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): **4**

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
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. 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
Doç. Dr. Sadrettin YÜKSEL	Atatürk Üniversitesi, ERZURUM	sadrettin71@hotmail.com

Dil Editörleri Language Editors

Doç. Dr. Pınar USTA EVCİ	Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ISPARTA	pinarusta@isparta.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

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

İstatistik Editörleri Statistics Editors

Doç. 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 Gör. Burcu Sünbül AYHAN	Türk-Alman Üniversitesi, İSTANBUL	burcu.ayhan@tau.edu.tr
Ar. Gör. Esra Zeynep ŞENSOY	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	ezeynepsensoy@osmaniye.edu.tr
Öğretim Görevlisi 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. 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
Dr. Öğretim Üyesi Emriye ÇINAR RESULOĞULLARI	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	emriyecinar@osmaniye.edu.tr
Dr. Ar. Gör. Kadriye KURŞUN	Çukurova Üniversitesi, ADANA	kadriyehatipoglu01@gmail.com
Öğretim Gör. Tuba SAYGILI YILDIRIM	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	tubasaygiliyildirim@osmaniye.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



The referees list (Hakem listesi)

Year 2025, Volume 8, Issue **4** list of referees is given below.
(2025 yılı, Cilt 8, Sayı ***4****'deki hakemlerin listesi aşağıda verilmiştir).*

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

Hakemler	**Kurum**
Prof. Dr. Hasan AKGÜL	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Botanik Anabilim Dalı, ANTALYA
Prof. Dr. Cavit ARSLAN	Selçuk Üniversitesi Veteriner Fakültesi Zootekni Ve Hayvan Besleme Bölümü Hayvan Besleme Ve Beslenme Hastalıkları Anabilim Dalı, KONYA
Prof. Dr. Volkan BAKIŞ	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Uzay Bilimleri Ve Teknolojileri Bölümü Uzay Fiziği Anabilim Dalı, ANTALYA
Prof. Dr. Behiye Tuba BİÇER	Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, DİYARBAKIR
Prof. Dr. Muhammed Hanefi CALP	Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı, ANKARA
Prof. Dr. Serdar ÇARBAŞ	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı, KARAMAN
Prof. Dr. Eda SONBAŞ DHUGA	Adıyaman Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Fizik Anabilim Dalı, ADIYAMAN
Prof. Dr. Günhan ERDEM	Girne Amerikan Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Acil Yardım Ve Afet Yönetimi Bölümü Acil Yardım Ve Afet Yönetimi Pr. KKTC
Prof. Dr. Pakize ERDOĞMUŞ	Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı, DÜZCE
Prof. Dr. Hüseyin ERTAP	Kafkas Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Anabilim Dalı, KARS
Prof. Dr. Arif GÖK	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Endüstriyel Tasarım Bölümü Endüstriyel Tasarım Anabilim Dalı, KÜTAHYA
Prof. Dr. Hülya METİN GÜBÜR	Mersin Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Anabilim Dalı, İÇEL
Prof. Dr. Şenol GÜRSOY	Karabük Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı, KARABÜK
Prof. Dr. Kamil HALİLOĞLU	Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Ekoloji Anabilim Dalı, ANKARA

Prof. Dr. Faruk KARAASLAN	Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü Cebir Ve Sayılar Teorisi Anabilim Dalı, ÇANKIRI
Prof. Dr. Ali KARCI	İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı, MALATYA
Prof. Dr. Yunus KAYIR	Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, ANKARA
Prof. Dr. Utku KÖSE	Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı, ISPARTA
Prof. Dr. Hüseyin NURSOY	Bingöl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Zootekni Ve Hayvan Besleme Bölümü Hayvan Besleme Ve Beslenme Hastalıkları Anabilim Dalı, BİNGÖL
Prof. Dr. Özen ÖZER	Kırklareli Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü Cebir Ve Sayılar Teorisi Anabilim Dalı, KIRKLARELİ
Prof. Dr. Mustafa ŞENGÜL	Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, ERZURUM
Prof. Dr. Aylin ALTINIŞIK TAĞAÇ	Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü Fizikokimya Anabilim Dalı, İZMİR
Prof. Dr. Murat TİRYAKİOĞLU	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Tahıllar Ve Yemeklik Baklagiller Anabilim Dalı, ANTAKYA
Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ	Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı, ADANA
Prof. Dr. Hüseyin YILDIRIM	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı, KAHRAMANMARAŞ
Prof. Dr. Yusuf ZALAOĞLU	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Osmaniye Meslek Yüksekokulu Elektrik Ve Enerji Bölümü Elektrik Enerjisi Üretim, İletim Ve Dağıtımı Pr., OSMANİYE
Doç. Dr. Defne AKAY	Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Matematiksel Fizik Anabilim Dalı, ANKARA
Doç. Dr. Aykut Asım AKBAŞ	Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Veteriner Fakültesi Zootekni Ve Hayvan Besleme Bölümü Veterinerlik Zootekni Anabilim Dalı, BURDUR
Doç. Dr. Nigar ALEV	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi İktisat Bölümü İktisat Tarihi Anabilim Dalı, VAN
Doç. Dr. Tuğba Alp ARICI	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Emet Meslek Yüksekokulu Kimya Ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü Kimya Teknolojisi Pr. KÜTAHYA
Doç. Dr. Ezgi AYTAÇ	Konya Gıda Ve Tarım Üniversitesi Tarım Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Bitkisel Üretim Ve Teknolojileri Bölümü Bitkisel Üretim Ve Teknolojileri Pr. , KONYA
Doç. Dr. Veysel ACIBUCA	Mardin Artuklu Üniversitesi Kızıltepe Tarım Bilimleri Ve Teknolojileri Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı, MARDİN
Doç. Dr. Melike SEVİM BAYRAK	Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü Anorganik Kimya Anabilim Dalı, ERZURUM
Doç. Dr. Murat BAYRAKTAR	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı, ZONGULDAK
Doç. Dr. Kamil ÇELİK	Bartın Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı, BARTIN
Doç. Dr. Tuğçe ÇELİK	Ostim Teknik Üniversitesi Mimarlık Ve Tasarım Fakültesi İç Mimarlık Ve Çevre Tasarımı Bölümü İç Mimarlık Ve Çevre Tasarımı Pr.

	ANKARA
Doç. Dr. Talar Yontan ÇİZMECİ	İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi Ve Uzay Bilimleri Bölümü Astrofizik Anabilim Dalı, İSTANBUL
Doç. Dr. İbrahim Savaş DALMIŞ	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon Ve İmalat Anabilim Dalı, TEKİRDAĞ
Doç. Dr. Beyzanur ÇAYIR ERVURAL	Necmettin Erbakan Üniversitesi Havacılık Ve Uzay Bilimleri Fakültesi Havacılık Yönetimi Bölümü Havacılık Yönetimi Anabilim Dalı, KONYA
Doç. Dr. Sertaç GÖRGÜLÜ	Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı, BURDUR
Doç. Dr. İsmail Bülent GÜRBÜZ	Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü Tarım Politikası Ve Yayım Anabilim Dalı, BURSA
Doç. Dr. Nazlı YAZICI GÖZÜTOK	Marmara Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü Matematiğin Temelleri Ve Matematiklojik Anabilim Dalı, İSTANBUL
Doç. Dr. Canan EROĞLU GÜNEŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi Tıp Fakültesi Temel Tıp Bilimleri Bölümü Tıbbi Biyoloji Anabilim Dalı, KONYA
Doç. Dr. Nihal GÜZEL	Hitit Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Gıda Teknolojisi Anabilim Dalı, ÇORUM
Doç. Dr. Servet HASGÜL	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Üretim Ve Servis Sistemleri Anabilim Dalı, ESKİŞEHİR
Doç. Dr. Fırat İSMAİLOĞLU	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Bilgisayar Mühendisliği Kuramsal Temeller Anabilim Dalı, SİVAS
Doç. Dr. Hande Zeynep KAYAN	Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Mimarlık Fakültesi İç Mimarlık Bölümü İç Mimarlık Anasanat Dalı, İSTANBUL
Doç. Dr. Nebiye KIZIL	Hasan Kalyoncu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Mühendisliği Pr. GAZİANTEP
Doç. Dr. Erdinç KOCA	İnönü Üniversitesi Tıp Fakültesi Cerrahi Tıp Bilimleri Bölümü Anesteziyoloji Anabilim Dalı, MALATYA
Doç. Dr. Zafer KUYRUKÇU	Konya Teknik Üniversitesi Mimarlık Ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümü Bina Bilgisi Anabilim Dalı, KONYA
Doç. Dr. Mustafa KÜÇÜKTÜVEK	İskenderun Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi İç Mimarlık Bölümü İç Mimarlık Anabilim Dalı, İskenderun-ANTAKYA
Doç. Dr. Hacer LEVENT	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Beslenme Ve Diyetetik Bölümü Beslenme Bilimleri Anabilim Dalı, KARAMAN
Doç. Dr. Habip MURUZ	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Veteriner Fakültesi Zootekni Ve Hayvan Besleme Bölümü Hayvan Besleme Ve Beslenme Hastalıkları Anabilim Dalı, SAMSUN
Doç. Dr. Engin NAS	Düzce Üniversitesi Dr. Engin Pak Cumayeri Meslek Yüksekokulu Makine Ve Metal Teknolojileri Bölümü Endüstriyel Kalıpçılık Pr. DÜZCE
Doç. Dr. Hümeyra ÖRÜCÜ	Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Genel Fizik Anabilim Dalı, İZMİR
Doç. Dr. Pembe SABANCIGİL ÖZDER	Doğu Akdeniz Üniversitesi Fen Ve Edebiyat Fakültesi İstatistik Ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü İstatistik Ve Bilgisayar Bilimleri Pr. KKTC
Doç. Dr. Görkem ÖZTÜRK	Siirt Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü Tarım İşletmeciliği Anabilim Dalı, SİİRT
Doç. Dr. Gülsüm PALACIOĞLU	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fethiye Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü Fitopatoloji Anabilim Dalı, MUĞLA
Doç. Dr. Recep PALAMUTOĞLU	Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi

	Beslenme Ve Diyetetik Bölümü Toplu Beslenme Sistemleri Anabilim Dalı, AFYONKARAHİSAR
Doç. Dr. Yelda DURGUN ŞAHİN	Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi Mimarlık Ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümü Şehircilik Anabilim Dalı, ADANA
Doç. Dr. Hüseyin ŞANLI	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Meslek Yüksekokulu Motorlu Araçlar Ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü Otomotiv Teknolojisi Pr., TEKİRDAĞ
Doç. Dr. Nuran TAPKI	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü Tarım İşletmeciliği Anabilim Dalı, ANTAKYA
Doç. Dr. Selcen ÇELİK UZUNER	Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Moleküler Biyoloji Ve Genetik Bölümü Genetik Anabilim Dalı, TRABZON
Doç. Dr. Büşra YARANOĞLU	Balıkesir Üniversitesi Veteriner Fakültesi Zootekni Ve Hayvan Besleme Bölümü Veterinerlik Zootekni Anabilim Dalı, BALIKESİR
Doç. Dr. Saadet AKBAY YENİGÜL	Çankaya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi İç Mimarlık Bölümü İç Mimarlık Pr. ANKARA
Doç. Dr. Serap AKCAN YETGİN	Tarsus Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Tarsus, İÇEL
Doç. Dr. Eda BALABAN VAROL	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi İç Mimarlık Bölümü İç Mimarlık Anasanat Dalı, NEVŞEHİR
Doç. Dr. Gülay ZULKADİR	Mersin Üniversitesi Silifke Uygulamalı Teknoloji Ve İşletmecilik Yüksekokulu Organik Tarım İşletmeciliği Bölümü Organik Tarım İşletmeciliği Anabilim Dalı, İÇEL
Dr. Öğretim Üyesi Hayriye Serra ALTINOLUK	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektronik Anabilim Dalı, MUĞLA
Dr. Öğretim Üyesi Enver ERSOY ANDEDEN	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Moleküler Biyoloji Ve Genetik Bölümü Moleküler Biyoloji Ve Genetik Anabilim Dalı, NEVŞEHİR
Dr. Öğretim Üyesi Celal BAL	Gaziantep Üniversitesi Oğuzeli Meslek Yüksekokulu Mülkiyet Koruma Ve Güvenlik Bölümü İş Sağlığı Ve Güvenliği Pr. GAZİANTEP
Dr. Öğretim Üyesi Nurnehir BALTACI BOZKURT	Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Temel Eczacılık Bilimleri Bölümü Farmasötik Mikrobiyoloji Anabilim Dalı, AFYONKARAHİSAR
Dr. Öğretim Üyesi Sertaç BULUT	İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Gemi İnşaatı Ve Denizcilik Fakültesi Gemi İnşaatı Ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü Gemi Hidromekaniği Anabilim Dalı, İZMİR
Dr. Öğretim Üyesi Hacer KAYA ÇAKIR	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Fakültesi Moleküler Biyoloji Ve Genetik Bölümü Biyoteknoloji Anabilim Dalı, BİLECİK
Dr. Öğretim Üyesi Serap DOĞAN	Mardin Artuklu Üniversitesi Kızıltepe Tarım Bilimleri Ve Teknolojileri Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, MARDİN
Dr. Öğretim Üyesi Esma GÖKÇE	Toros Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Tıbbi Hizmetler Ve Teknikler Bölümü İlk Ve Acil Yardım Pr. İÇEL
Dr. Öğretim Üyesi Hasret GÜNEŞ	Adıyaman Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü Bitki Koruma Anabilim Dalı, ADIYAMAN
Dr. Öğretim Üyesi Şerif KAHRAMAN	Malatya Turgut Özal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, MALATYA
Dr. Öğretim Üyesi Nihan Bilge KAMER	Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Genetik Ve Biyomühendislik Bölümü Genetik Ve Biyomühendislik Anabilim Dalı, EDİRNE
Dr. Öğretim Üyesi Ceren BÖRÇEK KASURKA	Ordu Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Moleküler Biyoloji Ve Genetik Bölümü Moleküler Biyoloji Anabilim Dalı, ORDU

Dr. Öğretim Üyesi Gizem GÜL KOÇ	Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, ADANA
Dr. Öğretim Üyesi Erkan Sami KÖKTEN	Karabük Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, KARABÜK
Dr. Öğretim Üyesi Pakize Özlem KURT	Bursa Uludağ Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Park Ve Bahçe Bitkileri Bölümü Peyzaj Ve Süs Bitkileri Yetiştiriciliği Pr. BURSA
Dr. Öğretim Üyesi Başak ÖNCEL	Toros Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Otel, Lokanta Ve İkram Hizmetleri Bölümü/Aşçılık Pr. İÇEL
Dr. Öğretim Üyesi Çağla ÖZBEK	Toros Üniversitesi Güzel Sanatlar, Tasarım Ve Mimarlık Fakültesi Gastronomi Ve Mutfak Sanatları Bölümü Gastronomi Ve Mutfak Sanatları Pr. İÇEL
Dr. Öğretim Üyesi Beste Gizem ÖZBEY	Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Ekoloji Ve Çevre Biyolojisi Anabilim Dalı, ANKARA
Dr. Öğretim Üyesi Erman Kadir ÖZTEKİN	Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı, BAYBURT
Dr. Öğretim Üyesi Yavuzkan PAKSOY	Çukurova Üniversitesi Ceyhan Veteriner Fakültesi Zootekni Ve Hayvan Besleme Bölümü Veterinerlik Zootekni Anabilim Dalı, Ceyhan, ADANA
Dr. Öğretim Üyesi Enes Fatih PEHLİVAN	Ordu Üniversitesi Fatsa Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı Ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü Gemi Makineleri Anabilim Dalı, ORDU
Dr. Öğretim Üyesi Dursun SARAL	Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı Ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü Gemi Hidromekaniği Anabilim Dalı, TRABZON
Dr. Ar. Gör. Tuğçe KAYA	Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü Tarım Politikası Ve Yayım Anabilim Dalı, ADANA
Senior Research Associate Tetiana KRUPODOROVA	Department of Plant Food Products and Biofortification, Institute of Food Biotechnology and Genomics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv 04123, UKRAİNE

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): **4**

CONTENTS (İçindekiler)

RESEARCH ARTICLES (ARAŞTIRMA MAKALELERİ)	**Sayfalar**
Nurselin SÜLLÜ, Atıl KURT **İşten Ayrılma Durumunun Tahminlenmesinde Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanımı – Demir Çelik Sektöründe Bir Uygulama** *Using Machine Learning Algorithms to Predict Turnover - An Application in the Iron and Steel Industry*	1525-1543
Abdullah KARGIN **ANP Method on Generalized Set-Valued Neutrosophic Quintuple Numbers** *Genelleştirilmiş Küme Değerli Nötrosofik Beşli Sayılar Üzerine ANP Metodu*	1544-1571
Sinan ALTUN, Hatice ALTUN **Computer-Aided Disease Diagnosis Prediction Using Scalogram Images Obtained From Graded Scales Applied To Adolescents With Psychiatric Illness** *Psikiyatrik Hastalığı Olan Ergenlere Uygulanan Derecelendirilmiş Ölçeklerden Elde Edilen Scalogram Görüntüleri Kullanılarak Bilgisayar Destekli Hastalık Teşhis Tahmini*	1572-1597
Nilay BEĞİÇ **Green Synthesis, Characterization, and Antioxidant Properties of Silver Nanoparticles using *Helichrysum* sp. Extract** *Ölmez Çiçek Ekstresi Kullanılarak Gümüş Nanoparçacıkların Yeşil Sentezi, Karakterizasyonu ve Antioksidan Özellikleri*	1598-1612
Mehmet TARDU **Lack of Pseudouridine Synthase 7 Enzyme Sensitizes Yeast Cells to DNA-Damaging Agents** *Psödoüridin Sentaz 7 Enzim Eksikliği DNA Hasarına Neden Olan Ajanlara Karşı Maya Hücrelerini Hassas Hale Getirir*	1613-1623
Ahmet DOĞAN, Nurgül KARA **Sözcük Tabanlı Duygu Analizi: Sosyal Medya Paylaşımlarına Dayalı E-Ticaret Siteleri Memnuniyet Düzeyi Karşılaştırması** *Lexicon-Based Sentiment Analysis: Comparison of Customer Satisfaction Levels of E-Commerce Websites Based on Social Media Posts*	1624-1643

