindekiler kısmında balın elde edildiği kaynak örneğin çiçek veya çam balı olduğu açıkça belirtilmelidir. Birden fazla ürünün bir arada bulunduğu durumlarda ise bileşenler; en çoktan en aza doğru miktarlarıyla birlikte listelenmelidir. Örneğin; Ham Bal (%98,5), Arı sütü (%1,5) şeklinde belirtilebilmektedir (TGK, 2017).

2.5.3. Alerjiye veya İntoleransa Neden Olan Belirli Madde veya Ürünlerin Belirtilmesi

Ürün içeriğinde yer alan gluten (Çölyak hastalarını etkiler), fındık, fıstık, deniz kabukluları, kereviz gibi alerjiye veya intoleransa neden olan bileşenler belirtilmelidir (TGK, 2017). Alerji, bağışıklık sisteminin, yabancı olarak tanıdığı hava yoluyla, besinle, enjekte edilebilen ya da deriye direkt temas ettiğinde aşırı reaksiyon gösterme halidir. Besin reaksiyonları, besinlerin ya da besinlerle alınabilen diğer etkenlerin immünolojik ya da immünolojik olmayan mekanizmalar aracılığıyla meydana gelen anormal değişimlere denir. Besin reaksiyonları "besin intoleransı" ve "besin alerjisi" olarak iki grupta

incelenebilmektedir. Besin intoleransı herhangi bir alerjen ve savunma sisteminde aşırı reaksiyon görülmeksizin oluşan anormal yanıtlardır. Besin alerjisi ise immünolojik olarak tanımlanan vücudun savunma sistemiyle besinlere karşı oluşan aşırı duyarlılık reaksiyonudur (Öztürk ve Besler, 2008). Besin alerjilerinde belirli bir alerji kaynağına gösterilen reaksiyon, vücudun benzer şekilde reaksiyon gösterdiği diğer alerji kaynaklarıyla birlikte görülebilmekte buna da çapraz aktivite denmektedir. Örneğin inek sütüne karşı alerjik reaksiyon gösteren bir birey sığır etine de alerjik reaksiyon geliştirebilmektedir (Tercanlı ve Atasever, 2021). Bu sebeple tüketici etiketlerde yer alan besin alerjisi ve intolerans uyarılarını dikkatlice okumalı ve oluşabilecek alerjik reaksiyonlara karşı bilinçli bir şekilde yaklaşmalıdır.

2.5.4. Belirli Bileşenlerin ya da Bileşen Gruplarının Miktarının Belirtilmesi

Belirli bileşen ya da bileşen grubu miktarları hangi oranda bulunuyorsa o oranda açık ve net bir şekilde etiket üzerinde yer almalıdır. Örneğin "Çilekli Süt" olarak satışa sunulan bir üründeki çilek içeriği, "çilek (%0,1)" şeklinde ve "çilek aroma vericisi" şeklinde etiket üzerinde açıkça belirtilmelidir (TGK, 2017).

2.5.5. Gıdanın Net Miktarı

Ambalajlı olan gıdanın, ambalaj malzemesi ve gıdayla ambalajlanan diğer malzemeler hariç miktarını belirtmektedir (TGK, 2017). Örneğin "Sucuk" ürünü için 420 gram, "Süt" ürünü için 1 litre şeklinde belirtilebilmektedir. Yumurtalar boyut ve ağırlıklarına göre sınıflandırılmaktır. S (küçük) <53 g, M (orta) $\geq$53 – <63 g, L (büyük) $\geq$63 – <73 g, XL (çok büyük) >73 g şeklinde sınıflandırılmaktadır (TGK, 2014).

2.5.6. Tavsiye Edilen Tüketim Tarihi veya Son Tüketim Tarihi

Gıdanın uygun koşullarda muhafaza edildiğinde, gıdanın kendine has niteliklerini yitirmediği süre raf ömrü olarak tanımlanmaktadır (TGK, 2017). Hayvansal gıdalar gibi mikrobiyolojik açıdan bozulma riski yüksek ürünlerde Son Tüketim Tarihi (STT) ibaresi kritik öneme sahiptir. Bu tarih geçtikten sonra ürünün tüketilmemesi, halk sağlığının korunması açısından zorunludur (TGK, 2017). Tavsiye Edilen Tüketim Tarihi (TETT) ibaresinde ise bakliyat, makarna gibi ürünlerde, uygun saklama koşullarında, belirtilen tarihte bozulmadığı sürece, besin değeri azalabilse de ürünün tüketimi yapılabilmektedir. Tüketicilerin etiket üzerinde yer alması zorunlu olan bu tarihlendirmelere uyması ve ürünleri uygun muhafaza koşullarında saklaması gerekmektedir; aksi hâlde zehirlenme gibi sağlığı tehdit eden ve hatta ölüme kadar gidebilen durumlarla karşı karşıya kalınabilmektedir. Özellikle hayvansal ürünlerin, belirtilen son tüketim tarihinden sonra tüketilmemesi, satışa sunulmaması ve geri bildiriminin yapılması hem üretici ve hem de tüketici açısından önemlidir.

2.5.7. Özel Muhafaza ve/veya Kullanım Koşulları

Ürünün saklanması sırasında dikkat edilmesi gereken özel bir koşul olduğunda, bu bilgi STT veya TETT ifadesi ile aynı anda okunabilecek şekilde etiket üzerinde belirtilmelidir. Gıdanın ambalajı açıldıktan sonra gıdanın uygun şekilde kullanılabilmesi için tüketici ayrıca bilgilendirilmelidir. Örneğin sucuk, sosis ve salam gibi ürünlerde tüketilmesi uygun olmayan yapay kılıflar kullanıldığında "Kılıfını Soyarak Tüketin" gibi bir ifade yer almalıdır (Anonim, 2017). Diğer bir örnek ise UHT işlemine tabii tutulmuş süt ürünlerinde "Kuru ve serin yerde muhafaza ediniz; açıldıktan sonra buzdolabında 0-4°C'de saklayınız ve 1-2 gün içerisinde tüketiniz" gibi ifadeler yer alabilmektedir. Bu bilgilerin etiket üzerinde bulunması, tüketicinin özellikle hayvansal gıda ürünlerini uygun koşullarda ve uygun süre içerisinde güvenli bir şekilde tüketebilmesini sağlamakta ve bu doğrultuda bilinçli bir yaklaşım sergileyebilmesine katkıda bulunmaktadır.

2.5.8. Gıda İşletmecisinin Adı veya Ticari Unvanı ve Adresi

Ürünü piyasaya arz eden işletmecinin adı veya ticari unvanı etikette açıkça yazmalıdır. Adres bilgileri ise şehir ve ülke dâhil olmak üzere tam ve eksiksiz bir şekilde bulunmalıdır (TGK, 2017).

2.5.9. İşletme Onay Numarası

Hayvansal gıda üreten işletmeler, onaya tabii tutulan işletmelerdir ve bu işletmelerin faaliyete başlamadan önce Bakanlıktan onay almaları zorunludur. Onay numarası, İl Trafik Plaka Kodu-İşletme numarası (4 haneli) formatında etiket üzerinde yer almaktadır (Anonim, 2025). Örneğin bir işletmenin onay numarası TR 06-0001 şeklinde yazılabilmektedir. Buradaki 06, Ankara'nın trafik plaka kodunu belirtmektedir.

2.5.10. Menşe Ülke veya Kaynak Yeri

Menşei ülke gıda ürününün üretildiği yeri tanımlamaktadır. Etiket üzerinde yer alması zorunludur (TGK, 2017).

2.5.11. Kullanım Talimatı

Kullanım talimatı, gıda ürünün uygun şekilde tüketilmesini sağlayacak biçimde etiket üzerinde belirtilmelidir (TGK, 2017). Örneğin UHT yöntemiyle üretilen süt ürünlerinde; "Homojenizasyon uygulandığından yağı üst kısımda birikmez ve kaynatılmasına gerek yoktur." şeklinde bir ifade yer alabilmektedir.

2.5.12. Alkol Derecesi

Gıdanın bileşiminde etil alkol bulunuyorsa etiket üzerinde belirtilmeli, gıdanın bileşiminde katkı ya da aroma verici olarak kullanılan bir alkol varsa örneğin "Üretiminde etil alkol kullanılmıştır" şeklinde doğru ve net bir şekilde etiket üzerinde belirtilmelidir (TGK, 2017).