Ozan ÖZTÜRK **Influence of Intense Laser Field on the Electronic Structure and Third-Harmonic Generation in Asymmetric Double Inverse Parabolic Quantum Wells** *Asimetrik Çift Ters Parabolik Kuantum Kuyularındaki Yoğun Lazer Alanının Elektronik Yapı ve Üçüncü Harmonik Üretimi Üzerindeki Etkisi*	1644-1653
Ahmet YÖNETKEN, İdris KOSOVA **Rüzgâr Türbinleri İçin Yapay Zekâ Tabanlı Dinamik Kanat Açısı Kontrolü ile Enerji Verimliliğinin Araştırılması** *Investigation of Energy Efficiency with AI-Based Dynamic Blade Angle Control for Wind Turbines*	1654-1669
Ersin TEKİNEL, Buket AŞKIN, Çağla URAL **Hazır Çözünür Hardaliye Tozu ile Zenginleştirilmiş, Yağ ve Şeker Oranı Azaltılmış Dondurmanın Fizikokimyasal ve Duyusal Özelliklerinin Araştırılması** *Investigation of the Physicochemical and Sensory Properties of Ice Cream Enriched with Instant Powder of Hardaliye and Reduced in Fat and Sugar Content*	1670-1688
Hüseyin ERÇİN, Ayşe Merve ACILAR **Mesleki ve Teknik Eğitim Kurumları Dış Değerlendirme Verileriyle Tasarlanan Özdeğerlendirme ve Faaliyet Tavsiye Sistemi** *Self-Assessment and Activity Recommendation System Designed Using External Quality Evaluation Data of Vocational and Technical Education Institutions*	1689-1710
Hüseyin ER, Muhammet Emir KENGER, Aykut ÖZDÖNMEZ, Murat TEKKEŞİNOĞLU **Dynamical Stability Analysis of UZ Lyr and Z Dra Binary Systems with Potential Additional Bodies** *Potansiyel İlave Cisimlere Sahip Çift Yıldız Sistemi UZ Lyr ve Z Dra'nın Dinamik Kararlılık Analizi*	1711-1726
Mehmet KARAMAN **Muş Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut *(Cicer arietinum* L.*)* Genotiplerinin Fizyolojik ve Agronomik Özelliklerinin İncelenmesi** *Investigation of Physiological and Agronomic Characteristics of Some Chickpea (Cicer arietinum L.) Genotypes in Muş Ecological Conditions*	1727-1738
Ferhat KIZILGEÇİ, Negar TEBRİZLİ **Stres Tolerans İndeksleri Kullanılarak Ekmeklik Buğdayda Kuraklık Toleransının Değerlendirilmesi** *Evaluation of Drought Tolerance in Bread Wheat Using Stress Tolerance Indices*	1739-1751
Derya İlkay YILMAZ, Serdar Çağan GÜN, Umut BİLGİN **Kırmızı Et Tüketimini Etkileyen Faktörler: Üniversite Öğrencilerinin Tüketim Tercihleri** *Factors Affecting Red Meat Consumption: University Students' Consumption Preferences*	1752-1767
Nuh KORKMAZ ***Ceratophyllum submersum*'un Antioksidan, Antikolinesteraz ve Antiproliferatif Aktivitelerinin Değerlendirilmesi** *Evaluation of Antioxidant, Anticholinesterase and Antiproliferative Activities of Ceratophyllum submersum*	1768-1779
Esra ASLAN **Fabrication and Characterization of n-In_2S_3/p-Si Based Heterojunction Photodetectors** *n-In_2S_3/p-Si Tabanlı Heteroeklem Fotodedektörlerin Üretimi ve Karakterizasyonu*	1780-1794
Elife BÜYÜKÖZTÜRK **A Child-Centered Approach to User-Oriented Design in Restricted Areas: The Case of Osmaniye Temporary Shelter** *Sınırlandırılmış Alanlarda Kullanıcı Odaklı Tasarıma Çocuk Merkezli Bir Yaklaşım: Osmaniye Geçici Barınma Alanı Örneği*	1795-1815

Mehmet Şirin DEMİR **Kesir Türevli Diferansiyel Denklemlerin Kollokasyon Yöntemi ile Çözümü** *Solution of Fractional Differential Equations by Collocation Method*	1816-1828
Hatice Kübra ALTUNOK, Fatih Kürşat FIRAT **Zemin Kar Yükü Değerinin Meteorolojik Veriler Kullanılarak Bulunması, Aksaray Örneği** *Determination Ground Snow Load Value Using Meteorological Data, Aksaray Example Case*	1829-1844
Emine KAYHAN, Mehmet KAYHAN **Synergistic Effects of ATH, APP, Zinc Borate, and Antimony Oxide on the Mechanical and Flame-Retardant Properties of Glass Fiber-Reinforced Polyester Composites** *ATH, APP, Çinko Borat ve Antimon Oksitin Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozitlerin Mekanik ve Alev Geciktirici Özellikleri Üzerindeki Sinerjik Etkileri*	1845-1862
Samet GÜRGEN **Performance Analysis of GA and PSO Algorithms in Training Phase of Artificial Neural Network Model for Estimating Main Engine Power of LPG/LNG Ships** *LPG/LNG Gemilerinin Ana Makine Güç Tahmini için Yapay Sinir Ağı Modelinin Eğitim Aşamasında GA ve PSO Algoritmalarının Performans Analizi*	1863-1881
Işıl SARAÇ SİVRİKAYA, Abdullah GÜLLER, Bekir TOSUN **Antifungal Activity of Heracleum platytaenium Essential Oil Against Fungi Causing Apple Scab and Monilia Disease** *Heracleum platytaenium Boiss. Uçucu Yağının Elma Kara Leke ve Monilya Hastalığına Karşı Antifungal Aktivitesinin Belirlenmesi*	1882-1892
Nazik Meziyet DİLEK, Halime ALP **Use of Various Chili Powder in Chicken Patties: Effects on Color and Oxidative Stability** *Tavuk Köftelerinde Çeşitli Acı Biber Tozlarının Kullanımı: Renk ve Oksidatif Stabilite Üzerine Etkileri*	1893-1906
Tuğçe KALAYCI, Alım Selin MUTDOĞAN **Geri Dönüştürülmüş 3D Betonla Sürdürülebilir Kampüs Mobilyası Tasarımı** *Sustainable Campus Furniture Design with Recycled 3D Concrete*	1907-1925
Mesut ABANUZOĞLU, Serap NIĞDELIOĞLU DOLANBAY ***In Vitro* Wound Healing and Antibiofilm Potential of β-Glucan and L-EPS Obtained from *Lactoplantibacillus plantarum* GD2** *β-Glukan ve Lactoplantibacillus plantarum GD2'den Elde Edilen L-EPS'nin İn Vitro Yara İyileştirici ve Antibiyofilm Potansiyeli*	1926-1940
Ülge TAŞ **Enhancing Space Efficiency Through Improvement Strategies in Industrial Pre-Assembly Lines** *Endüstriyel Ön Montaj Hatlarında İyileştirme Stratejileriyle Alan Verimliliğinin Artırılması*	1941-1952
Süleyman Gökhan ÇOLAK **CO_2 Adsorption in Cu_2BaSnS_4/Polyaniline Composites: A Synergistic Approach** *Cu_2BaSnS_4/Polyanilin Kompozitlerinde CO_2 Adsorpsiyonu: Sinerjik Bir Yaklaşım*	1953-1963
Sema ALAŞAHAN , Mehmet Hanifi YALÇIN, Aysel ERASLAN ŞAKAR **Determination of Some Characteristics of Incubated Unfertilized Emu (*Dromaius novaehollandiae*) Eggs** *Kuluçkaya Yatırılan Döllenmemiş Emu (Dromaius novaehollandiae) Yumurtalarının Bazı Özelliklerinin Belirlenmesi*	1964-1974
REVIEWS	
Musa ÇALIŞKAN, Yunus KAYIR **Görüntü İşleme Tekniği ile Üretimde Süreç İzleme**	1975-1992

Monitoring Production by Image Processing Technique	
Yavuzkan PAKSOY, Ahmet KOLUMAN **At Beslemede Probiyotik Kullanımı** *Probiotics in Horse Nutrition*	1993-2005
Erhan APTULLAHOĞLU **Kanser Tedavisinde PI3K/AKT/mTOR Yolunun Hedeflenmesi: Yeni Nesil mTOR İnhibitörlerine Güncel Bir Değerlendirme** *Targeting the PI3K/AKT/mTOR Pathway in Cancer Therapy: A Current Evaluation of Next-Generation mTOR Inhibitors*	2006-2038

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1525-1543, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1525-1543, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

İşten Ayrılma Durumunun Tahminlenmesinde Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanımı – Demir Çelik Sektöründe Bir Uygulama

Nurselin SÜLLÜ[1], Atıl KURT[2*]

[1]Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
[2]Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Antalya

[1]https://orcid.org/0000-0002-8902-3959
[2]https://orcid.org/0000-0002-5438-3743
*Sorumlu yazar: atil.kurt@alanya.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 07.11.2024
Kabul tarihi: 23.03.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Makine öğrenmesi
Rastgele orman algoritması
Çalışan tutundurma
İşten ayrılma tahminlenmesi

ÖZ

Zorlu çalışma koşullarına sahip demir-çelik sektöründeki birçok firma, mevcut personeli elde tutmanın maliyetinin yeni bir çalışan işe almaktan daha düşük olması nedeniyle çalışan devir oranını düşürmeye odaklanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, makine öğrenmesi algoritmalarının kullanılmasıyla işten ayrılma riski olan çalışanları tahmin etmek, işe alımlarda hangi kriterlere öncelik verilmesi gerektiğini belirleme ve çalışan bağlılığını artırmaya yönelik stratejik kararlar geliştirme süreçlerinde işletmelere rehberlik etmektir. Çalışma kapsamında, Knime ve Python programları kullanılarak bir demir-çelik firmasının 16 yıllık sürede toplam 2318 çalışan için 14 farklı niteliği içeren veriler analiz edilmiştir. Çalışmada beş farklı makine öğrenmesi algoritması uygulanmış ve en yüksek doğruluk oranına (%78,40) Rastgele Orman Algoritması ile ulaşılmıştır. Rastgele Orman Algoritması yardımıyla, işten ayrılmalara yol açabilecek en önemli faktörler belirlenmiştir.

Using Machine Learning Algorithms to Predict Turnover - An Application in the Iron and Steel Industry

Research Article

Article History:
Received: 07.11.2024
Accepted: 23.03.2025
Published online: 16.09.2025

Keywords:
Machine learning
Random forest algorithm
Employee retention
Turnover prediction

ABSTRACT

Since the cost of retaining the existing staff is lower than the cost of hiring a new staff for many companies, including companies in the Iron and Steel Sector, which have challenging working conditions, it aims to have a low labor turnover rate. The aim of this study is to guide businesses in the processes of predicting employees at risk of turnover by using machine learning algorithms, determining which criteria should be prioritized in recruitment, and developing strategic decisions to increase employee loyalty. The machine learning algorithms in the study were implemented through Knime and Python programming languages. In the application, the data, which took place in an Iron and Steel company in a 16-year period, consists of 14 different attributes that may be effective on the resignation of 2318 personnel. Six different machine learning algorithms were applied and the most successful of them was the Random Forest Algorithm with an accuracy rate of approximately 78.40%. Therefore, the most important criteria leading to turnover were determined using the Random Forest Algorithm. As a result of this study, it will be possible to make decisions such as whether the existing staff has the potential to leave the job, which criteria should be prioritized in recruitment and the necessary actions to be taken to ensure the continuity of the staff.

To Cite: Süllü N., Kurt A. İşten Ayrılma Durumunun Tahminlenmesinde Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanımı – Demir Çelik Sektöründe Bir Uygulama. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1525-1543.

1. Giriş

İşletmelerdeki insan kaynakları yönetiminin, çalışanların ihtiyaçlarına karşılık verme ve ücret, izin, işe alım gibi süreçlerin yanı sıra merkezinde insan faktörü bulunduğundan, insana değer verme, çalışanları motive etme ve çalışanı tutundurma faaliyetleri de bulunmaktadır. İnsan kaynakları yönetimi makro ölçekte, çalışanların bilgi birikimine sahip olması ve kurumların pazarda rekabet edebilmeleri için oluşturdukları planda insanı baş unsur olarak gösterilmesi gerektiğine dayanmaktadır. Mikro ölçekte ise kurum içi organizasyonda uyum ve yeteneklerin yönetilmesi ile açıklanmaktadır (Karakütük, 1997).

Demir çelik sektörü inşaat, otomotiv, beyaz eşya, gemi yapımı, makine imalatı gibi pek çok endüstriye demir-çelik sağlayan ve onların üretimi, işlenmesi ve satışıyla ilgilenen sanayi koludur. Demir çelik sektöründe yer alan işletmelerin nitelikli personel ihtiyacına sahip olmasından kaynaklı işe alım süreçleri uzun soluklu olmakta ve yetenekli bilgi birikimine sahip olan mevcuttaki personellerin kaybedilmemesi konusu önem taşımaktadır. Personel kaybı yaşanması sahadaki işlerin aksamasına, çalışanların iş yükünün artmasına ve mesaili çalışma düzenine geçilmesine neden olmaktadır. Tüm bu sorunlar ile karşılaşmamak adına ve iş gören devir oranının düşük olması hedeflendiğinden mevcut personellerin tutundurulması sektör için olumlu bir olgudur. İstifa süreçleri firmayı zaman, maliyet ve operasyonel açıdan olumsuz etkileyeceğinden istifaların doğru şekilde öngörülerek ilgili tedbirlerin alınması ve çalışan memnuniyetinin sağlanması önem arz etmektedir.

Demir çelik sektöründeki karşılaşılan bu zorluklar insan kaynakları yönetiminin daha etkin ve veriye dayalı karar mekanizmalarının geliştirmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Bu kapsamda, çalışanların işten ayrılma durumlarının tahmin edilmesi, iş gücü planlaması ve personel tutundurmayı daha etkili hale getirebilir. Bu noktada, makine öğrenmesi teknolojilerinin devreye girmesi, veri tabanlı analizler yaparak istifa eğilimlerini ve bu eğilimlerin nedenlerini belirleme imkânı sunabilmektedir. Bu tür teknoloji kullanımları mevcut personelin elde tutulmasının yanı sıra işe alım süreçlerinde daha stratejik kararlar alınmasına katkı sağlar. İnsan kaynakları alanında makine öğrenmesi uygulamaları zaman içerisinde kuruluşlar tarafından kullanılmaya başlanmıştır ancak yapay zekanın insan kaynaklarındaki uygulamadaki zorluk ve karmaşıklık nedeniyle daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Garg ve ark., 2022; Kişi, 2023).

Araştırmalar incelendiğinde makine öğrenmesinin yapay zekanın bir alt dalı olarak tanımlandığı görülmektedir (Alkan, 2024). Makine öğrenmesi, verilerin belirli bir probleme uygun olarak modellenmesine yarayan algoritmalardır. Makine öğrenmesi, bilgisayar sistemleri açıkça programlanmadan veri ve deneyimlerden öğrenilmesini sağlar, büyük miktarda veriyle eğitilir ve belirli bir görevi yerine getirmek için verileri kullanarak ilişkiler çıkarır. Makine öğrenmesinin probleme özgü olması daha etkili sonuçlar vermesini sağladığı için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlara denetimli, denetimsiz, pekiştirmeli ve derin öğrenme örnek olarak verilebilir (Murphy, 2012).

İstifa süreçleri firmayı zaman, maliyet ve operasyonel açıdan olumsuz etkileyeceğinden istifaların doğru şekilde öngörülerek ilgili tedbirlerin alınması ve çalışan memnuniyetinin sağlanması önem arz etmektedir. Bu kapsamda makine öğrenmesi uygulamaları kullanılarak insan kaynakları faaliyetlerinden

olan çalışan tutundurma üzerinde değerlendirmeler yapılmış olup, problem için şu katkılar elde edilmiştir: (1) İstifa durumunun tahminlenmesi, (2) istifaya neden olacak etkenlerin sınıflandırılması, (3) olası istifaları önlemek için yapılması gereken önlemler.

Yapay zekanın insan kaynaklarında kullanımı bu çalışmada teorik ve uygulamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Teorik ve hazır veri seti kullanılan araştırmalardan farklı olarak gerçek veriler üzerinde uygulanması çalışmayı özgün kılmaktadır (Çetin, 2024, Widiyawati, 2023). Uygulama kapsamında firmadan alınan gerçek veriler üzerinde çalışılmış ve elde edilen ham veri seti, eğitim ve test seti olarak ayrılmıştır. Personellerin işten ayrılma üzerinde etkisi bulunabileceği tahminlenen nitelikler ele alınmış ve bu nitelikler girdi özelliği taşımıştır. Tahminlemedeki çıktı ise işten ayrıldı ya da ayrılmadı şeklinde değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, çalışmada ele alınan problemin çıktıya sahip olması nedeniyle denetimli makine öğrenmesi olarak sınıflandırılmıştır. Kullanımı, karşılaştırma yapılarak değerlendirilmesi ve başarı oranları göz önüne alınarak Python ve paket program olan Knime (Konstanz Information Miner) kullanılmıştır. Her iki platformda da Rastgele Orman, Naive Bayes, Karar ağacı, Destek Vektör Makineleri ve k-en Yakın Komşu Algoritmaları kullanılarak tahminlemeler gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalar yapılarak en iyi tahminlemede bulunan algoritma tespiti gerçekleştirilmiştir.

Tüm bu faktörler göz önüne alındığında araştırma, ülkemizdeki insan kaynakları alanında makine öğrenmesi algoritmalarının uygulanması konusunda hem gerçek veri kullanımı hem de bu sektörde daha önce benzer bir çalışmanın yapılmamış olması sebebiyle özgün değere sahiptir. Aynı zamanda çalışmanın detaylı incelemesi yapıldığı takdirde uygulama adımları ile gelecekteki projeler için de yol gösterici niteliği taşıyabilecektir. Çalışmanın devamında konu ile ilgili yapılan çalışmaların olduğu literatür incelemesi kısmı bulunmaktadır. Demir çelik sektöründeki problem ve firmadan elde edilen veri setinin oluşturulması ve hazırlanması çalışmanın 3. kısmında değinilecek olup, 4. kısımda çözüm için kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar tartışılacaktır. Son olarak, 5. bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek öneriler sunulacak ve sonuç kısmı ile sonlandırılacaktır.

2. Literatür Taraması

Bu bölümde literatürde insan kaynakları yönetimi alanında yapılan yapay zeka uygulamaları incelenecektir. Bu alanda yapılan çalışmaları inceleyen birçok inceleme çalışması bulunmaktadır (Gelinas ve ark., 2022; Palos-Sanchez ve ark., 2022; Bujold ve ark., 2024). Bu çalışmalara ek olarak literatürde yapay zeka uygulamalarının insan kaynakları yönetimindeki birçok probleme uygulanabilirliği (Strohmeier ve Piazza, 2015), insan kaynaklarındaki yeri (Khatri ve ark., 2020) ve insan kaynakları üzerinde evrimsel süreci (Jatoba ve ark., 2019) gibi yapay zekanın belirli bir özel alandaki çalışmalar da mevcuttur. İncelemiş olduğumuz çalışmalarda daha çok çalışan kaybı tahminleme problemleri üzerinde çalışıldığı gözlemlenmiştir.