2.5.13. Beslenme Bildirimi

Zorunlu beslenme bildirimindeki bilgiler; enerji değeri, yağ, doymuş yağ, karbonhidrat, şekerler, protein ve tuz miktarıdır. Bu zorunlu bilgilerden herhangi birinin bulunmaması durumunda o besin öğesine ait ilgili satır tablodan silinemez. Örneğin yağ içermiyorsa bile "yağ" satırı tablodan çıkarılamaz. Enerji ve besin öğeleri kapsamında ilave bir bilgi içeriyorsa gıda ürünü üzerindeki tabloya eklenebilir. Bu bilgiler ürün üzerinde yeterli alan olmaması dâhilinde tablo şeklinde verilemeyecekse, doğrusal (lineer) ve kolay okunabilir formatta tüketicinin anlayabileceği şekilde etikette yer almalıdır (Anonim, 2017).

2.5.14. İlave Zorunlu Bilgiler

Tüketici etiketlerde yer alan besin alerjisi ve intolerans uyarılarını dikkatlice okumalı ve oluşabilecek alerjik reaksiyonlara karşı bilinçli bir şekilde yaklaşmalıdır. Yönetmelikte balık, kabuklular, yumuşakçalar, yumurta ve süt ürünleri gibi alerjenler etiket üzerinde açıkça belirtilmelidir. Aynı yönetmelik gereği 1 Ocak 2020 tarihinden itibaren alerjen bilgisinin toplu tüketim yerlerinde son tüketiciye sunulması zorunlu hale getirilmiştir (TGK, 2017; Anonim, 2020).

2.5.15. Gıdanın Parti İşareti veya Numarası

Gıdanın ilgili olduğu gıda kodeksindeki tanımlı satış birimlerini ifade etmektedir (TGK, 2017). Hazır ambalajlı olan gıdalarda parti işareti veya numarası ve gerektiğinde "P" ya da "L" harfleri ambalaj üzerindeki etikette yer almaktadır (Anonim, 2012). Aynı şartlarda üretimi sağlanan veya ambalajlanan gıdanın partisini sağlayan kodlama sistemi, gıda izlenebilirliği açısından oldukça önemlidir.

2.5.16. Katkı Maddeleri

Katkı maddeleri de etiket üzerinde yer alması gereken önemli başlıklardan biridir. İşlenmemiş et, süt ve yumurta gibi hayvansal gıdalara katkı maddesi eklenmesi mevzuat gereği yasaktır. Bal ürünlerine herhangi bir katkı maddesinin katılmasına izin verilmemektedir. İşlem görmüş et, süt ve yumurta gibi hayvansal gıdalarda renklendirici, koruyucu ve tatlandırıcı gibi katkı maddelerine ilişkin çeşitli kısıtlamalar getirilmiştir (TGK, 2013; TGK, 2023).

2.6. Barkod Uygulamaları ve Tüketiciye Katkıları

Barkod veya çizgikod çeşitli kalınlık, aralık ve sayıdaki çizgilerin bir araya gelmesiyle oluşturulan, sayı veya harflerden oluşan, verinin bilgisayarlara doğru ve hızlı olarak aktarılmasını sağlayan teknolojiyi ifade etmektedir (SB, 2017). Barkod, üretici ve tüketici arasındaki bilgi akışını sağlayan önemli kavramlardan biridir. Barkod ticari işletmenin ürettiği ürünün üretim tarihi, seri numarası gibi bilgileri içermektedir. Ürünün orijinalliğine ek olarak izlenebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Ürünün üretim tesisinde karşılaşılabilecek bir üretim hatası durumunda barkod üzerindeki seri numarasının tespiti, geri çağırma işlemlerinin hızlı ve etkin bir şekilde yürütülmesini sağladığı için oldukça önemli bir yere sahiptir (Pekdinçer, 2022). Üretici firmalar, stok ve satış takibi ile hammadde ve işlenmiş

ürünlerin girişinden nihai satışa kadar olan tüm süreçlerde barkod sistemlerinden etkin bir şekilde yararlanabilmektedir. Bu sistem tüketicinin erişimine de aynı şekilde kolaylık getirilmiştir. Ürünün barkodu aracılığıyla bilgi almak isteyen tüketici, barkodu barkod okuyucuya veya kasaya yönlendirdiğinde, ürün bilgileri önceden işlenmiş olduğundan herhangi bir karışıklık veya yanlış fiyatlandırma riski en aza indirilmekte ve tüketici hakları korunmaktadır.