Potansiyel istifaların makine öğrenmesi algoritmaları ile tahminlenmesi problemi veri havuzu Kaggle üzerinden alınan veriler ve Knime programı kullanılarak çalışılmıştır (Widiyawati, 2023). Çalışmada

Naive Bayes algoritması kullanılmış ve %81,16 oranında doğruluk başarısı elde edilmiştir. Fallucchi ve ark. (2020) çalışmasında çalışan işten ayrılma süreci tahminleme problemi aynı veri seti sağlayıcısını kullanılarak 6 farklı algoritma denenmiş ve performans değerlendirmelerine göre en başarılı sonuç Gaussian Naive Bayes ile elde edilmiştir. Arromrit ve ark. (2023) ise aynı konu ve veri seti platformunu kullanarak birçok algoritma uygulamış ve en iyi sonuç Rastgele Orman Algoritması ile elde edilmiştir. Punnoose ve Ajit (2016) çalışanların devir oranı üzerinde bir çalışma yapmış ve birçok algoritma tarafından sınanmış olup en iyi sonucun Aşırı Gradyan Güçlendirme yöntemi tarafından bulunduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmalarında potansiyel istifalarda ne yapılabilir sorusu üzerine de derin öğrenme algoritmaları uygulanabilirliği önerilmiştir. Atef ve ark. (2022) çalışmalarında IBM tarafından yaratılan çalışan devir verilerini kullanarak k-en yakın komşu arama ve rastgele orman algoritmalarını kullanarak tahminleme yapmış ve en iyi sonucu k-en yakın komşu ile elde etmişlerdir. Diğer bir çalışan devir tahmini çalışmasında ise tekrarlayan sinir ağları kullanılarak e-posta iletişim analizi yapılarak işten ayrılma durumunun tahminlenmesi yapılmış olup %74 oranında başarı elde edilmiştir (Korytkowski ve ark., 2023).

Endonezya'nın telekomünikasyon şirketindeki çalışan kaybı problemi için iki yıllık gerçek verileri kullanılarak 3 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmış ve en iyi sonuç %97.5'lik doğruluk ile Rastgele Orman Algoritması olmuştur (Alamsyah and Salma, 2018). Diğer bir telekomünikasyon şirketinin çalışan kaybı tahminlemesi problemi baz alınarak üretilen veriler ile yapılan çalışmada ise 8 farklı algoritma Python ile uygulanmış olup Rastgele Orman Algoritması (%92.2) en iyi sonucu vermiştir (Uzak, 2022). Mhatre ve ark. (2020) yine çalışan kaybı tahminlemesi çalışması yapmış olup 6 farklı algoritma denemiş ve en iyi çözüm Aşırı Gradyan Artırma (%96) algoritması ile elde etmişlerdir. Başka bir çalışan kaybı tahmini problemi için 5 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmış ve %86 başarı oranı ile Lojistik Regresyon Algoritması en iyi performansı vermiştir (Mohbey, 2021). Ayrıca çalışmalarında bir ara yüz tasarlanarak erken uyarı sistemi oluşturulmuştur. Al-Darraji ve ark. (2021) Derin Sinir Ağları kullanılarak başka bir çalışan kaybı tahmini problemi çalışılmış ve makine öğrenmesi teknikleri ile insan kaynakları planlamasının verimliliğinin artırılacağı vurgulanmıştır. Guerranti ve Dimitri (2023) çalışan kaybı tahmini ile çeşitli nitelikler arasında korelasyon analizi yapmış ve birçok algoritmayı sınayarak en iyi sonucu %88'lik doğruluk performans ile Lojistik Regresyon Algoritması ile elde etmiştir.

Çalışan kaybı tahmini çalışmalarının yanı sıra insan kaynakları yönetimi için farklı yapay zeka çalışmaları da bulunmaktadır. Aday seçimi ve adayların elde tutulma problemi 12 farklı nitelik kullanılarak ele alınmış ve 8 farklı algoritma kullanılarak Marvin ve ark. (2021) tarafından çözülmüştür. En iyi çözüm Rastgele Orman Algoritması (%92) ile elde edilmiştir. Başka bir aday seçim problemi ise Tian ve ark. (2023) tarafından çalışılmış olup 5 farklı algoritma sınanmıştır ve en iyi çözüm Destek Vektör Makineleri algoritması tarafından elde edilmiştir. Zhu (2021) çalışmasında insan kaynaklarında gradyan iniş algoritması kullanan bir ücret tahmin modeli tasarlamıştır. Nawaz ve ark. (2024) çalışmalarında yapay zeka adaptasyonun insan kaynaklar yönetimi üzerine etkisini farklı çıktılara

odaklanarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda doğruluk, bilgi işlem gücü ve kapasitesi, kişiselleştirmenin zaman tasarrufu ve maliyet azaltmayı önemli ölçüde etkilediğini, otomasyon ve gerçek zamanlı deneyimin ise etkilemediğini göstermektedir.

Ülkemizde makine öğrenmesi ile Telekomünikasyon sektöründeki çalışan kaybı tahmini üzerine bir çalışma yapılmıştır (Uzak, 2022). Yaptığımız çalışma ile bu çalışma arasında hem uygulama aşamasında farklılıklar vardır hem de uygulandığı sektörler birbirinden farklıdır. Buna ek olarak bu çalışmanın aksine çalışmamızda gerçek veriler kullanılmıştır. Bu çalışmanın daha önce yapılan araştırmalardan farkı, demir çelik sektöründe gerçekleştirilmesi, gerçek verilerin kullanılması, birden fazla makine öğrenmesi platformunda ve farklı makine öğrenmesi algoritmalarının uygulanarak karşılaştırılmasıdır.

3. Veri Setlerinin Oluşturulması ve Hazırlanması

Yapılan araştırmada yapay zeka alt dallarından olan makine öğrenmesi algoritmalarından yararlanarak, demir-çelik sektöründeki bulunan bir firmanın geçmişte istifa etmiş çalışanların özellikleri incelenerek, mevcuttaki veya istihdam edilmesi planlanan adayların gelecekte istifa etme olasılığı tahminlenecektir. Çalışanların görevinden istifa etme kararını almasında etkili olabilecek iç ve dış olmak üzere pek çok farklı etmen bulunmaktadır. Öncelikle personellerin işten istifa etmesinde önemli rol oynayabilecek 14 adet nitelik belirlenmiştir. Değerlendirmeye alınan nitelikler ile işten istifa edip etmediği kontrol edilerek gelecekteki istifa durumunun tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Nitelikler, kişisel deneyim ve insan kaynakları fonksiyonlarında deneyimli karar vericilerin ortak görüşleri, literatür araştırmalarında sırasında incelenen çalışmalar, analiz ve yöntemin somut ve ölçülebilir veriler gerektirdiği dikkate alınarak seçilmiştir. İstifa üzerinde etkili olabilecek demografik özellikler ve gizlilik kuralları çerçevesinde değerlendirilebilecek diğer kriterler de göz önünde bulundurulmuştur. Ancak, istifaya etki edebilecek ast-üst ilişkileri, kurumsal aidiyet, iletişim, mobbing gibi kişisel veriler, genellikle soyut, ölçülmesi zor, eksik, yanlış veya yanlı olma riskine sahip olduğu için değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Ayrıca, anket ve envanter sonuçlarının gizlilik açısından uygun olmaması, bu tür verilerin analiz dışında bırakılmasının bir diğer önemli sebebidir. Veriler işlenirken veri setinde nümerik olmayan nitelikler sayısal değişkenlere dönüştürülmüştür. Sayısal değerlere dönüştürülme adımında niteliğe bağlı olarak verilerin birbirilerine göre üstünlük ilişkisi olup olmadığı göz önüne alınmıştır. Bahsedilen 14 nitelik, istifa edip edilmemesi ile ilgili veriler, açıklamalar ve verilerin sayısal işlenme şekilleri aşağıda listelenmiştir.

- Pozisyon: Çalışanın unvanını temsil etmekte olup veri setinde, Formen, Genel müdür, İşçi, Kıdemli mühendis, Kıdemli uzman, Müdür, Müdür yardımcısı, Mühendis, Şef, Uzman, Uzman Yardımcısı ve Vardiya amiri olmak üzere on iki farklı pozisyon türü bulunmaktadır. Unvanların birbirine karşı hiyerarşik açıdan üstünlüğü bulunmaktadır. Firmanın organizasyon şeması göz önüne alındığında bazı unvanların birbirine karşı üstünlüğü bulunmadığı bilinmektedir, dolayısıyla bu pozisyona aynı puan verilmiştir. Numaralandırma yapılırken, işçi 1, formen 2, uzman yardımcısı 3, mühendis ve uzman 4, kıdemli mühendis ve kıdemli uzman 5, vardiya

amiri ve şef 6, müdür yardımcısı 7, müdür 8 ve son olarak genel müdür ise 9 şeklinde sayısallaştırılmıştır.

- Kıdem: Kıdem çalışanın işyerinde fiilen çalıştığı süreyi belirtmektedir. İşten ayrılan personeller için işten ayrılış tarihinden işe giriş tarihinin çıkarılması ile elde edilmiştir. İşe devam eden personeller için ise kıdem, temsili olarak cari yılın son günü 31.12.2023 tarihinden işe giriş tarihinin çıkarılması ile elde edilmiştir.
- Yaş: Çalışanların yaşını göstermekte olup işten ayrılan personeller için işten ayrılış tarihinden doğum tarihinin çıkarılması ile elde edilmiştir. İşe devam eden personeller için ise yaş, temsili olarak 31.12.2023 tarihinden doğum tarihinin çıkarılması ile elde edilmiştir.
- Doğum Yeri: Çalışanların doğum yerini belirtmektedir ve veri setinde 68 farklı şehir bulunmaktadır. Doğum yeri niteliğinde 68 benzersiz değer bulunmaktadır ve her bir şehir birbirinden farksızdır yani herhangi üstünlük bulunmamaktadır.
- Medeni Durum: Evli ya da bekar olmak üzere çalışanların medeni durumunu belirtmektedir. Bu veride "Evli" olan veriler 1, "Bekar" olan veriler 0 olarak gösterilmiştir.
- Çocuk Sahibi: Çalışanların çocuk sahibi olup olmadığını göstermektedir. Çocuk sahibi olan çalışanla "Evet (1)", olmayanlar ise "Hayır (0)" olarak gösterilmiştir.
- Engellilik: Çalışanların engelli olup olmadığı ve engelli olması durumunda kaçıncı dereceden engelli olduğunu belirtmektedir. Engelli olmayan çalışanlar "Yok" olarak girilmiştir, engelli olan çalışanların ise birinci derece, ikinci derece, üçüncü derece engelli şeklinde açıklanmıştır. Engellilik kriterinde personelin engellilik durumundan etkilenme durumuna göre sıralama yapılmıştır, dolayısıyla bu kriterde üstünlük mevcuttur. Engellilik durumu bulunmayan personel 0, üçüncü derece yakını engelli olan personel 1, birinci derece yakını engelli olan 2, personelin kendisi üçüncü derece engelli olması 3 ve personelin kendisinin ikinci derece engelli olması ise 4 olmak üzere nümerik hale getirilmiştir.
- Emeklilik: Çalışanların emeklilik durumunu göstermektedir. Emekli olan personeller "Emekli", emekli olmayan personeller ise "Normal" şeklinde ifade edilmiştir. Bu veride "Normal" olan veriler 1, "Emekli" olan veriler 0 olarak gösterilmiştir.
- Tehlike Durumu: Demir çelik sektörü iş sağlığı ve güvenliği bakımından yüksek risk barındırdığından tehlike durumu çalışma için önemlidir. İşin yükü ve riski değerlendirilerek yüksek risk taşıyan pozisyonlar "Çok Tehlikeli", diğer pozisyonlar ise "Tehlikeli" olarak değerlendirilmiştir. Burada "Çok tehlikeli" olan veriler 1, "Tehlikeli" olan veriler ise 0 olarak gösterilmiştir. Bazı beyaz yaka çalışanların da sahada doğrudan tehlikeli alanlarda görev almasından dolayı bu sınıfta değerlendirilmiştir.
- Eğitim Düzeyi: Çalışanların eğitim seviyesini belirtmektedir. Personellerin eğitim düzeyleri; ilköğretim, lise (düz lise, açık öğretim lisesi, Anadolu lisesi vb.), meslek lisesi, ön lisans, lisans ve yüksek lisans olmak üzere veri setinde altı farklı öğrenim düzeyi bulunmaktadır. Eğitim

düzeyi niteliğinde ise verilerin birbirine üstünlüğü bulunmaktadır. Bu nedenle, eğitim seviyesi düşükten yükseğe doğru puanı artacak şekilde sıralanmıştır. Eğitim düzeyi, ilköğretim 1, meslek lisesi ve lise denk olduğundan eşit puan 2, ön lisans 3, lisans 4 ve yüksek lisans 5 şeklinde nümerik hale getirilmiştir.

- Maaş Düzeyi: Çalışanların almış olduğu ücret seviyesini göstermektedir. Çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere beşli ölçek tercih edilmiştir. Düzeyler, işten ayrılan personeller için çalışanların işten ayrıldığı tarihteki maaşının yine aynı dönemdeki asgari ücrete oranlanması ile belirlenmiştir. İşten ayrılmayan personeller için ise mevcut ücretlerinin 2023 güncel asgari ücrete oranlanması ile elde edilmiştir. Oranlar küçükten büyüğe doğru sıralanarak çok düşükten çok yükseğe doğru sıralanmıştır. Beyaz yaka personellerin maaşları aynı şekilde alınmış, mavi yaka personellerin ise ücretleri saatlik şeklinde ödendiğinden, mavi yaka çalışanların ücretli otuz günlük bir ay şeklinde 225 saat ile saatlik ücretinin çarpılması ile aylık ücrete çevrilmiştir. Şirket politikası gereği ücret gizliliği saklı tutulduğundan gerçek veriler kullanılmış ancak oran kullanılması tercih edilmiştir. Maaş düzeyi ise veri seti oluşturulması esnasında beşli ölçeklendirilmiştir. Buna göre maaş düzeyi için sayısallaştırma işlemi çok düşükten çok yükseğe artacak şekilde numaralandırılmıştır. Çok düşük 1, düşük 2, orta 3, yüksek 4 ve çok yüksek 5 sayısallaştırılmıştır.
- Yaka Türü: Şirket bünyesinde çalışanların pozisyonlara göre beyaz ya da mavi yaka olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Beyaz yaka personeller, uzman, mühendis, şef, formen, müdür vb. mavi yaka personeller ise işçiler şeklinde örneklendirilebilir. Beyaz yaka çalışanlar aylık ücretli, mavi yaka personeller ise saatlik ücretli şeklinde çalışmaktadır. Bu veride "Beyaz" olan veriler 1, "Mavi" olan veriler 0 olarak gösterilmiştir.
- Avans: Çalışanların şirketten nakit avans talep edip etmediğini ifade etmektedir. Sağlık sorunu vb. nedenler ile çalışanların talep etmiş olduğu avansın var olup olmadığı belirtilmiştir. Hiç avans talep etmeyen personeller 0 şeklinde gösterilmiştir. 0 ile 9 arasında avans talebi bulunmaktadır.
- İcra: Çalışanın icra dava dosyasının bulunup bulunmadığını göstermektedir. İcrası bulunmayan personeller "Yok", olanlar ise "Var" şeklinde ifade edilmiştir. İcra "Yok" ise 1, "Var" ise 0 olarak gösterilmiştir.
- İstifa Mı: Çalışanın işten ayrılışının istifa olup olmadığını belirtmektedir. İşine devam eden ve zorunlu nedenlerle (askerlik, emeklilik, evlilik vb.) işten ayrılan personeller "Hayır", belirsiz süreli iş sözleşmesinin işçi tarafından feshi ve deneme süresinde belirsiz süreli iş sözleşmesinin işçi tarafından feshi şeklinde çıkış kodu bulunan personeller ise "Evet" şeklinde gösterilmiştir. İstifa mı sütunu veri setinin çıktısı şeklinde belirtilmektedir, veri setinin etiketi niteliğini taşımaktadır. Bu veride istifa eden durumu "Evet" olan veriler 1, istifa etmeyenlerin durumu ise "Hayır" olan veriler 0 olarak gösterilmiştir.

Veriler firmanın SAP (System Analysis Program) sisteminden alınmış olup 2318 adet satırdan oluşmaktadır. Her satır için yukarıda bahsedilen 14 nitelik ve bir çıktı bulunmaktadır, dolayısıyla toplamda 34.770 adet veri bulunmaktadır.