2.7. Tüketicinin Bilinçli Etiket Okuryazarlığı

Gıda ürünlerinin etiketlerini okumak yalnızca bir bilgi edinme durumu değil; aynı zamanda tüketiciyi sağlıklı beslenmeye teşvik eden önemli bir araçtır. Etiketi okuyan tüketicinin bu bilgileri doğru şekilde anlaması, yorumlaması ve günlük yaşamına etkin bir şekilde uygulayabilmesi açısından bilinçli olması büyük önem taşımaktadır. Kırklareli'nde yapılan bir çalışmada, tüketicilerin etikette yer alan bilgilerden en yüksek oranla "Son Kullanma Tarihi" ikinci olarak da "İçindekiler" kısmını okuduğu; en düşük oranda ise "Menşei" bilgisinin okunduğu, bu bilgelere ek olarak "Trans Yağ İçermez", "Lif Kaynağı" gibi ifadelerin sık okunduğu yapılan anketlerde ortaya konulmuştur. Söz konusu çalışma, 35 yaş altındaki bireylerde, ön lisans veya üzeri eğitim düzeyine sahip olanlarda ve beslenme eğitimi almış katılımcılarda gıda etiketlerini okuma ve anlama becerilerinin yüksek olduğunu göstermiştir (Yıldırım ve Çakır, 2025). Başka bir çalışma, sağlık bilimleri alanında (Diş Hekimliği, Eczacılık, Sağlık Bilimleri, Tıp ve Veteriner Fakültesi) eğitim gören üniversite öğrencilerinin probiyotik gıda tüketiminde, etiket bilgisi ve besin içeriğine dikkat etme eğilimlerinin belirgin şekilde yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle Sağlık Bilimleri Fakültesi (%32,0), Tıp Fakültesi (%27,6) ve Diş Hekimliği Fakültesi (%18,8) öğrencileri, probiyotik gıda satın alırken öncelikli olarak besin içeriğini değerlendirdikleri görülmüştür. Bu bulgu, çalışmaya katılan ilgili fakültelerdeki üniversite öğrencilerinin etiket okuryazarlığı farkındalığının daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (Koyun, 2024).

2.8. Gıda İsrafının Önlenmesinde Etiket Okuryazarlığının Rolü

Tarım ve Orman Bakanlığı'na göre gıda israfı; üretilen gıdaların ölçüsüz ya da bilinçsizce kullanılması ve tüketilmeden çöpe gitmesidir. Gıda israfı, tarladan tedarik zincirine, satış noktalarından evlere ve sofralara ulaşıncaya kadar üretilen gıdanın boşa gitmesi, yok olması veya tüketilemeyecek duruma gelmesiyle oluşmaktadır. Gıda kayıp ve israfının %56'sı gelişmiş ülkelerde, geriye kalan %44'lük kısmı ise gelişmekte olan ülkelerde ortaya çıkmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde gıda kayıpları daha çok üretim, saklama, işleme, dağıtım ve pazarlama aşamalarındaki altyapı eksikliğinden, gelişmiş ülkelerde ise perakende ve tüketim aşamalarındaki gıda israfından kaynaklanmaktadır (TOB, 2025c). Birleşmiş Milletler (BM) Çevre Programı (United Nations Environment Programme, UNEP) tarafından yayımlanan 2024 Gıda İsrafı Endeksi Raporu'na göre dünya genelinde 1,5 milyar ton gıdanın israfına dikkat çekilmiştir. Türkiye'de ise bu durum her yıl 8,7 milyon tondan fazla olup ve kişi başı 102 kilogram yiyecek israf edilmektedir. Tüketici hizmetine sunulan gıdanın yaklaşık %60'ı evsel atık