4. Yöntemler ve Elde Edilen Sonuçlar

Problem için çözüm aracı olarak veri setinde "istifa" çıktısı tahminleneceğinden denetimli makine öğrenmesi algoritmalarından literatürde sıklıkla tercih edilen, küçük-orta ölçekteki ve ham veri setinde kullanımı kolay, hızlı ve yüksek doğruluk oranını hedefleyen beş tanesinin kullanımı önerilmiştir: Rastgele Orman, Naive Bayes, Karar Ağacı, Destek Vektör Makineleri ve *k*-en Yakın Komşu algoritmaları. Makine öğrenmesi algoritmalarının performans göstergelerini iki farklı platformda karşılaştırarak analiz etmek, farklı alanlarda avantajlar sunması ve algoritmaların tutarlılığının test edilmesi nedenleriyle hem Knime paket programında hem de Python programlama dilinde uygulanmıştır. Bu sayede başarı kriterlerine göre doğruluk oranları farklı algoritmalar ve programlar üzerinden karşılaştırma yapılarak değerlendirildiğinden literatürdeki diğer araştırmalara katkı sağlanması amaçlanmıştır. Knime, makine öğrenmesi, büyük veri işleme, veri bilimi ve analizi için kullanılabilen açık kaynak kodlu, sürükle – bırak yöntemi ile görselleştirilebilir ve konfigüre edilebilir nodlar ile kullanım kolaylığı sunabilmektedir. Kullanıcı dostu bir arayüz sunmasından dolayı ileri seviye bir kodlama bilgisi gerektirmemektedir. Çalışmada, verilerin %80'i eğitim, %20'si ise test için kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri setine ait alternatifin kriterlerde aldığı örnek değerler Tablo 1'de gösterilmiştir. Tabloda veri gizliliği nedeniyle veriler temsili olarak gösterilmiş ancak araştırmada gerçek veriler ele alınmıştır. Çalışmanın bu kısmında bahsedilen algoritmalar kısaca açıklanacaktır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri seti örneği

Kriterler\Sıra No	1	2	3	4	5
Pozisyon	İşçi	Formen	İşçi	Vardiya Amiri	Mühendis
Kıdem	4,0	5,70	3,7	14,46	4,12
Yaş	27,9	36,78	28,4	49,11	32,55
Doğum Yeri	Osmaniye	Adana	Osmaniye	Hatay	Kahramanmaraş
Medeni Durum	Evli	Evli	Bekar	Evli	Evli
Çocuk Sahibi	Evet	Hayır	Hayır	Evet	Evet
Engellilik	Yok	Yok	3. Derece Engelli	Yok	Yok
Emeklilik	Normal	Normal	Normal	Emekli	Normal
Tehlike Durumu	Tehlikeli	Tehlikeli	Çok Tehlikeli	Tehlikeli	Tehlikeli
Eğitim Düzeyi	İlköğretim	Meslek Lisesi	İlköğretim	Ön lisans	Lisans
Maaş Düzeyi	Çok Düşük	Orta	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Yaka Türü	Mavi Yaka	Beyaz Yaka	Mavi Yaka	Beyaz Yaka	Beyaz Yaka
Avans	0	0	0	1	0
İcra	Var	Yok	Yok	Yok	Yok
İşten Ayrıldı	İşten Ayrıldı	Etkin	İşten Ayrıldı	İşten Ayrıldı	İşten Ayrıldı
İstifa Mı	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Hayır

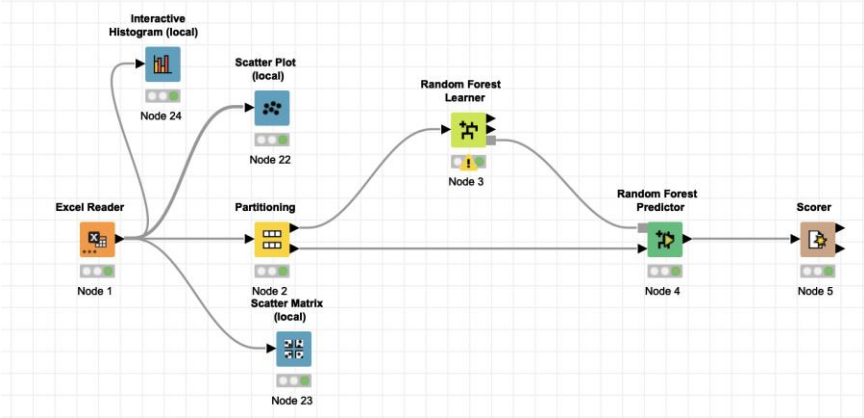
4.1. Rastgele Orman

Rastgele Orman Algoritması'nda veriler öğrenme seti için rastgele seçilir, dallanmalar ile farklı alt karar ağaçları elde edilir. Rastgele örneklenmiş veri alt kümesi ve özellikler kullanılarak her karar ağacı

eğitilir. Rastgele Orman, elde edilen karar ağaçlarını birleştirerek çalışır. Bu süreçte her ağaç bağımsız olarak eğitilir ve ağaçların tahminleri birleştirilir. Test sürecinde de elde edilen Rastgele Orman yapısına göre sınıflandırılır.

Literatürdeki araştırmalarda yüksek başarı tahmin oranı, yüksek sayıda veri ile çalışabilme, eksik veri bulunması halinde başarılı tahmin ile tamamlama gibi avantajlardan kaynaklı olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Tüm bu avantajların yanında, aşırı öğrenme durumu oluşabilme ihtimali de dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Bu konuda detaylı anlatım Biau and Scornet (2016) tarafından yapılmıştır.

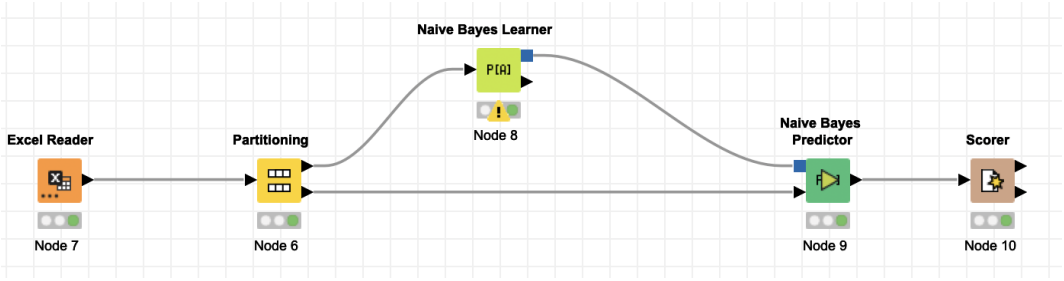
Algoritmanın Knime programındaki görsel kodu Şekil 1'de verilmiş olup algoritmaya verilerin bulunduğu Microsoft Excel dosyası Excel okuyucusu ile Knime programında içeri aktarılmasıyla başlanmaktadır. Excel okuyucusuna bağlantılar sayesinde yeni modüller eklenerek histogram grafiği, serpilme diyagramı, serpilme diyagram matrisi ya da pasta grafiği gibi görselleştirmeler yapılabilmektedir. İkinci aşamada sınıflandırıcı ile veri seti eğitim seti ve test seti olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sonrasında "Rastgele Orman Eğitici" modülü ile veri eğitilip, "Rastgele Orman Tahminleyici" ile test verileri tahmini yapılır. Son olarak da "Skor" modülü ile sınıflandırma ya da tahmin sonuçlarını değerlendirip, modelin doğruluğunu ölçülür.



Şekil 1. Rastgele Orman Algoritması'nın Knime üzerinden uygulama görseli

4.2. Naive Bayes

Naive Bayes algoritması, kategorik değişkenli veri modellerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Karmaşık problemlerde, sınıflandırma işlemleri gerçekleştirme olanağı sağlayabilmektedir. Naive Bayes algoritması Bayes teoremine dayanmaktadır ve her bir niteliğin birbirinden bağımsız olduğunu varsaymaktadır. Öncelikle eğitim verisi kullanılarak her sınıf için öncül olasılıklar ve her bir özelliğin sınıfa bağlı olasılıkları hesaplanır. Sonrasında, yeni veriler için, Bayes teoremi kullanılarak her sınıfın ardıl olasılıkları hesaplanır ve en yüksek olasılığa sahip sınıf seçilerek sınıflandırma yapılır. Naive Bayes algoritması ile ilgili detaylar ve uygulamalar için literatürde çalışmalar mevcuttur (Reddy ve ark., 2022). Bu algoritmanın görseli ise Şekil 2'de verilmiş olup, yapısı Rastgele Orman Algoritması ile aynıdır. Naive Bayes algorimasının modülleri olan "Naive Bayes Eğitici" ve "Naive Bayes Tahminleyici" Kullanılmıştır.

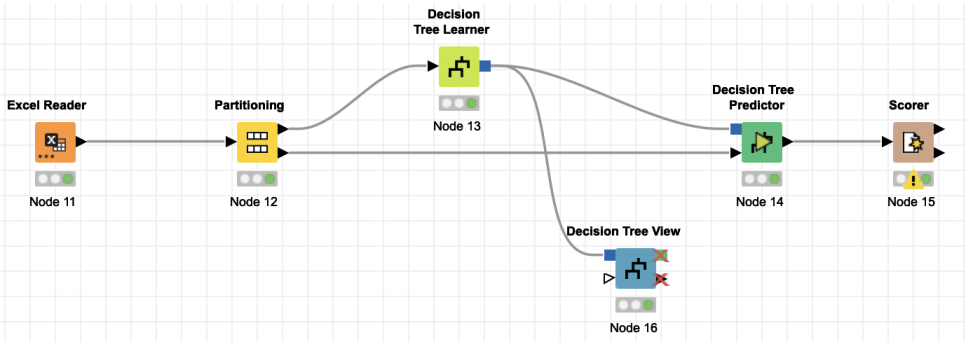


Şekil 2. Naive Bayes'in Knime üzerinden uygulama görseli

4.3. Karar Ağacı

Karar Ağacı, bir tür sınıflandırma algoritmasıdır ve sıralı, basit mantıksal testleri birleştiren bir model olarak çalışır. İlk adımda, hangi niteliğin ve hangi değerin veriyi en iyi şekilde ayırdığı tespit edilir. Her iç düğümde, algoritma en iyi bölünmeyi bulur ve veri bu bölünmeye göre alt gruplara ayrılır. Daha sonra, her alt grup için yeni düğümler oluşturulur ve bu işlem tekrarlanarak yaprak düğümlere ulaşılır. Yeni bir veri, bu bölünmeleri takip ederek bir yaprak düğüme ulaşır ve yaprak düğümdeki sınıfın değerini alır. Algoritmanın detaylarıyla ilgilenen okuyucular, Patel ve Prajapati'nin (2018) çalışmasına başvurabilir.

Karar ağacı algoritmanın Knime programı üzerinden gösterimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu algoritmada da Karar Ağacı'na ait olan eğitici ve tahmin edici modüller kullanılmıştır. Bunlara ek olarak karar ağacını görüntüleyebilmek için de "Karar Ağacı Görünümü" adlı modül kullanılmıştır.



Şekil 3. Karar Ağacı Algoritması'nın Knime uygulaması

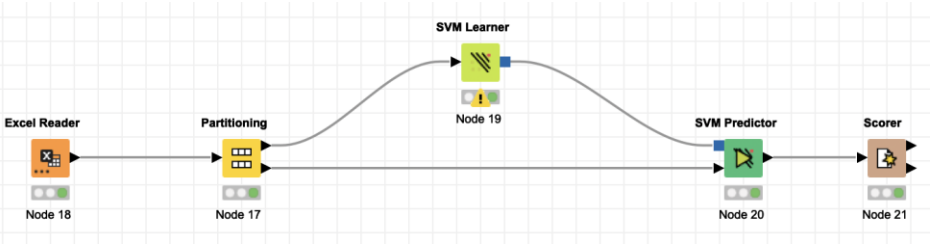
4.4. Destek Vektör Makineleri

Destek Vektör Makineleri, farklı sınıfları ayıran en uygun hiper-düzlemi bulmayı amaçlayan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Algoritmanın temel prensibi, sınıflar arasındaki farkı maksimize etmek için hiper-düzlemin konumunu ayarlamaktır. Hiper-düzlem, iki sınıfı ayırt edebilmek için veriler arasında bir sınır oluşturur. İki boyutlu bir düzlemde bu sınır bir çizgi olarak tanımlanırken, daha yüksek boyutlu veri uzaylarında bir düzlem olarak ifade edilir. Algoritma, sınıflar arasındaki mesafeyi (marjı) en geniş yapacak şekilde ayarlanarak, yeni verilerin sınıflandırılmasını sağlar.

Destek Vektör Makinelerinin özellikle doğrusal olmayan sınıflandırma problemlerinde yüksek doğruluk oranına ulaşmasının arkasındaki temel neden, kernel fonksiyonları kullanarak verilerin daha yüksek boyutlara taşınabilmesidir. Bu sayede, doğrusal olarak ayrılamayan veriler, daha karmaşık sınırlarla ayrılabilir hale gelir. Bu özellikleri sayesinde, çeşitli sınıflandırma problemlerinde tercih edilen bir

yöntem olmuştur. Algoritmanın detaylarına ilgi duyan okuyucular, bu konuda yapılan kapsamlı incelemelere başvurabilirler (Cervantes ve ark., 2020).

Destek Vektör Makineleri algoritmanın Knime üzerindeki uygulaması da benzer olup Şekil 4'te görselleştirilmiştir. Burada eğitici ve tahmin ediciler için sırasıyla "SVM Eğitici" ve SVM Tahminleyici" modülleri kullanılmıştır.



Şekil 4. Destek Vektör Makineleri Algoritması'nın Knime programı üzerinden görseli

4.5. k-En Yakın Komşu

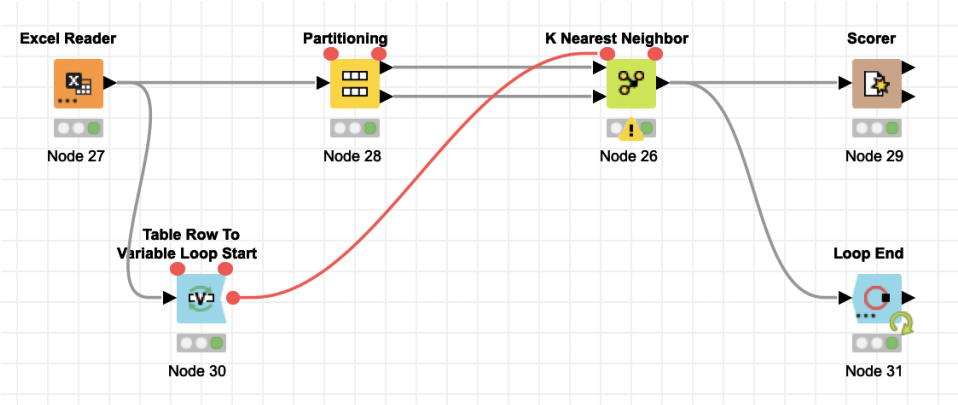
Bir makine öğrenmesi algoritması olan k-en Yakın Komşu Algoritmasında amaç, örnek uzayda bir noktaya mesafesi en az olan *k* tane noktanın belirlenmesidir. Veri ve *k* tane nokta arasında uzaklık incelenerek, yakınlıklara göre çoğunluk kararı dikkate alınarak sınıflandırma yapılır. Kullanılan algoritmanın aşamaları aşağıda listelenmiştir.

- *k* tane merkez noktası tespit edilir.
- *k* tane noktanın merkez noktasına olan uzaklıkları Öklid mesafesine göre hesaplanır ve kümeleme işlemi gerçekleştirilir.
- Elde edilen kümeler arasında karşılaştırmalar yapılır ve küme elemanları içerisinde yer değişiminin gerekliliği olup olmadığı kontrol edilir.
- Değişim gerekliliği devam ettiği sürece algoritma adımları sürdürülür, olmadığında ise durdurulur.
- Test edilmesi istenen yeni verinin noktası belirlenerek, öğrenme veri kümelerine en yakın olduğu küme tespit edilir.

Problemin amacına göre sınıflandırma ya da regresyon tahminlerinde uygulanabilir olduğundan kullanımı yaygındır. Oldukça basit bir mantığa dayanması, veri kümesiyle ilgili herhangi bir dağılım varsayımı içermemesi ve küçük boyutlu verilerde iyi çalışması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. k-En Yakın Komşu Algoritması ile ilgili detayları Halder ve ark.'nın (2024) ilgili inceleme çalışmasında bulabilirsiniz.

Bu algoritmanın Knime Programı üzerinden gösterimi ise Şekil 5'te gösterilmiştir. k- En yakın komşu algoritmasında tahmin edici ve test için "K En Yakın Komşu" modülü "Tablo satırından değişkenlere döngü başlangıcı" modülü ile bir döngü başlatılmış ve bu döngü satırların okunarak değişkene çevrilmesini sağlanmıştır ve döngü "Döngü sonu" modülü ile tamamlanmıştır. Bu algoritmada kullanılan komşu sayısının performansı etkilemesinden dolayı çeşitli komşu sayıları denenmiş olup en

iyi performansı sağlayan komşu sayısının 33 olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, karşılaştırma için de bu komşu sayısı kullanılmıştır.



Şekil 5. Knime üzerinden k-En Yakın Komşu Algoritması'nın gösterimi

5. Değerlendirme ve Bulgular

Kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarının uygunluğu birbirleri ile başarılı tahminleme performans ölçütlerine göre kıyaslanır. Her bir algoritma, doğru sınıflandırılan veri sayısı, yanlış sınıflandırılan veri sayısı, doğruluk oranı ve Cohen'in Kappa katsayısı olmak üzere dört farklı performans ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Başarı performans ölçütlerinden doğru sınıflandırılan veri sayısının yüksek olması, yanlış sınıflandırılan veri sayısının düşük olması, doğruluk oranının yüksek olması, Cohen'in Kappa katsayısının ise +1 ya da -1'e yakın olması beklenmektedir. Sınıflandırma işleminin doğruluğunun kararı Şekil 6'da özetlenen karışıklık matrisinde gösterilmiştir.

		Tahmin edilen sınıf: Pozitif	Tahmin edilen sınıf: Negatif	
Gerçek Sınıf	Pozitif	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Negatif (YN)	Duyarlılık
	Negatif	Yanlış Pozitif (YP)	Doğru Negatif (DN)	Özgülük
		Hassaslık	Negatif Tahmin Değeri	Doğruluk

Şekil 6. Karışıklık matrisi

Karşılaştırmalarda kullanılan doğru sayısı DP ve DN'lerin toplamı ile, yanlış sayısı YP ve YN'lerin toplamı ile bulunur. Doğruluk oranı ise toplam doğru sayısının toplam gözlem sayısına oranlanması ile bulunmaktadır. Buna ek olarak algoritmaların performansını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için doğruluk oranını destekleyen Cohen Kappa katsayısı da dahil edilmiştir. Cohen Kappa katsayısı, iki değerlendirici arasında gözlenen uyumu rastgele uyumdan ayırt ederek ölçen ve sınıflandırma problemlerinde sınıflandırıcı performansını değerlendirmek için kullanılan bir istatistiksel ölçüttür (Cohen, 1960). Eşitlik 1'de verilen Cohen Kappa katsayısı, $-\infty$ ile 1 arasında değer alır ve model performansının iyi olarak değerlendirilmesi için κ değerinin 1'e yakın olması beklenir. Bu, modelin

yaptığı tahminlerin rastgele yapılan tahminlere kıyasla üstün olduğunu gösterir. Performans karşılaştırmalarında, κ değerleri yüksekten düşüğe doğru sıralanarak değerlendirilir.

$$\kappa = \frac{p_0 - p_c}{1 - p_c} \quad (1)$$

Yukarıdaki formülde kullanılan p_0 değeri gerçek anlaşma oranını, p_c ise rastgele anlaşma beklenen oranı göstermektedir ve hesaplama şekilleri Denklem 2 ve 3'de verilmiştir.

$$p_0 = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (2)$$

$$p_c = \left(\frac{DP+YN}{DP+DN+YP+YN} \times \frac{DP+YP}{DP+DN+YP+YN}\right) + \left(\frac{DN+YN}{DP+DN+YP+YN} \times \frac{DN+YP}{DP+DN+YP+YN}\right) \quad (3)$$

Şekil 6'da gösterilen gösterilen karışıklık matrisine göre algoritmaların elde ettiği sonuçlardan bir tanesi Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo 2'ye göre *DP+DN* sayısı 362 ile en iyi sonuç Rastgele Orman Algoritması tarafından elde edilmiştir.

Tablo 2. Algoritmalar tarafından yapılan tahmin performansları

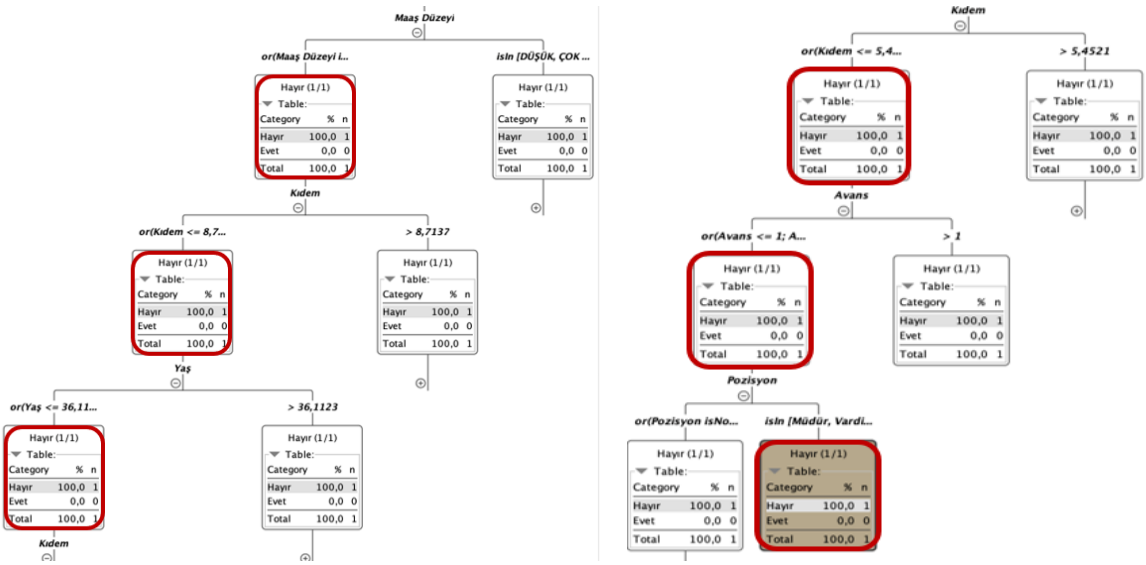
		İstifa Durumu İle İlgili Tahmin									
		Rastgele Orman		Naive Bayes		Karar Ağacı		Destek Vektör Makineleri		K-en Yakın Komşu	
		Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet
İstifa Durumu	Hayır	289	40	247	80	272	56	331	0	294	44
	Evet	60	75	63	74	62	74	133	0	83	43

Knime ve Python programlama dillerinde uygulanmış olan algoritmaların eğitim ve test setleri rastgele olarak belirlendiğinden karşılaştırmaların anlamlı olabilmesi için iki programda da beş kere deneme gerçekleştirilmiştir. Sonuç doğrultusunda alınacak olan karar ya da yapılan tahminlerin güvenilirliğini sağlamak adına her denemeye ait sonuçlar kaydedilmiş ve ilgili değerlerin ortalaması alınmıştır. Tablo 3'teki sonuçlara baktığımızda da her iki program tarafından en iyi çözümün Rastgele Orman Algoritması ile elde edildiğini gözlemliyoruz, bununla birlikte en kötü sonuç ise Naive Bayes algoritmasında gerçekleşmiştir.

Tablo 3. Kullanılan programlara göre algoritmaların performansı

	Knime Paket Programı				Python			
Algoritma	Doğru	Yanlış	*DO* (%)	κ	Doğru	Yanlış	*DO* (%)	κ
Rastgele Orman	364	100	%78,40	0,45	357	107	%76,88	0,40
Naive Bayes	320	144	%69,05	0,28	310	154	%66,82	0,13
Karar Ağacı	345	119	%74,47	0,37	333	131	%71,79	0,30
Destek Vektör Makineleri	331	133	%71,42	0,00	330	134	%71,14	0,00
K-En Yakın Komşu	337	127	%72,71	0,24	344	120	%74,07	0,30

En başarılı tahmini gerçekleştirdiğinden çalışanların istifa edip etmemesi ile ilgili öngörülerimizi Rastgele Orman Algoritmasının sonuçları ile yapılacak olup önerdiği model kullanılmıştır. Knime üzerinden Rastgele Orman algoritmasının bir karar ağacına ait örnek görüntüsü Şekil 7'de gösterilmiştir. Rastgele Orman algoritması, ayrıştırma işlemini yaparken her bir düğümde kullanılan özellikleri etkinlik için gösterge olabilecek Gini indeksi, bilgi kazancı gibi ölçütlere göre seçer ve birden fazla karar ağacından oluşur. Şekilde verilen karar ağacına göre, ilk ayrıştırma maaş düzeyi üzerinden yapılmış olup, bunu kıdem, yaş, avans ve pozisyon özellikleri takip etmektedir.



Şekil 7. Rastgele Orman Algoritması karar ağacı

Ayrıştırmalar sırasıyla maaş düzeyi, kıdem, yaş olduğundan bu kriterlere ait açıklama ve çalışanların istifasını önleyebilecek tutundurma önerileri Tablo 4'te açıklanmıştır. Öneriler şirket çalışanı olan bir insan kaynakları uzmanının yardımlarıyla yapılmıştır.

Tablo 4. Rastgele Orman Algoritmasından elde edilen ayrıştırma kriterleri için açıklama ve tutundurma önerileri

Ayrıştırma Kriteri	Sorunlar	Çözüm Önerileri
Maaş Düzeyi	Ücret artışı önerisinin sunulması, ücret skalasının kişiye özgü olamaması sebebiyle adaletsizlik yarattığından, istifa düşüncesi olmayanların ise ücret artışı amacı ile gerçekçi olmayan istifa başvurusu yapmasına neden olmaktadır.	Bayram harçlığı, prim, yakacak, kırtasiye yardımları, özel/tamamlayıcı sağlık sigortası, doğum, evlilik, vefat yardımı gibi yan haklar arttırılacaktır.
		Ödül yönetimi ve takdir tanıma sistemi oluşturulacaktır.
		Öneri sistemi ile kazanım sağlayan fikirler toplanarak yıl sonundaki değerlendirmelerde en iyi öneri veren çalışanlara ödül verilecektir.
Kıdem	Kıdemin artması işe hakimiyet ve bilgi birikimini beraberinde getirdiğinden yüksek kıdeme sahip çalışanların işten ayrılması yetenek ve zaman kaybı oluşturmaktadır.	İstifa etmek için başvuran çalışana, potansiyel kariyer yol haritası, eğitim ve gelişim planları konularında yönlendirme yapılması ile yetkinlik iyileştirmeleri sağlanacaktır.
		Şirketteki maaş, kıdem vb. niteliklerin sürekliliğinin sağlanmasının öneminden bahsedilerek istifanın önüne geçmeye çalışılacaktır.
Yaş	Yaş ile kıdemin orantılı olduğu göz önüne alındığında genç çalışanların yoğunlukta olması deneyim, kıdem, bağlılık ve motivasyonu olumsuz etkilemektedir.	Gönüllü faaliyetlerden olan, sportif aktiviteler, yürüyüşler, piknik organizasyonu, boya, çizim, seramik, tatlı atölyesi vb. etkinlikler planlanacaktır. Takım çalışmasını destekleyecek aktivitelerin planlanması, ekip içi iletişimi ve sosyalleşmeyi arttıracaktır.
		İş koşullarının mümkün olduğu pozisyonlarda esnek veya hibrit çalışma ile iş-yaşam arasındaki dengeyi sağlayarak kuruma bağlılığı arttırması beklenebilmektedir. Aynı zamanda genç çalışanlar teknolojiye hızlı adapte olabildiğinden üretim-yönetimde verimli çalışmayı ve tatmin olmayı sağlayacaktır.
		En başarılı toplam kalite yönetimi uygulaması yapan çalışanlar "Ayın Çalışanı" olarak seçilerek motivasyon sağlanır ve çalışanlar arası pozitif rekabet ortamı ile teşvik edilmiş olunacaktır.
Avans Talep Sayısı	Çalışanın sağlık sorunları için maaşlarından eşit taksitlerle kesilmek üzere almış olduğu taksitli avans talepleri çalışanların finansal dengesini bozarak ödeme güçlüğüne neden olmaktadır.	Sağlık sorunlarının iş kazası ya da meslek hastalığı ile ilgili olması durumunda ödemelerin işyeri tarafından karşılanması önerilebilir.
		Esnek geri ödeme seçenekleri ya da rapor vb. durumların beyanı ile taksit öteleme imkânı sunulabilir.
		Finansal planlama konusunda çalışanın bilgilendirilmesi ve borç sürecinden olumsuz etkilenmemesi adına finansal ve psikolojik açıdan çalışan destek programı oluşturulabilir.
Pozisyon	İletişim eksikliği, iş-yetkinlik uyumsuzluğu, deneyim eksikliği nedenlerinden pozisyona bağlı istifalara neden olmaktadır.	Adil görev dağılımı için iş dengeleme gerçekleştirilmelidir. Norm kadro açığı nedeniyle oluşan fazla iş yükü ise norm kadro analizi ile tespit edilecektir.
		Çok tehlikeli sınıfında yer alan görevlerde, ilgili pozisyon için çalışma ortamında iyileştirme ya da görev değişikliği imkânı sunulacaktır.
		Kariyer yönetimi doğrultusunda hedefleri ile ilgili eğitimler organize edilerek gelişim imkânı sunulacak bu sayede pozisyona aidiyet duygusu oluşturulabilecektir.

6. Sonuç

Demir çelik sektörü, ağır sanayi koşullarının getirdiği zorluklar ve yüksek risk faktörleri nedeniyle çalışanlar açısından zorlu bir ortam sunmakta ve bu durum sıklıkla işten ayrılmalara yol açmaktadır. Ayrıca, kuşak değişimleri de çalışanların işten ayrılma oranlarını artıran faktörlerden biridir. İşletmeler için en önemli kaynaklardan biri olan insan kaynağının verimli ve etkili bir şekilde yönetilmesi, çalışanların bağlılıklarının artırılması açısından önemlidir. Bu doğrultuda, insan kaynakları yönetiminin fonksiyonları çerçevesinde çalışanları elde tutmaya yönelik faaliyetlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, demir-çelik sektöründeki bir işletmeden alınan ham veriler kullanılarak çalışanların işten ayrılma durumları makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmin edilmiştir. Knime ve Python platformları üzerinden uygulanan bu algoritmalar arasında, %78,40 başarı oranı ile en yüksek doğruluk Rastgele Orman Algoritması ile elde edilmiştir. Elde edilmiş başarı oranı literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında gerçek veri seti kullanmasına rağmen kabul edilebilir bir seviyededir.

Çalışmada, işten ayrılma olasılığını etkileyen 14 farklı nitelik belirlenmiş ve bu nitelikler önem sırasına göre analiz edilmiştir. Knime programında gerçekleştirilen analiz sonucunda, Rastgele Orman Algoritması karar ağacındaki ilk üç kırılıma göre, işten ayrılmada en etkili faktörlerin maaş düzeyi, kıdem ve yaş olduğu görülmüştür. Rastgele Orman algoritması ile işten ayrılma riski taşıyan çalışanlar tespit edilerek bu çalışanların elde tutulmasına yönelik öneriler sunulmuştur.

Araştırma kapsamında, veriler işletmenin kullandığı SAP sistemi üzerinden sağlanmıştır. Ancak geçmiş verilerin eksik ve güncel olmaması nedeniyle bazı nitelikler sayısal olmasına rağmen sınıflandırılarak sözel hale getirilmiştir. Ek olarak, mesai süresi ve işe geç gelme sıklığı gibi büyük boyutlu veriler SAP sisteminden çekilememiştir. Çalışmada kullanılan programlar, ileri düzey bilgisayar becerisi veya yapay zeka bilgisi gerektirdiğinden, insan kaynakları yetkilileri için daha kullanıcı dostu bir yapıya dönüştürülememiştir.

Gelecekteki çalışmalarda farklı nitelikler, örneğin çalışanların geçmiş iş deneyimleri, izin, devamsızlık kayıtları, çalışan memnuniyet anketlerin sonuçları ile elde edilebilecek ast-üst ilişkileri, kuruma aidiyet, iş-yetkinlik düzeyi ilişkisi, iletişim gibi değişkenler dikkate alınabilir. Ayrıca, madencilik, inşaat, sağlık ve denizcilik gibi benzer koşullara sahip sektörlerde de benzer araştırmalar yapılabilir. Ek olarak, Lojistik Regresyon, Doğrusal Regresyon ve Doğrusal Diskriminant Analizi gibi farklı makine öğrenmesi algoritmalarının performansları değerlendirilebilir. Gelecek çalışmalarda, nesne yönelimli programlama dillerinde kullanıcı dostu arayüzler tasarlanarak insan kaynakları uzmanlarının tahminleri daha kolay yapabilmesi sağlanabilir. Bu sayede, İK profesyonelleri yapay zeka bilgisi gerekmeksizin ilgili nitelik değerlerini girerek çalışanların işten ayrılma olasılıklarını tahmin edebilir. Ayrıca, Knime üzerinden Karar Ağacı algoritması çıktıları dışa aktarılarak görselleştirilmiş sonuçlar ile işten ayrılma olasılıkları kolayca analiz edilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Ajit P. Prediction of employee turnover in organizations using machine learning algorithms. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence 2016; 5(9): 22-26.

Alamsyah A., Salma N. A comparative study of employee churn prediction model. In 2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST), Ağustos 2018, IEEE: 1-4.

Al-Darraji S., Honi DG., Fallucchi F., Abdulsada AI., Giuliano R., Abdulmalik HA. Employee attrition prediction using deep neural networks. Computers 2021; 10(11): 141.

Alkan A. Öğrencilerin sınavlardaki performansının makine öğrenmesi teknikleriyle tahminlenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(3): 1116-1128. https://doi.org/10.47495/okufbed.1420959

Arromrit T., Srisakaew K., Roswhan N., Mahikul W. A supervised machine learning method for predicting the employees turnover decisions. IEEE 8th International Conference On Software Engineering and Computer Systems (ICSECS), Ağustos 2023, IEEE:122-127.

Atef M., S Elzanfaly D., Ouf S. Early prediction of employee turnover using machine learning algorithms. International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems 2022; 13(2): 135-144.

Biau G., Scornet E. A random forest guided tour. Test 2016; 25: 197-227.

Bujold A., Roberge-Maltais I., Parent-Rocheleau X., Boasen J., Sénécal S., Léger PM. Responsible artificial intelligence in human resources management: a review of the empirical literature. AI and Ethics 2024; 4: 1185-1200.

Cervantes J., Garcia-Lamont F., Rodríguez-Mazahua L., Lopez A. A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. Neurocomputing 2020; 408: 189-215.

Çetin G. Endüstri 4.0 bağlamında yapay zekânın insan kaynakları yönetimine etkileri-Effects of artificial intelligence on human resources management in the context of industry 4.0 (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi). 2004.

Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and Psychological Measurement 1960; 20(1): 37-46.

Fallucchi F., Coladangelo M., Giuliano R., William DLE. Predicting employee attrition using machine learning techniques. Computers 2020; 9(4): 86.

Garg S., Sinha S., Kar AK., Mani M. A review of machine learning applications in human resource management. International Journal of Productivity and Performance Management 2022; 71(5): 1590-1610

Gélinas D., Sadreddin A., Vahidov R. Artificial intelligence in human resources management: A review and research agenda. Pacific Asia Journal of the Association for Information Systems 2022; 14(6): 1.

Guerranti F., Dimitri GM. A comparison of machine learning approaches for predicting employee attrition. Applied Sciences 2022; 13(1): 267.

Halder RK., Uddin MN., Uddin MA., Aryal S., Khraisat A. Enhancing K-nearest neighbor algorithm: a comprehensive review and performance analysis of modifications. Journal of Big Data 2024; 11(1): 113.

Jatobá M., Santos J., Gutierriz I., Moscon D., Fernandes PO., Teixeira JP. Evolution of artificial intelligence research in human resources. Procedia Computer Science 2019; 164: 137-142.

Karakütük, K. İnsan kaynakları. Ankara University Journal of Faculty of Educational Sciences (JFES) 1997; 30(1).

Khatri S., Pandey DK., Penkar D., Ramani J. Impact of artificial intelligence on human resources. In Data Management, Analytics and Innovation: Proceedings of ICDMAI 2019 2020 Springer Singapore; 2: 365-376.

Kişi N., Özer MA. İnsan kaynakları yönetiminde yapay zekâ teknolojisinin benimsenmesi üzerine güç alanı analizi. Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2023; 26(Özel Sayı): 35-52.

Korytkowski M., Nowak J., Scherer R., Zbieg A., Żak B., Relikowska G., Mader P. Employee turnover prediction from email communication analysis. In International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing Cham: Springer International Publishing, Haziran 2022: 252-263.

Marvin G., Jackson M., Alam MGR. A machine learning approach for employee retention prediction. In 2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP), Ağustos 2021; IEEE: 1-8.

Mhatre A., Mahalingam A., Narayanan M., Nair A., Jaju S. Predicting employee attrition along with identifying high risk employees using big data and machine learning. 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking, Aralık 2020; IEEE: 269-276.

Mohbey KK. Employee's attrition prediction using machine learning approaches. In Machine Learning and Deep Learning in Real-Time Applications 2020; IGI Global: 121-128.

Murphy KP. Machine learning: a probabilistic perspective. MIT press 2012; 2-25.

Nawaz N., Arunachalam H., Pathi BK., Gajenderan V. The adoption of artificial intelligence in human resources management practices. International Journal of Information Management Data Insights 2024; 4(1): 100208.

Palos-Sánchez PR., Baena-Luna P., Badicu A., Infante-Moro J. Artificial intelligence and human resources management: A bibliometric analysis. Applied Artificial Intelligence 2022; 36(1): 2145631.

Patel HH., Prajapati P. Study and analysis of decision tree based classification algorithms. International Journal of Computer Sciences and Engineering 2018; 6(10): 74-78.

Reddy EMK., Gurrala A., Hasitha VB., Kumar KVR. Introduction to Naive Bayes and a review on its subtypes with applications. Bayesian Reasoning and Gaussian Processes for Machine Learning Applications 2022; 1: 1-14.

Strohmeier S., Piazza F. Artificial intelligence techniques in human resource management—a conceptual exploration. Intelligent Techniques in Engineering Management: Theory and Applications 2015; 87: 149-172.

Tian X., Pavur R., Han H., Zhang L. A machine learning-based human resources recruitment system for business process management: using LSA, BERT and SVM. Business Process Management Journal 2023; 29(1): 202-222.

Uzak B. Telekomünikasyon sektöründe çalişan kaybi tahmini için makine öğrenmesi modeli seçimi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, 2022.

Widiyawati LM. Prediction of company employee resignation using naïve bayes algorithm. International Journal of Scientific Engineering and Science 2023 Jakarta, Indonesia.