olarak israf edilirken, %28'i hizmet ve %12'si perakende sektöründe ortaya çıkmaktadır (İR, 2025). Dünya ve Türkiye'de gıda israfının azaltılmasında bilinçli tüketici olmak ve bu anlamda etiketi doğru okumak büyük önem taşımaktadır. Gıda satın alınırken ihtiyaç doğrultusunda alınması, bozulmaya yakın olan ürünlerin tercih edilmemesi, STT ve TETT tarihlerinin dikkatle incelenmesi, tüketim sırasında özellikle hayvansal gıdalar için uygun muhafaza koşullarının sağlanması ve ürünün belirtilen süre içerisinde tüketilmesi gerekmektedir. Etiketin dikkatli bir şekilde incelenmesi, tüketicinin ürünün kendisine uygunluğunu değerlendirmesi ve bu doğrultuda bilinçli karar vermesi, gıda israfının azaltılmasında dikkat edilmesi gereken önemli hususlardandır. Birey, bu ve benzeri hususları uygularken yalnızca kendi değerlerini değil, aynı zamanda toplumun değerlerini de gözetmektedir. Gıda israfının azaltılması, mevcut kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayarak sürdürülebilir gıda sistemlerine katkıda bulunmakta ve 2030 BM Sürdürülebilir Kalkınma amaçlarından biri olan "Sıfır Açlık" hedefine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır.

3. Sonuç ve Öneriler

Etiket, tüketici ile gıda arasındaki bilgi akışını sağlayan temel iletişim aracıdır. Bu açıdan bakıldığında, tüketicinin etiket üzerinden doğru ve güvenilir bilgiye erişebilmesi kadar, sağlık durumu ve bireysel gereksinimleriyle uyumlu gıdayı seçebilmesi oldukça önem taşımaktadır. Tüketici; "İçindekiler", "Besin Değerleri" ve "Alerjenler" gibi etiket bilgilerinden yararlanarak ürünün bileşimini değerlendirebilmekte, böylece kendisi için en uygun gıdaya bilinçli ve hızlı şekilde ulaşabilmektedir. Satın alınan gıda ürünün tüketici için uygunluğu kadar, sağlığa zarar vermeyecek şekilde tüketiciye ulaştırılması da önemlidir. STT, TETT, uygun muhafaza koşulları ve gıdanın tüketime uygunluk kriterlerinin ihmal edilmesi, halk sağlığı açısından ciddi riskler oluşturabilmektedir. Tüketicinin güvenilir gıdaya ulaşabilmesi ve güvenilir gıdanın da tüketiciye doğru koşullarda ulaştırılabilmesi, hem tüketici ve hem de üreticinin bilinçli yaklaşımını getirmektedir. Bu doğrultuda etiketlendirme, barkod gibi gıda ürününü kimliklendiren uygulamalar; üretici, tüketici ve tedarik zincirinin bütününe anlam kazandıran önemli araçlardır. İzlenebilirlik sayesinde sağlanan gıda güvenliği, güvenilir gıdaya erişimi temin etmenin ötesinde, tedarik zinciri boyunca ortaya çıkabilecek potansiyel sorunların zamanında belirlenmesine ve ortadan kaldırılmasına da olanak tanımaktadır.

Gıda etiketlerinin doğru okunması, tüketici bilincinin gelişmesine ve sağlıklı beslenme tercihlerinin artmasına katkı sağlamaktadır. Etiket okuryazarlığı aynı zamanda gıda israfının azaltılmasında etkili bir araçtır. Veteriner hekimlik, Tek Sağlık yaklaşımının temel bileşenlerinden biri olarak, hayvan sağlığının korunmasının yanı sıra hayvansal kaynaklı gıdaların güvenilirliği ve izlenebilirliğinin sağlanmasında, dolayısıyla halk sağlığının korunmasında kritik bir role sahiptir. Önümüzdeki dönemde, kamu otoriteleri ve üniversiteler tarafından özellikle aileler başta olmak üzere tüm tüketicilere yönelik daha yaygın eğitim programlarının planlanması ve uygulanması, gıda güvenliği bilincinin artması açısından öncelikli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynaklar

Anonim, 2004. 5179 sayılı gıdaların üretimi, tüketimi ve denetlenmesine dair kanun hükmünde kararnamenin değiştirilerek kabulü hakkında kanun. 25483 sayılı ve 5 Haziran 2004 tarihli Resmi Gazete, Ankara.

Anonim, 2010. 5996 sayılı veteriner hizmetleri, bitki sağlığı, gıda ve yem kanunu. 27610 Sayılı ve 13.06.2010 Tarihli, Resmi Gazete, Ankara.