Zhu H. Research on human resource recommendation algorithm based on machine learning. Scientific Programming 2021; 1: 8387277.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1544-1571, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1544-1571, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Genelleştirilmiş Küme Değerli Nötrosofik Beşli Sayılar Üzerine ANP Metodu

Abdullah KARGIN[1*]

[1]Gaziantep Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü Matematiğin Temelleri ve Matematik Lojik Anabilim Dalı, Gaziantep

[1]https://orcid.org/0000-0003-4314-5106
*Sorumlu yazar: kargin@gantep.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 10.10.2024
Kabul tarihi:17.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
ANP Metod
Yenilenebilir enerji kaynakları
Nötrosofik teori
Nötrosofik beşli sayılar
Karar verme uygulamaları

ÖZ

Bu çalışmada, nötrosofik beşli sayılar üzerinde çok kriterli karar verme uygulamalarında ilk defa Analytic Network Process (ANP) kullanılarak bir yöntem geliştirildi. Bu yöntem, nötrosofik küme teorisini entegre ettiği için klasik ANP'den farklıdır. Bu yöntemin uygulama adımları ve güncel hayatta karşılaşılan problemlere nasıl uygulanacağı hakkında bilgi verildi. Böylece nötrosofik küme teorisinin yeni yapılarından biri olan nötrosofik beşli kümeler ile çok kriterli karar verme uygulamalarından biri olan ANP yönteminin birlikte kullanıldığı yeni bir yöntem geliştirildi. Bu yeni yöntem, klasik ANP yönteminin tutarlılık hesaplaması ile 3. ve 6. adımlarını içermektedir. Ayrıca bu uygulamanın kullanıldığı güncel hayattan örnek bir uygulama yapıldı. Örnek uygulamada yenilenebilir enerji kaynaklarının seçiminde çevresel, sosyal ve ekonomik kriterlerin birbirleri üzerindeki etkisi kurgusal veriler kullanılarak analiz edildi. Bu uygulama sonucunda çevresel kriterin daha etkili olduğu, bunu sırasıyla sosyal kriterin ve ekonomik kriterin takip ettiği sonucuna varıldı. Ayrıca, kriterler arasındaki karşılıklı bağımlılıklar kriterlerin ağırlıklarını değiştirdi. Kriterlerin ağırlıklarının değişmesi, karar verme sürecindeki sıralamayı etkileyebileceği sonucuna varıldı. Ayrıca farklı operatörler ile elde edilen karşılaştırma matrislerinin tutarlılık oranlarının değişebileceği ve tutarsız bir matris ile tutarlı bir matris ile elde edilen önem sıralamalarının farklı olabileceği sonucuna da varıldı.

ANP Method on Generalized Set-Valued Neutrosophic Quintuple Numbers

Research Article

Article History:
Received: 10.10.2024
Accepted: 17.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
ANP method
Renewable energy sources
Neutrosophic theory
Neutrosophic quintuple numbers
Multi criteria decision-making applications

ABSTRACT

In this study, a method was proposed using the Analytic Network Process (ANP) for the first time in multi criteria decision-making applications on neutrosophic quintuple numbers. This method is different from classical ANP as it integrates neutrosophic set theory. Information about the application steps of this method and how to apply it to problems encountered in current life is given. Thus, a new method has been developed in which neutrosophic quintuple sets, one of the new structures of neutrosophic set theory, and the ANP method, one of the applications of multi-criteria decision-making, are used together. This new method includes consistency calculation, step 3 and step 6 of the classical ANP method. Also, an example application from current life is given. In the case study, the impact of environmental, social, and economic criteria on each other in selecting renewable energy sources was analyzed using fictitious data. As a result of this application, it was concluded that the environmental criterion was more effective, followed by the social criterion and the economic criterion, respectively. Moreover, the interdependencies between the criteria changed the weights of the criteria. It was concluded that changing the weights of the criteria may affect the ranking in the decision-making process. It is also concluded that

the consistency ratios of the comparison matrices obtained with different operators may vary and the importance rankings obtained with an inconsistent matrix and a consistent matrix may be different.

To Cite: Kargın A. ANP Method on Generalized Set-Valued Neutrosophic Quintuple Numbers. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1544-1571.

1. Introduction

The neutrosophic set (NS) theory was obtained by Florentin Smarandache (Smarandache, 1998). In this theory, the elements are expressed with T, I, and F which are numerical value of truth, indeterminacy, and falsity. Then, Wang et al. introduced single-valued NS (Wang et al., 2010). In this set, the numerical values of T, I and F of each element are determined in [0, 1]. It provides a highly objective approach to mathematically express uncertain situations. Thanks to this advantage of NS, many researchers have conducted studies. Şahin studied neutron-algebras based on NS (Şahin, 2022). Also, Şahin and Kargın defined neutrosophic crisp sets on bipolar NS (Şahin and Kargın, 2022a). Garg introduced single-valued NS and applications (Garg, 2024). Vaz-Patto el at. Introduced the DEMATEL method for NS (Vaz-Patto et al., 2024). Voskoglou and Smarandache defined q-rung NS (Voskoglou et al., 2024).

Florentin Smarandache defined neutrosophic quadruple sets (NQS) (Smarandache; 2015). NQS, like NS, have truth, indeterminacy, and falsity values but NQS, unlike NS, have known and unknown parts. Therefore, NQS is a general case of NS. The inclusion of known and unknown parts in these sets, which provide the properties of NS, allows NS to be more useful. Thus, researchers studied NS theory (Karaaslan, 2015; Karaaslan, 2017; Jana et al., 2020). Also, in 2020, Şahin et al. defined generalized set-valued neutrosophic set (GSVNQS) (Şahin et al., 2020). Kargın et al. studied similarity measure based on NQS (Kargın et al., 2021). Şahin et al. obtained Euclidean measures based on NQS (Şahin et al., 2021). Tahan et al. defined hyperstructures-groups based on NQS (Al-Tahan et al., 2023).

Chatterjee et al. defined quadri-partitioned neutrosophic sets (QPNS) (Chatterjee et al., 2016). In QPNS, contradiction and uncertainty values are used instead of indeterminacy values in NS. Thus, by dividing the indeterminacy value into contradiction and uncertainty values, it has been an approach to facilitate the mathematical expression of uncertain situations. Thanks to this advantage of QPNS, they have been used in many studies. Panimalar et al. defined mathematical morphological operations for QPNS (Panimalar et al., 2023). Mary defined soft QPNS (Mary, 2021). Hussain et al., defined quadri-partitioned neutrosophic soft graphs (Hussain et al., 2022). Debnath et al. defined fuzzy QPNS soft matrix and applications (Debnath et al., 2022).

Şahin et al. studied the neutrosophic quintuple set (NQS) theory (Şahin et al., 2022). Neutrosophic quintuple sets are a specific form of NQS and QPNS. Şahin and Kargın defined interval neutrosophic quintuple sets and interval SVNQS, bipolar SVNQS (Şahin and Kargın, 2022b; 2022c). Şahin et al. defined generalized set-valued neutrosophic quintuple sets (GSVNQS) (Şahin et al., 2023). These sets are a generalized form of SVNQS.

The Analytic Network Process (ANP) method was developed by Saaty in 1986 for MCDM (Saaty, 1986). In this method, there is a network structure instead of a top-down unidirectional hierarchy. In the

network structure, there may be interactions between criteria and alternatives within a set as well as interactions between sets. With its special network structure, the ANP method shows the interdependencies and feedback between the criteria and thus produces highly objective results. Lyu et al. studied a sensitivity analysis using ANP-GIS (Lyu et al., 2024). Mousavi et al. presented a framework using a combined DEMATEL-ANP model (Mousavi et al., 2024). Borujeni et al. studied the factors affecting using ANP with AHP (Borujeni et al., 2024). Li et al. introduced underground infrastructure on D-ANP (Li et al, 2024).

Fuzzy set theory is a widely used construct, especially in decision-making applications. Thus, researchers studied fuzzy set theory (Özer, 2022; Mahmood, 2025). Also, Mihaylov et al. developed the fuzzy ANP method (Mikhailov and Singh et al., 2003). Thus, new solutions were obtained with the ANP method for situations expressed with fuzzy sets. Büyüközkan et al. studied DEMATEL, ANP, and VIKOR methods and applications based on fuzzy set (Büyüközkan et al., 2024). Alkabaa et al used fuzzy ANP about CNC lathe components (Alkabaa et al., 2024). Nalbant et al. evaluated climate factors using ANP based on fuzzy logic (Nalbant et al., 2024). Pouyakian et al. used fuzzy ANP for construction projects (Pouyakian et al., 2024). Liao et al. obtained the intuitionistic fuzzy ANP method using intuitionistic fuzzy sets and the ANP method together (Liao et al., 2018). Thanks to this method, a new solution to MCDM problems involving uncertainty has been introduced. Şahin and Soylu conducted a study on intuitionistic fuzzy ANP models for maritime supply chains (Şahin and Soylu, 2020). Yang et al. obtained the ANP method based on fuzzy logic (Yang et al., 2020). Bakhshizadeh et al. used the ANP method to extract and prioritize the attractiveness parameters of shopping centers based on intuitionistic fuzzy numbers (Bakhshizadeh et al., 2024). Zhang et al. introduced the ANP method based on triangular intuitionistic fuzzy sets (Zhang et al., 2024).

Zaied et al. developed the neutrosophic ANP method (Zaied et al., 2019). By using the ANP method on NS theory, more objective results can be obtained in MCDM applications. Abdel-Basset et al. presented an ANP method for bipolar NS and its applications (Abdel-Basset et al., 2020). Slamaa et al. studied neutrosophic ANP and applications (Slamaa et al., 2021). Kar and Rai used the neutrosophic ANP method in Industry 4.0 (Kar and Rai, 2024). Kungumaraj used the neutrosophic ANP method for real life project time and cost estimation (Kungumaraj, 2024).

The limited reserves and environmental impacts of fossil fuels have made the need for clean and sustainable energy solutions more important than ever. At this point, renewable energy sources (RES) have great potential for environmental sustainability and energy security. They play a critical role in combating climate change by reducing carbon dioxide emissions while contributing to local economies by increasing energy independence and lowering energy costs in the long run. Researchers have conducted studies on the impacts and utilization of RES. Rather et al. studied RES for Asia-Pacific economies (Rather et al., 2024). Gayen et al. presented a study for RES based sustainable development (Gayen et al.; 2024). Wilberforce et al. studied status of RES in urban areas (Wilberforce et al.; 2024).

Sayed et al. studied the RES and energy storage systems (Sayed et al., 2023). Qing et al. presented a study for microgrids with the RES based on uncertainty set (Qing et al., 2024).

Today, the energy sector is undergoing a rapid transformation driven by advanced technologies such as artificial intelligence. These technologies have great potential to increase the efficiency of RES and optimize energy production processes. Artificial intelligence algorithms and data analytics methods are widely used to ensure the efficient use of RES such as solar, wind, hydroelectricity, and biomass. Artificial intelligence adapts energy production processes to increase efficiency, reduce costs, and minimize environmental impacts. Moreover, the integration of energy storage systems with artificial intelligence enables the uninterrupted and reliable transfer of RES to the grid. These developments make significant contributions to achieving sustainability and efficiency goals in the energy sector while encouraging wider adoption of RES. The applications of artificial intelligence in the renewable energy sector provide significant advantages in terms of both economic efficiency and environmental sustainability. Researchers have conducted studies on the use of artificial intelligence in RES. Talaat et al. obtained artificial intelligence applications for hybrid RES (Talaat et al., 2023). Shoaei et al. studied an overview of artificial intelligence applications in RES (Shoaei et al., 2024). Hanafi et al. studied development of sustainable energy management (Hanafi et al., 2024). Onwusinkwue et al. introduced artificial intelligence in RES: a review of predictive maintenance and energy optimization (Onwusinkwue et al., 2024). Karaaslan and Aydın conducted a study on the RES for Türkiye (Karaaslan and Aydın; 2020).

In the Preliminary Information Section, the basic definitions and properties used in this study are given. In the Research and Results Section, score and accuracy functions for GSVNQN are defined. In addition, the ANP method on GSVNQN using these functions is defined and the steps of this method are given. This new method also includes the consistency calculation and global weight calculation in the classical ANP method. In the application section, an example application from current life is given. In this example, the impact of environmental, social, and economic criteria on each other in the selecting RES were analyzed. As a result of this application, it was concluded that the social criterion was more effective than the others, while the environmental and economic criteria followed the social criterion respectively. It was also observed that the weights of the interdependencies between the criteria significantly affect the results, which may lead to a certain ranking change in the MCDM process. In the comparison section, it was shown that the consistency ratios of the comparison matrices obtained by using different operators are different, and that the results obtained as a result of a consistent matrix, an inconsistent matrix may be different and the importance of using a consistent matrix was emphasized. In the Conclusion Section, recommendations for future studies are given to researchers, and study's results are introduced.

2. Preliminaries

Definition 2.1. (Wang et al., 2010) Let $\acute{S} \neq \emptyset$ be a set. For $\forall \acute{s} \in \acute{S}$, with the functions

$$T_{\acute{S}_{\breve{D}}}: \acute{S} \to [0,1]\ ,\ I_{\acute{S}_{\breve{D}}}: \acute{S} \to [0,1] \text{ and } F_{\acute{S}_{\breve{D}}}: \acute{S} \to [0,1]$$

a single valued NS on $\acute{S}$ is given by

$$\breve{D} = \left\{\langle \acute{s}, T_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}), I_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}), F_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s})\rangle : \acute{s} \in \acute{S}\right\}.$$

Here, $T_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}), I_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s})$, and $F_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s})$; for $\acute{s} \in \acute{S}$, truth, indeterminacy, and falsity functions, respectively are such that

$$0 \leq T_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}) + I_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}) + F_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}) \leq 3.$$

Definition 2.2. (Chatterjee et al., 2016) Let $\acute{S} \neq \emptyset$ be a set. For $\forall \acute{s} \in \acute{S}$, with the functions

$$T_{\acute{S}_{\breve{D}}}: \acute{S} \to [0,1]\ ,\ U_{\acute{S}_{\breve{D}}}: \acute{S} \to [0,1]\ ,C_{\acute{S}_{\breve{D}}}: \acute{S} \to [0,1] \text{ and } F_{\acute{S}_{\breve{D}}}: \acute{S} \to [0,1]$$

a QPNS on $\acute{S}$ is given by

$$\boldsymbol{\breve{D}} = \left\{\langle \boldsymbol{\acute{s}}, \boldsymbol{T_{\acute{S}_{\breve{D}}}}(\boldsymbol{\acute{s}}), \boldsymbol{U_{\acute{S}_{\breve{D}}}}(\boldsymbol{\acute{s}}), \boldsymbol{C_{\acute{S}_{\breve{D}}}}(\boldsymbol{\acute{s}}), \boldsymbol{F_{\acute{S}_{\breve{D}}}}(\boldsymbol{\acute{s}})\rangle : \boldsymbol{\acute{s}} \in \boldsymbol{\acute{S}}\right\}.$$

Here, for $\boldsymbol{\acute{s}} \in \boldsymbol{\acute{S}}$

$$\boldsymbol{T_{\acute{S}_{\breve{D}}}}(\boldsymbol{\acute{s}}), \boldsymbol{U_{\acute{S}_{\breve{D}}}}(\boldsymbol{\acute{s}}), \boldsymbol{C_{\acute{S}_{\breve{D}}}}(\boldsymbol{\acute{s}}) \textbf{ and } \boldsymbol{F_{\acute{S}_{\breve{D}}}}(\boldsymbol{\acute{s}})$$

truth, uncertainty, contradiction, and falsity functions, respectively are such that

$$0 \leq T_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}) + U_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}) + C_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}), + F_{\acute{S}_{\breve{D}}}(\acute{s}) \leq 4.$$

Definition 2.3. (Şahin et al., 2022) Let $\acute{\mathcal{Y}} \neq \emptyset$ be a set and P($\acute{\mathcal{Y}}$) be a power set. A SVNQN is given by

$$\breve{D}^N = \langle \acute{y}_{1\breve{D}}, \acute{y}_{2\breve{D}} T_{\acute{y}_{2\breve{D}}}, \acute{y}_{3\breve{D}} U_{\acute{y}_{3\breve{D}}}, \acute{y}_{4\breve{D}} C_{\acute{y}_{4\breve{D}}}, \acute{y}_{5\breve{D}} F_{\acute{y}_{5\breve{D}}} \rangle.$$

Here,

$$T_{\acute{y}_{2\breve{D}}},\ U_{\acute{y}_{3\breve{D}}},\ C_{\acute{y}_{4\breve{D}}} \text{ and } F_{\acute{y}_{5\breve{D}}}$$

are components in QPNS and

$$\acute{y}_{1\breve{D}},\ \acute{y}_{2\breve{D}},\ \acute{y}_{3\breve{D}},\ \acute{y}_{4\breve{D}}, \acute{y}_{5\breve{D}} \in \mathrm{P}(\acute{\mathcal{Y}}).$$

Also, SVNQS is defined by

$$\breve{D} = \{\langle \acute{y}_{1\breve{D}}, \acute{y}_{2\breve{D}} T_{\acute{y}_{2\breve{D}}}, \acute{y}_{3\breve{D}} U_{\acute{y}_{3\breve{D}}}, \acute{y}_{4\breve{D}} C_{\acute{y}_{4\breve{D}}}, \acute{y}_{5\breve{D}} F_{\acute{y}_{5\breve{D}}} \rangle ; \acute{y}_{1\breve{D}},\ \acute{y}_{2\breve{D}},\ \acute{y}_{3\breve{D}},\ \acute{y}_{4\breve{D}}, \acute{y}_{5\breve{D}} \in \mathrm{P}(\acute{\mathcal{Y}})\}.$$

Here,

$$\langle \acute{y}_{1\breve{D}}, \acute{y}_{2\breve{D}} T_{\acute{y}_{2\breve{D}}}, \acute{y}_{3\breve{D}} U_{\acute{y}_{3\breve{D}}}, \acute{y}_{4\breve{D}} C_{\acute{y}_{4\breve{D}}}, \acute{y}_{5\breve{D}} F_{\acute{y}_{5\breve{D}}} \rangle$$

represents a number, idea, object, community, etc. Furthermore,

$$\text{“}\acute{y}_{1\breve{D}}\text{”}$$

is called known part and

$$\text{‘‘}\acute{y}_{2\breve{D}} T_{\acute{y}_{2\breve{D}}}, \acute{y}_{3\breve{D}} U_{\acute{y}_{3\breve{D}}}, \acute{y}_{4\breve{D}} C_{\acute{y}_{4\breve{D}}}, \acute{y}_{5\breve{D}} F_{\acute{y}_{5\breve{D}}}\text{’’}$$

is called unknown part.