Anonim, 2012. Türk gıda kodeksi gıdaların ait olduğu partiyi tanımlayan işaretler veya numaralar hakkında tebliğ. 28163 sayılı ve 04 Ocak 2012 tarihli Resmî Gazete, Ankara.

Anonim, 2017. Türk gıda kodeksi gıda etiketleme ve tüketicileri bilgilendirme yönetmeliği hakkında kılavuz.https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM/Belgeler/DB_Gida_Isletmeleri/temp/TGK_Gida_Etiketleme_Tuketici_Bilgilendirme_Yonetmelik_Kilavuzu.pdf (Erişim 02.09.2025).

Anonim, 2020. Toplu tüketim yerlerinde alerjen bildirimi. https://www.tarimorman.gov.tr/Konu/2023/Toplu_Tuketim_Yerlerinde_Alerjen_Bildirimi (Erişim 12.09.2025)

Anonim, 2025. Gıdanın dili: Etiket. https://ordu.tarimorman.gov.tr/Belgeler/G%C4%B1da%20Liflet/G%C4%B1dan%C4%B1n%20Dili;%20Etiket.pdf (Erişim 9 Eylül 2025).

Codex Alimentarius Commission. (CAC). 2024. General standard for the labelling of pre-packaged foodsCXS1-1985.https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh proxy/fr/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B1-1985%252FCXS_001e.pdf (Erişim 14.01.2025)

Doğu SÖ., Şireli UT. Gıdalarda izlenebilirlik. Gıda Dergisi 2015; 40(5): 295-302.

Food and Drug Administration (FDA). 1938. Food, Drug, Cosmetic Act FDA, Food and Drug Administration, Part II: 1938, https://www.fda.gov/about-fda/changes-science-law-and-regulatory-authorities/part-ii-1938-food-drug-cosmetic-act?utm (Erişim 07.05.2025).

Food Additives Amendment of 1958. (FAA). 1958. Public Law No 85-929. 72:1784-1789. https://www.govinfo.gov/content/pkg/STATUTE-72/pdf/STATUTE-72-Pg1784.pdf. (Erişim 23.04.2025).

Food and Agriculture Organization (FAO). 2018. Good Practice Guidelines (GPG) On National Seafood Traceability Systems (ISSN 2070-6065).

https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1cece1f0-a44e-4d90-b3c9-42608277e89f/content (Erişim 20.05.2025).

Food Safety and Inspection Service (FSIS). 1996. Pathogen reduction; Hazard analysis and critical control point (HACCP) systems; Final rule. Federal Register, 61(144), 38807-38989. https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/93-016F_0.pdf. (Erişim 16.04.2025).

Gökçe R., Ergezer H. Gıda mevzuatımız; nereden, nereye? Akademik Gıda 2016; 14(2): 225-229.

Gültekin F., Akın S. İşlenmiş et ürünleri ve gıda katkı maddeleri. Academic Platform Journal of Halal Lifestyle 2019; 1(1): 44-53.

Gültekin F. Bir bakışta gıda katkı maddeleri. 1. Baskı. İstanbul: Server İletişim Yayınları, 2014.

Gülseren D., Hapa A., Ersoy-Evans S., Elçin G., Karaduman A. Is there a role of food additives in recurrent aphthous stomatitis? A prospective study with patch testing. International Journal of Dermatology 2017; 56(3): 302-306.

İsraf Raporu (İR) 2025. 2025 Yılı İsraf Raporu. https://www.tgmp.net/eyayin/israf_raporu_2025.html (Erişim 13.04.2025).

Kılıç O., Eryılmaz GA. Gıda ambalajlarındaki etiket bilgilerine ve logolara yönelik tüketici duyarlılığı: Samsun ili örneği, Türkiye. Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi 2021; 8(3): 295-300.

Koç AA., Bölük G., Aşçı S. Gıda güvenliği ve kalite standartlarının gıda imalat sanayinde yoğunlaşmaya etkisi. Akdeniz İİBF Dergisi 2008; 16: 83-115.

Koyun H. Sağlık bilimleri alanında eğitim gören üniversite öğrencilerinin probiyotik gıda tüketim tercihlerinin belirlenmesi. (Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Veterinerlik Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 80, Sivas, Türkiye, 2024.

Öztürk M., Besler HT. Besin alerjileri. 1. Baskı. Sağlık Bakanlığı Yayın No: 727, 2008, Ankara.

Menderis M. En iyi denetçi tüketicinin kendisidir. Türk Tarım ve Orman Dergisi 2024; 286 (Kasım-Aralık): 42-47.

Miller LMS., Cassady DL. The effects of nutrition knowledge on food label use. A review of the literature. Appetite 2015; 92: 207-216.

Pekdinçer RT. Marka hukukunda barkod kullanımı ve barkoda müdahaleden kaynaklanan tecavüz halleri. Marmara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Hukuk Araştırmaları Dergisi 2022; 28(2): 1085-1110.

Peker Y., Caner C. Gıdaların etiketlenmesi ve çizgi kod sistemi BARKOD. Akademik Gıda 2006; 4(3): 37-41.

Sağlık Bakanlığı (SB) 2017. Beşeri Tıbbi Ürünler Barkod ve Karekod Uygulama Kılavuzu. https://www.its.gov.tr/Content/pdf/Beseri_Tibbi_Urunler_Barkod_ve_Karekod_Uygulama_Kilavuzu.pdf (Erişim 09.09.2025).

Şahin S. Gıda güvenliği ders notları. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, 2024, Sivas.

Tarım ve Orman Bakanlığı (TOB) 2025a. Gıda ve Yemin Resmi Kontrollerine Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına İlişkin Yönetmelik. 32894 sayılı ve 8 Mayıs 2025 tarihli Resmi Gazete, Ankara.

Tarım ve Orman Bakanlığı (TOB). 2025b. Gıda İşletmelerinde Karekod Kılavuz. https://guvenilirgida.tarimorman.gov.tr/Sayfa/Detay/1884?layout=modal# (Erişim 29.07.2025).

Tarım ve Orman Bakanlığı (TOB). 2025c. Gıda İsrafı ve Gıda Atığına Genel Bakış. https://www.tarimorman.gov.tr/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=77. (Erişim 12.09.2025).

Tercanlı E., Atasever M. Besin alerjileri. Academic Platform Journal of Halal Lifestyle 2021; 3(1): 31-53.

Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği Ek-II Bölüm D'sinde Yer Alan Gıda Kategorilerine İlişkin Kılavuz (TGK) 2013. https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM/Belgeler/DB_Gida_Isletmeleri/TGK_Gida_Katki_Maddeleri_Yonetmeligi_Gida_Kategorileri_Kilavuzu.pdf (Erişim 02.09.2025).

Türk Gıda Kodeksi Yumurta Tebliği (TGK) 2014. (2014/55) 29211 sayılı ve 20 Aralık 2014 tarihli Resmi Gazete, Ankara.

Türk Gıda Kodeksi Gıda Etiketleme ve Tüketicileri Bilgilendirme Yönetmeliği (TGK) 2017. 29960 (Mükerrer) sayılı ve 26 Ocak 2017 tarihli Resmî Gazete, https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/01/20170126M1-6.htm (Erişim 20.05.2025).

Türk Gıda Kodeksi İçme Sütleri Tebliği (TGK) 2019. Tebliğ No: 2019/12, 30699 sayılı ve 27 Şubat 2019 tarihli Resmi Gazete, Ankara.

Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği (TGK). 2023. 32338 (Mükerrer) sayılı ve 13 Ekim 2023 tarihli, Resmi Gazete, Ankara.

United States Statutes at Large, Fifty-Ninth Congress, 1905-1907, Session I, pp769-772. U.S. Congress. (USC). 1905 U.S. Statutes at Large, Volume 34 -1907, 59th Congress. United States, - 1907. https://www.loc.gov/item/llsl-v34/ (16.07.2025).

Yaralı E. Gıda zincirinde izlenebilirlik. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi 2019; 23(1): 108-119.

Yüceer M. Taze Yumurta ama hangisi: Organik, kafes, serbest dolaşan mı? Yoksa doğal, köy yumurtası mı?. Yumurta Üreticileri Merkez Birliği Dergisi 2021; 54 (Mart-Nisan): 46-47.

Yıldırım G., Çakır MA. Evaluation of consumers' ability to use and understand food labels. Istanbul Gelisim University Journal of Health Sciences 2025; 25: 140-152.