Definition 2.4. (Şahin et al., 2023) Let $\acute{\mathcal{Y}} \neq \emptyset$ be a set and P($\acute{\mathcal{Y}}$) be a power set. A GSVNQS is defined by

$$\breve{D} = \{< \acute{y}_{1\breve{D}_1}, \acute{y}_{2\breve{D}_1} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_1}}, \acute{y}_{3\breve{D}_1} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_1}}, \acute{y}_{4\breve{D}_1} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_1}}, \acute{y}_{5\breve{D}_1} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_1}}; \acute{y}_{1\breve{D}_2}, \acute{y}_{2\breve{D}_2} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_2}}, \acute{y}_{3\breve{D}_2} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_2}}, \acute{y}_{4\breve{D}_2} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_2}}, \acute{y}_{5\breve{D}_2} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_2}};$$
$$\ldots \acute{y}_{1\breve{D}_l}, \acute{y}_{2\breve{D}_l} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_l}}, \acute{y}_{3\breve{D}_l} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_l}}, \acute{y}_{4\breve{D}_l} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_l}}, \acute{y}_{5\breve{D}_l} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_l}} >; \acute{y}_{1\breve{D}_n}, \acute{y}_{2\breve{D}_n}, \acute{y}_{3\breve{D}_n}, \acute{y}_{4\breve{D}_n}, \acute{y}_{5\breve{D}_n} \in \mathrm{P}(\acute{\mathcal{Y}}), n \in \{1,2,3,\ldots,l\}\}.$$

Here,

$$T_{\acute{y}_{2\breve{D}_n}}, U_{\acute{y}_{3\breve{D}_n}}, C_{\acute{y}_{4\breve{D}_n}} \text{ and } F_{\acute{y}_{5\breve{D}_n}}$$

are components in QPNS. Also, a GSVNQN is defined by

$$\left(\breve{D}_1^N\right)=\{< \acute{y}_{1\breve{D}_1}, \acute{y}_{2\breve{D}_1} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_1}}, \acute{y}_{3\breve{D}_1} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_1}}, \acute{y}_{4\breve{D}_1} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_1}}, \acute{y}_{5\breve{D}_1} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_1}} >\}.$$

Here,

$$\text{``}\acute{y}_{1\breve{D}_1}\text{''}$$

is called known part and

$$\text{``}\acute{y}_{2\breve{D}_1} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_1}}, \acute{y}_{3\breve{D}_1} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_1}}, \acute{y}_{4\breve{D}_1} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_1}}, \acute{y}_{5\breve{D}_1} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_1}}\text{''}$$

is called unknown part. Furthermore, a GSVNQS is represented by GSVNQN such that

$$\breve{D} = \left\{\left(\breve{D}_n^N\right): n \in \{1,2,3,\dots,l\}\right\}.$$

Definition 2.5. (Şahin et al., 2023) Let

$$\breve{D} = \{< \acute{y}_{1\breve{D}_1}, \acute{y}_{2\breve{D}_1} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_1}}, \acute{y}_{3\breve{D}_1} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_1}}, \acute{y}_{4\breve{D}_1} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_1}}, \acute{y}_{5\breve{D}_1} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_1}}; \acute{y}_{1\breve{D}_2}, \acute{y}_{2\breve{D}_2} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_2}}, \acute{y}_{3\breve{D}_2} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_2}}, \acute{y}_{4\breve{D}_2} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_2}}, \acute{y}_{5\breve{D}_2} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_2}};$$
$$\dots \acute{y}_{1\breve{D}_l}, \acute{y}_{2\breve{D}_l} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_l}}, \acute{y}_{3\breve{D}_l} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_l}}, \acute{y}_{4\breve{D}_l} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_l}}, \acute{y}_{5\breve{D}_l} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_l}} >; \acute{y}_{1\breve{D}_n}, \acute{y}_{2\breve{D}_n}, \acute{y}_{3\breve{D}_n}, \acute{y}_{4\breve{D}_n}, \acute{y}_{5\breve{D}_n} \in \mathrm{P}(\acute{y}), n \in \{1,2,3,\dots,l\}\}$$

and

$$\breve{E} = \{< \acute{y}_{1\breve{E}_1}, \acute{y}_{2\breve{E}_1} T_{\acute{y}_{2\breve{E}_1}}, \acute{y}_{3\breve{E}_1} U_{\acute{y}_{3\breve{E}_1}}, \acute{y}_{4\breve{E}_1} C_{\acute{y}_{4\breve{E}_1}}, \acute{y}_{5\breve{E}_1} F_{\acute{y}_{5\breve{E}_1}}; \acute{y}_{1\breve{E}_2}, \acute{y}_{2\breve{E}_2} T_{\acute{y}_{2\breve{E}_2}}, \acute{y}_{3\breve{E}_2} U_{\acute{y}_{3\breve{E}_2}}, \acute{y}_{4\breve{E}_2} C_{\acute{y}_{4\breve{E}_2}}, \acute{y}_{5\breve{E}_2} F_{\acute{y}_{5\breve{E}_2}};$$
$$\dots \acute{y}_{1\breve{E}_l}, \acute{y}_{2\breve{E}_l} T_{\acute{y}_{2\breve{E}_l}}, \acute{y}_{3\breve{E}_l} U_{\acute{y}_{3\breve{E}_l}}, \acute{y}_{4\breve{E}_l} C_{\acute{y}_{4\breve{E}_l}}, \acute{y}_{5\breve{E}_l} F_{\acute{y}_{5\breve{E}_l}} >; \acute{y}_{1\breve{E}_n}, \acute{y}_{2\breve{E}_n}, \acute{y}_{3\breve{E}_n}, \acute{y}_{4\breve{E}_n}, \acute{y}_{5\breve{E}_n} \in \mathrm{P}(\acute{y}); n \in \{1,2,3,\dots,l\}\}$$

be two GSVNQN. For $\breve{D}$ and $\breve{E}$, "average $\cap$'' operator is defined by $\widetilde{\cap}_O$ and

$$\begin{aligned}\breve{D} \,\widetilde{\cap}_O\, \breve{E} = \{< & \acute{y}_{1\breve{D}_1\breve{E}_1}, \acute{y}_{2\breve{D}_1\breve{E}_1} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_1\breve{E}_1}}, \acute{y}_{3\breve{D}_1\breve{E}_1} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_1\breve{E}_1}}, \acute{y}_{4\breve{D}_1\breve{E}_1} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_1\breve{E}_1}}, \acute{y}_{5\breve{D}_1\breve{E}_1} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_1\breve{E}_1}};\\ & \acute{y}_{1\breve{D}_2\breve{E}_2}, \acute{y}_{2\breve{D}_2\breve{E}_2} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_2\breve{E}_2}}, \acute{y}_{3\breve{D}_2\breve{E}_2} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_2\breve{E}_2}}, \acute{y}_{4\breve{D}_2\breve{E}_2} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_2\breve{E}_2}}, \acute{y}_{5\breve{D}_2\breve{E}_2} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_2\breve{E}_2}}\\ & \dots \acute{y}_{1\breve{D}_l\breve{E}_l}, \acute{y}_{2\breve{D}_l\breve{E}_l} T_{\acute{y}_{2\breve{D}_l\breve{E}_l}}, \acute{y}_{3\breve{D}_l\breve{E}_l} U_{\acute{y}_{3\breve{D}_l\breve{E}_l}}, \acute{y}_{4\breve{D}_l\breve{E}_l} C_{\acute{y}_{4\breve{D}_l\breve{E}_l}}, \acute{y}_{5\breve{D}_l\breve{E}_l} F_{\acute{y}_{5\breve{D}_l\breve{E}_l}} >;\\ & \acute{y}_{1\breve{D}_n\breve{E}_n}, \acute{y}_{2\breve{D}_n\breve{E}_n}, \acute{y}_{3\breve{D}_n\breve{E}_n}, \acute{y}_{4\breve{D}_n\breve{E}_n}, \acute{y}_{5\breve{D}_n\breve{E}_n} \in \mathrm{P}(\acute{y}); n \in \{1,2,3,\dots,l\}\}.\end{aligned}$$

Here,

$$\acute{y}_{1\breve{D}_n\breve{E}_n} = \left(\acute{y}_{1\breve{D}_n} \cap \acute{y}_{1\breve{E}_n}\right), \acute{y}_{2\breve{D}_n\breve{E}_n} = \left(\acute{y}_{2\breve{D}_n} \cap \acute{y}_{2\breve{E}_n}\right), \acute{y}_{3\breve{D}_n\breve{E}_n} = \left(\acute{y}_{3\breve{D}_n} \cap \acute{y}_{3\breve{E}_n}\right)$$
$$\acute{y}_{4\breve{D}_n\breve{E}_n} = \left(\acute{y}_{4\breve{D}_n} \cap \acute{y}_{4\breve{E}_n}\right), \acute{y}_{5\breve{D}_n\breve{E}_n} = \left(\acute{y}_{5\breve{D}_n} \cap \acute{y}_{5\breve{E}_n}\right)$$

and

$$T_{\acute{y}_{2\breve{D}_n\breve{E}_n}} = \frac{T_{\acute{y}_{2\breve{D}_n}} + T_{\acute{y}_{2\breve{E}_n}}}{2}, U_{\acute{y}_{2\breve{D}_n\breve{E}_n}} = \frac{U_{\acute{y}_{2\breve{D}_n}} + U_{\acute{y}_{2\breve{E}_n}}}{2}, C_{\acute{y}_{2\breve{D}_n\breve{E}_n}} = \frac{C_{\acute{y}_{2\breve{D}_n}} + C_{\acute{y}_{2\breve{E}_n}}}{2}, F_{\acute{y}_{2\breve{D}_n\breve{E}_n}} = \frac{F_{\acute{y}_{2\breve{D}_n}} + F_{\acute{y}_{2\breve{E}_n}}}{2}.$$

Definition 2.6. (Saaty, 1986) The ANP method consists of 7 steps.

Step 1: The MCDM problem is described.

The criteria related to our case study are determined. Let

$$K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$$

be a set of criteria.

Step 2. Pairwise comparisons are made between the criteria. To calculate the criteria's weights and alternatives, comparison matrices should be created using the Saaty 1-9 scale in Table 1.

Table 1. Saaty 1-9 Scale

Level of Importance	Definition	Description
1	Equally Important	Both criteria are equally important.
3	Somewhat Important	Experiences and judgments make one criterion slightly more important than the other.
5	Very Important	Experience and judgment strongly favor one criterion over the other.
7	Very Highly Important	The criterion is very strongly superior to the other.
9	Extremely Important	Information and experience indicate that one criterion is very strongly superior to the other.
2, 4, 6, 8	Intermediate Importance	Intermediate figures can be used when necessary.

In addition, each criterion's local weight is obtained using the function

$$YA(K_a) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{m} (\check{d}^N{}_{ij})}; a, i, j \in \{1,2, \dots, m\}.$$

The net value matrix and each criterion's local weight are in Table 2.

Table 2. The Criteria's Net Value Matrix and Local Weight Values

	K_1	K_2	...	K_m
K_1	1	$(\check{d}_{12})$	...	$(\check{d}_{1m})$
K_2	$\frac{1}{(\check{d}_{12})}$	1	...	$(\check{d}_{2m})$
...	...	...	...	...
K_m	$\frac{1}{(\check{d}_{1m})}$	$\frac{1}{(\check{d}_{2m})}$	...	1
Local Weight Values	$YA(K_1)$	$YA(K_2)$	...	$YA(K_m)$

Using the criteria's local weight

$$W_{YA} = \begin{bmatrix} YA(K_1) \\ YA(K_2) \\ \vdots \\ YA(K_m) \end{bmatrix}$$

local weight matrix is obtained.

Step 3: The consistency ratio (CR) of the comparison matrices is obtained according to the consistency index (CI) and the random consistency index (RI) such that

$$CR = \frac{CI}{RI}.$$

Here, $CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$, RI is in Table 3, it must CR ≤ 0.1 for each comparison matrix, λ_{max} is the largest eigenvalue of the comparison matrix and n is the criteria's number.

Table 3. RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Step 4: Eigenvectors are obtained to create a super matrix. The eigenvectors are the comparison matrix of the internal dependencies of each criterion and the weights of the criteria are obtained. Eigen vectors are obtained using these weights. For criteria K_1 and K_m, the values are in Table 4 and Table 5, respectively.

Table 4. Comparison Net Value Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_1 and Criteria Weights

	K_2	...	K_m
K_2	1	...	$\left(\check{d}^N{}_{2m}\right)$
...	...	...	...
K_m	$\frac{1}{\left(\check{d}^N{}_{2m}\right)}$	...	1
Weights	$(A(K_2))_{K_1}$	...	$A(K_m)_{K_1}$

Table 5. Comparison Net Value Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_m and Criteria Weights

	K_1	...	$K_{(m-1)}$
K_1	1	...	$\left(\check{d}^N{}_{1(m-1)}\right)$
...	...	...	...
$K_{(m-1)}$	$\frac{1}{\left(\check{d}^N{}_{1(m-1)}\right)}$	...	1
Weights	$(A(K_1))_{K_m}$	...	$A(K_{(m-1)})_{K_m}$

Where the criteria's weights are obtained using the function

$$(A(K_\alpha))_{K_\beta} = \frac{1}{1+\sum_{j=1}^{m}\left(\check{d}_{ij}^N\right)}.$$

Eigenvectors are created using the weights obtained in Stage 4.2. The eigenvectors are created using the weights in the comparison net value matrices of the criteria's internal dependencies. For the criterion K_1, the eigenvector

$$V_{K_1} = \begin{bmatrix} 1 \\ A(K_2)_{K_1} \\ \vdots \\ A(K_m)_{K_1} \end{bmatrix}$$

is found in the form. Similarly, other eigenvectors are also found.

Step 5: Super matrix is created.

The eigenvectors obtained in Step 4.3 are placed in the column where the relevant criterion is located and a super matrix is obtained and this matrix is in Table 6.

Table 6. Super Matrix

	K_1	K_2	...	K_m
K_1	1	$(A(K_1))_{K_2}$	...	$(A(K_1))_{K_m}$
K_2	$A(K_2)_{K_1}$	1	...	$(A(K_2))_{K_m}$
...	...	...	...	...
K_m	$A(K_m)_{K_1}$	$(A(K_m))_{K_2}$	...	1

Super matrix is normalized using the function

$$N\left((A(K_i))_{K_j}\right) = \frac{(A(K_i))_{K_j}}{\sum_{i=1}^{m}(A(K_i))_{K_j}};\ i,j = 1,2,\dots,m.$$

The normalized super matrix is in Table 7.

Table 7. The Normalized Super Matrix

	K_1	K_2	...	K_m
K_1	$N\left((A(K_1))_{K_1}\right)$	$N\left((A(K_1))_{K_2}\right)$	...	$N\left((A(K_1))_{K_m}\right)$
K_2	$N\left((A(K_2))_{K_1}\right)$	$N\left((A(K_2))_{K_2}\right)$	...	$N\left((A(K_2))_{K_m}\right)$
...	...	...	...	...
K_m	$N\left((A(K_m))_{K_1}\right)$	$N\left((A(K_m))_{K_2}\right)$	...	$N\left((A(K_m))_{K_m}\right)$

Step 6: The weight values are obtained by multiplying the super matrix and the local weight matrix.

$$\begin{bmatrix} N\left((A(K_1))_{K_1}\right) & N\left((A(K_1))_{K_2}\right) & \dots & N\left((A(K_1))_{K_m}\right) \\ N\left((A(K_2))_{K_1}\right) & N\left((A(K_2))_{K_2}\right) & \dots & N\left((A(K_2))_{K_m}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N\left((A(K_m))_{K_1}\right) & N\left((A(K_m))_{K_2}\right) & \dots & N\left((A(K_m))_{K_m}\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} YA(K_1) \\ YA(K_2) \\ \vdots \\ YA(K_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} GA(K_1) \\ GA(K_2) \\ \vdots \\ GA(K_m) \end{bmatrix}$$

Step 7: Finally, the best criterion is selected based on the weight values from Step 6.

3. Main Results

3.1. Score and Accuracy Functions

In this part, we define score and accuracy functions for GSVNQN. Furthermore, ANP method on GSVNQN using these functions is defined and the steps of this new method are detailed.

Definition 3.1. Let

$$\breve{D}^N = \langle \acute{y}_{1\breve{D}}, \acute{y}_{2\breve{D}} T_{\acute{y}_{2\breve{D}}}, \acute{y}_{3\breve{D}} U_{\acute{y}_{3\breve{D}}}, \acute{y}_{4\breve{D}} C_{\acute{y}_{4\breve{D}}}, \acute{y}_{5\breve{D}} F_{\acute{y}_{5\breve{D}}} \rangle$$

be a GSVNQN. The score and the accuracy functions for $\breve{D}^N$ are defined by respectively

$$S(\breve{D}^N) = \frac{|\, s(\acute{y}_{1\breve{D}} \cap \acute{y}_{2\breve{D}}) - s(\acute{y}_{1\breve{D}} \cap \acute{y}_{3\breve{D}}) - s(\acute{y}_{1\breve{D}} \cap \acute{y}_{4\breve{D}}) - s(\acute{y}_{1\breve{D}} \cap \acute{y}_{5\breve{D}})|}{s(\acute{y}_{1\breve{D}})} + \frac{\left| T_{\acute{y}_{2\breve{D}}} - U_{\acute{y}_{3\breve{D}}} - C_{\acute{y}_{4\breve{D}}} - F_{\acute{y}_{5\breve{D}}} \right|}{3}$$

and

$$K(\breve{D}^N) = \frac{|s(\acute{y}_{2\breve{D}} / \acute{y}_{3\breve{D}}) + s(\acute{y}_{2\breve{D}} / \acute{y}_{4\breve{D}}) + s(\acute{y}_{2\breve{D}} / \acute{y}_{5\breve{D}})|}{2.s(\acute{y}_{2\breve{D}})} + T_{\acute{y}_{2\breve{D}}}.$$

Here, the function

$$s\colon \mathrm{P}(\acute{y}) \to \mathbb{N}$$

gives number of elements of set in $\mathrm{P}(\acute{y})$.

3.2. Algorithm

In this part, the steps of the ANP method on GSVNQN are given.

Step 1. The MCDM problem is identified. A goal for the MCDM problem and the criteria and alternatives to be used to achieve this goal is determined.

Stage 1.1. Experts experienced in the field are selected. Let

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_l\}$$

be the set of experts.

Stage 1.2. The criteria related to our case study are determined. Let

$$K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$$

be the set of criteria.

Stage 1.3. The alternatives to be used in our case study are identified. Let

$$A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_t\}$$

be the set of alternatives.

This step is identical to step 1 of the classical ANP method (Saaty, 1986) given in Definition 2.6.

Step 2. Pairwise comparison matrices are created between the relevant criteria. In these matrices, the criteria in the columns are the influencing criteria and the criteria in the rows are the influenced criteria.

Stage 2.1. Each expert makes pairwise comparisons between the criteria and expresses each comparison with GSVNQN. These numbers are defined by values for accuracy, uncertainty, contradiction, and inaccuracy, allowing for a more comprehensive evaluation of expert opinions in MCDM processes. For example, when asked about the importance of criterion A relative to criterion B, the expert can express this comparison with values for accuracy, uncertainty, contradiction, and falsity, and alternatives for

these values. Thus, instead of expressing each expert opinion with a single value using the 1-9 scale in Table 1 in Step 2 of the Classical ANP method (Saaty, 1986) in Definition 2.6, it can be expressed in more detail with these five components, making decisions more objective and reliable.

Elements of the comparison matrix created for each expert is defined by

$$\left(\breve{D}^{N}_{n_{ij}}\right) = \{<\acute{y}_{1_{\breve{D}_{n_{ij}}}}, \acute{y}_{2_{\breve{D}_{n_{ij}}}} T_{\acute{y}_{2_{\breve{D}_{n_{ij}}}}}, \acute{y}_{3_{\breve{D}_{n_{ij}}}} U_{\acute{y}_{3_{\breve{D}_{n_{ij}}}}}, \acute{y}_{4_{\breve{D}_{n_{ij}}}} C_{\acute{y}_{4_{\breve{D}_{n_{ij}}}}}, \acute{y}_{5_{\breve{D}_{n_{ij}}}} F_{\acute{y}_{5_{\breve{D}_{n_{ij}}}}}\}.$$

Here, $n \in \{1,2,3,\dots,l\}$; i and $j \in \{1,2,3,\dots,m\}$, l is the number of experts, i and j are the row and column of the element in the comparison matrix. For example,

$$\left(\breve{D}^{N}_{1_{12}}\right)$$

shows the effect of criterion K_1 on criterion K_2 according to expert U_1 and is located in row 1 and column 2. Furthermore, the pairwise comparison matrices for expert $U_1$and expert U_n are given in Table 8 and Table 9.

Table 8. Comparison Matrix for U_1

	$\boldsymbol{K_1}$	$\boldsymbol{K_2}$	...	$\boldsymbol{K_m}$
$\boldsymbol{K_1}$	1	$\left(\breve{D}^{N}_{1_{12}}\right)$	...	$\left(\breve{D}^{N}_{1_{1m}}\right)$
$\boldsymbol{K_2}$	$\left(\breve{D}^{N}_{1_{21}}\right)$	1	...	$\left(\breve{D}^{N}_{1_{2m}}\right)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$\boldsymbol{K_m}$	$\left(\breve{D}^{N}_{1_{m1}}\right)$	$\left(\breve{D}^{N}_{1_{m2}}\right)$	...	1

Table 9. Comparison Matrix for U_n

	$\boldsymbol{K_1}$	$\boldsymbol{K_2}$	...	$\boldsymbol{K_m}$
$\boldsymbol{K_1}$	1	$\left(\breve{D}^{N}_{1_{n_{12}}}\right)$	...	$\left(\breve{D}^{N}_{n_{1m}}\right)$
$\boldsymbol{K_2}$	$\left(\breve{D}^{N}_{n_{21}}\right)$	1	...	$\left(\breve{D}^{N}_{n_{2m}}\right)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$\boldsymbol{K_m}$	$\left(\breve{D}^{N}_{n_{m1}}\right)$	$\left(\breve{D}^{N}_{n_{m2}}\right)$	...	1

Stage 2.2. The pairwise comparison matrices are obtained by different experts converted into a single pairwise comparison matrix between the criteria using one of the operators in Şahin et al.'s study (Şahin et al., 2023) and the pairwise comparison matrix of these criteria are in Table 10. This process aims to combine the opinions of the experts. Here,

$$\breve{D}^{N}{}_{ii} = 1.$$

Table 10. Pairwise Comparison Matrix of Criteria

	K_1	K_2	...	K_m
K_1	1	$(\breve{D}^N{}_{12})$	...	$(\breve{D}^N{}_{1m})$
K_2	$(\breve{D}^N{}_{21})$	1	...	$(\breve{D}^N{}_{2m})$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
K_m	$(\breve{D}^N{}_{m1})$	$(\breve{D}^N{}_{m2})$	...	1

By using the average intersection operator in Definition 2.5, the pairwise comparison matrix of the criteria element ($i, j \in \{1,2,3, \dots, m\}$)

$$(\breve{D}^N{}_{ij})$$

is obtained by

$$(\breve{D}^N{}_{ij}) = \left((\breve{D}^N_{1_{ij}} \,\widetilde{\cap}_O\, \breve{D}^N_{2_{ij}}) \,\widetilde{\cap}_O \dots \breve{D}^N_{l-1_{ij}}) \,\widetilde{\cap}_O\, \breve{D}^N_{l_{ij}}\right).$$

Stage 2.3. The net value matrix of the criteria are created.

The net value matrix is obtained by using the score and the accuracy functions given in Definition 3.1 for each GSVNQN in the pairwise comparison matrix of the criteria.

In addition, the local weight of each criterion is obtained using the function ($a, i, j \in \{1,2,3, \dots, m\}$ and i ≠j)

$$YA(K_a) = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m} S\left((\breve{D}^N{}_{ij})\right)}.$$

The local weight of the criterion is obtained by dividing the value in the diagonal by the sum of the columns. Here,

$$S\left((\breve{D}^N{}_{ij})\right)$$

denotes the score value of the GSVNQN $(\breve{D}^N{}_{ij})$ using score function in Definition 3.1.

The net value matrix and local weight values of the criteria are given in Table 11.

Table 11. The Net Value Matrix and Local Weight Values of the Criteria

	K_1	K_2	...	K_m
K_1	1	$S\left((\breve{D}^N{}_{12})\right)$	...	$S\left((\breve{D}^N{}_{1m})\right)$
K_2	$S\left((\breve{D}^N{}_{21})\right)$	1	...	$S\left((\breve{D}^N{}_{2m})\right)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
K_m	$S\left((\breve{D}^N{}_{m1})\right)$	$S\left((\breve{D}^N{}_{m2})\right)$	...	1
Local Weight Values	$YA(K_1)$	$YA(K_2)$	...	$YA(K_m)$

Stage 2.4. Using the local weights of the criteria in Table 11,

$$W_{YA} = \begin{bmatrix} YA(K_1) \\ YA(K_2) \\ \vdots \\ YA(K_m) \end{bmatrix}$$

local weight matrix is obtained.

Step 3. This step is the same as step 3 of the classical ANP method (Saaty, 1986) given in Definition 2.6.

Step 4. Eigenvectors are obtained to create a super matrix.

This step is basically the same as in the classical ANP method (Saaty, 1986). However, unlike the classical ANP method, GSVNQN is used in this step of the algorithm.

Stage 4.1. Comparison matrices of the internal dependencies of each criterion are created. These matrices are obtained by deleting the row and column containing the relevant criterion. The comparison matrix of internal dependencies for criterion K_i is obtained by deleting the ith row and ith column in which criterion K_i is located. The comparison matrices of internal dependencies according to criteria K_1 and K_m are given in Table 12 and Table 13.

Table 12. The comparison matrices of internal dependencies according to criteria K_1

	$\boldsymbol{K_2}$	$\boldsymbol{K_3}$	...	$\boldsymbol{K_m}$
$\boldsymbol{K_2}$	1	$(\breve{D}^N{}_{23})$	...	$(\breve{D}^N{}_{2m})$
$\boldsymbol{K_3}$	$(\breve{D}^N{}_{32})$	1	...	$(\breve{D}^N{}_{3m})$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$\boldsymbol{K_m}$	$(\breve{D}^N{}_{m2})$	$(\breve{D}^N{}_{m3})$	...	1

Table 13. The comparison matrices of internal dependencies according to criteria K_m

	$\boldsymbol{K_1}$	$\boldsymbol{K_2}$	...	$\boldsymbol{K_{(m-1)}}$
$\boldsymbol{K_1}$	1	$(\breve{D}^N{}_{12})$	...	$(\breve{D}^N{}_{1(m-1)})$
$\boldsymbol{K_2}$	$(\breve{D}^N{}_{21})$	1	...	$(\breve{D}^N{}_{2(m-1)})$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$\boldsymbol{K_{(m-1)}}$	$(\breve{D}^N{}_{(m-1)1})$	$(\breve{D}^N{}_{(m-1)2})$	...	1

Stage 4.2. Using the obtained internal dependencies comparison matrix, net value matrices are created according to the process in Stage 2.3 and the weights of the criteria are obtained. The internal dependencies comparison net value matrix is created for m criteria. In Table 14 and Table 15, the net

value matrix of comparison of internal dependencies and criteria weights for criteria K_1 and K_m are given. Here, the weights of the criteria are obtained using the function

$$(A(K_\alpha))_{K_\beta} = \frac{1}{1+\sum_{j=1}^{m} s\left(\left(\breve{D}_{ij}^{N}\right)\right)}.$$

Here,

$$(A(K_\alpha))_{K_\beta}$$

is the weight of the K_α criterion with respect to the internal dependence of the K_β criterion. In Table 14 and Table 15, the K_1 and K_m criteria weights are given.

Table 14. Comparison Net Value Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_1 and Criteria Weights

	$\boldsymbol{K_2}$	$\boldsymbol{K_3}$	...	$\boldsymbol{K_m}$
$\boldsymbol{K_2}$	1	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{23}\right)\right)$	...	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{2m}\right)\right)$
$\boldsymbol{K_3}$	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{32}\right)\right)$	1	...	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{3m}\right)\right)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$\boldsymbol{K_m}$	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{m2}\right)\right)$	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{m3}\right)\right)$	...	1
Weights	$(A(K_2))_{K_1}$	$(A(K_3))_{K_1}$	...	$A(K_m)_{K_1}$

Table 15. Comparison Net Value Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_m and Criteria Weights

	$\boldsymbol{K_1}$	$\boldsymbol{K_2}$	...	$\boldsymbol{K_{m-1}}$
$\boldsymbol{K_1}$	1	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{22}\right)\right)$	...	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{1(m-1)}\right)\right)$
$\boldsymbol{K_2}$	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{21}\right)\right)$	1	...	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{2(m-1)}\right)\right)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$\boldsymbol{K_{m-1}}$	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{(m-1)1}\right)\right)$	$S\left(\left(\breve{D}^{N}{}_{(m-1)2}\right)\right)$	...	1
Weights	$(A(K_1))_{K_m}$	$(A(K_2))_{K_m}$	...	$A(K_{m-1})_{K_m}$

Stage 4.3. Eigenvectors are created using the weights obtained in Stage 4.2. The eigenvectors are created using the weights in the comparison net value matrices of the internal dependencies of the criteria. For example, the eigenvector of criterion K_1

$$V_{K_1} = \begin{bmatrix} 1 \\ A(K_2)_{K_1} \\ \vdots \\ A(K_m)_{K_1} \end{bmatrix}$$

is found in the form. Similarly, other eigenvectors are also found.

Step 5. The super matrix of the criteria are created using the eigenvectors obtained in Step 4.3.

Step 5.1. The eigenvectors obtained in Step 4.3 are placed in the column. Here, the relevant criterion is located and a super matrix is obtained and this matrix is in Table 16.

Table 16. Super Matrix

	K_1	K_2	...	K_m
K_1	1	$(A(K_1))_{K_2}$	...	$(A(K_1))_{K_m}$
K_2	$A(K_2)_{K_1}$	1	...	$(A(K_2))_{K_m}$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
K_m	$A(K_m)_{K_1}$	$(A(K_m))_{K_2}$	...	1

Step 5.2. The super matrix is normalized as in step 5 of the classical ANP method [22] given in Definition 2.6.

Super matrix is normalized using the function

$$N\left((A(K_i))_{K_j}\right) = \frac{(A(K_i))_{K_j}}{\sum_{i=1}^{m}(A(K_i))_{K_j}}.$$

Here,

$$N\left((A(K_i))_{K_j}\right)$$

represents the normalized value of each element in the matrix and $i, j \in \{1,2,3,\dots,m\}$. The normalized super matrix is in Table 17.

Table 17. The Normalized Super Matrix

	$\boldsymbol{K_1}$	$\boldsymbol{K_2}$	...	$\boldsymbol{K_m}$
$\boldsymbol{K_1}$	$N\left((A(K_1))_{K_1}\right)$	$N\left((A(K_1))_{K_2}\right)$	...	$N\left((A(K_1))_{K_m}\right)$
$\boldsymbol{K_2}$	$N\left((A(K_2))_{K_1}\right)$	$N\left((A(K_2))_{K_2}\right)$	...	$N\left((A(K_2))_{K_m}\right)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$\boldsymbol{K_m}$	$N\left((A(K_m))_{K_1}\right)$	$N\left((A(K_m))_{K_2}\right)$	...	$N\left((A(K_m))_{K_m}\right)$

Step 6. To calculate the global weight of the criteria as in Step 6 of the classical ANP method (Saaty, 1986) given in Definition 2.6, the normalized super matrix obtained in Step 5.2 is multiplied by the local weight matrix obtained in Step 2.4. 3.3.

$$\begin{bmatrix} N\left((A(K_1))_{K_1}\right) & N\left((A(K_1))_{K_2}\right) & \dots & N\left((A(K_1))_{K_m}\right) \\ N\left((A(K_2))_{K_1}\right) & N\left((A(K_2))_{K_2}\right) & \dots & N\left((A(K_2))_{K_m}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N\left((A(K_m))_{K_1}\right) & N\left((A(K_m))_{K_2}\right) & \dots & N\left((A(K_m))_{K_m}\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} YA(K_1) \\ YA(K_2) \\ \vdots \\ YA(K_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} GA(K_1) \\ GA(K_2) \\ \vdots \\ GA(K_m) \end{bmatrix}$$

Step 7. As in Step 7 of the classical ANP method (Saaty, 1986) given in Definition 2.6, the global weights obtained in Step 6 are used to rank the impact of the criteria. The global weights obtained by multiplying the normalized super matrix with the local weight matrix are ranked. The criterion with the largest global weight is determined as the criterion with the most influence on the other criteria, and the criterion with the smallest global weight is determined as the criterion with the least influence on the other criteria.

3.3. Application

In this part, the ANP method defined on the GSVNQN in Definition 3.2 was used to evaluate the impact of environmental, social, and economic criteria on each other in the selecting RES. In this application, fictitious data was used to demonstrate the usability of the algorithm. Researchers can use this application to generate solutions to their problems with real data. The criteria in the application were taken from Karaaslan and Aydın's study (Karaaslan and Aydın; 2020). In addition, 3 experts, 7 the selecting RES alternatives and 3 criteria were used in this application.

Step 1. The aim is to assess the impact of environmental, social and economic criteria on each other in the selecting RES.

Stage 1.1. 3 experts experienced in the field are selected.

Let

$$U = \{U_1, U_2, U_3\}$$

be the set of experts.

Stage 1.2. Criteria related to the problem are identified.

Let

$$K = \{K_1, K_2, K_3\}$$

be set consisting of criteria such that

K_1 = Environmental,

K_2 = Social,

K_3 = Economic

Stage 1.3. The alternatives to be used in the problem are identified. Let

A={*S, Wi, H, J, B, CG,W*}

be set of alternatives such that

S = Solar Energy

Wi = Wind

H = Hydropower

J = Geothermal

B = Biomass

CG = Come and go

W = Wave

Step 2. A pairwise comparison matrix is created between the criteria with the experts.

Stage 2.1. The experts made pairwise comparisons between the criteria and each comparison was expressed as a GSVNQN. Here,

for expert U_1,

$$(D_1^N)_{12} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(0,6), \{B, H\}(0,7), \{J, CG\}(0,6), \{CG, W, J\}(0,6) >\}$$

$$(D_1^N)_{13} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1,0), \{CG, H, J\}(0,9), \{B\}(0,7), \{CG, W\}(1,0) >\}$$

$$(D_1^N)_{21} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B, S\}(0,8), \{S, Wi, H\}(0,1), \{CG, W, J, Wi, S\}(1,0), \{CG, W, B\}(0,5) >\}$$

$$(D_1^N)_{22} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1,0), \emptyset(0,25), \emptyset(0,25), \emptyset(0,5) >\}$$

$$(D_1^N)_{23} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B, S\}(0,2), \{S, B\}(0,7), \{W, J, H\}(0,6), \{CG, S\}(0,8) >\}$$

$$(D_1^N)_{31} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B, S\}(0,9), \{B, G, W, CG\}(0,7), \{H, Wi, J, CG, W, B\}(0,3), \{W\}(0,3) >\}$$

$$(D_1^N)_{32} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{Wi, H, J\}(0,5), \{S, B\}(0,8), \{J, B\}(0,6), \{CG, W, B, J\}(0,75) >\}$$

$$(D_1^N)_{33} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1,0), \emptyset(0,25), \emptyset(0,25), \emptyset(0,5) >\}$$

for expert U_2,

$$(D_2^N)_{12} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(0,4), \{B, S\}(0,9), \{CG, Wi\}(0,8), \{W\}(0,4) >\}$$

$$(D_2^N)_{13} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1,0), \{CG\}(1,0), \{J\}(0,8), \{W, J, H\}(0,6) >\}$$

$$(D_2^N)_{21} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B, S\}(0,6), \{S, Wi, H, J\}(0,1), \{CG, W, J, Wi, S, B\}(0,8), \{CG, W, S\}(0,1) >\}$$

$$(D_2^N)_{22} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1), \emptyset(0,25), \emptyset(0,25), \emptyset(0,5) >\}$$

$$(D_2^N)_{23} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J\}(0,1), \{S, B, W\}(0,6), \{W, J, CG\}(0,7), \{CG, W\}(0,7) >\}$$

$$(D_2^N)_{31} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B\}(0,8), \{B, S, CG, W, H\}(0,8), \{H, Wi, J, CG, W, S\}(0,7), \{W, S\}(0,1) >\}$$

$$(D_2^N)_{32} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, S\}(0,7), \{S, B, W\}(0,9), \{J, B, W\}(0.5), \{CG, W\}(1,0) >\}$$

$$(D_2^N)_{33} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1,0), \emptyset(0,25), \emptyset(0,25), \emptyset(0,5) >\}$$

and for expert U_3,

$$(D_3^N)_{12} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(0,5), \{B, J\}(0,8), \{CG\}(0,7), \{W, H\}(0,5) >\}$$

$$(D_3^N)_{13} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1,0), \{CG, W, B\}(0,9), \{B\}(0,9), \{W\}(0,8) >\}$$

$$(D_3^N)_{21} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B, S, W\}(0,8), \{S, Wi, H, B\}(0,1), \{CG, W, J, Wi, S\}(1,0), \{CG, W\}(0,4) >\}$$

$$(D_3^N)_{22} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1,0), \emptyset(0,25), \emptyset(0,25), \emptyset(0,5) >\}$$

$$(D_3^N)_{23} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, W\}(0,3), \{S, B, J\}(0,8), \{W, J, H\}(0,55), \{CG\}(0,85) >\}$$

$$(D_3^N)_{31} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B, S\}(0,95), \{B, S, CG, W, J\}(0,85), \{H, Wi, J, CG, W\}(0,5), \{W\}(0,2) >\}$$

$$(D_3^N)_{32} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B\}(0,9), \{S, B, CG\}(0,95), \{J, B, S\}(0,85), \{CG, W\}(0,85) >\}$$

$$(D_3^N)_{33} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}(1,0), \emptyset(0,25), \emptyset(0,25), \emptyset(0,5) >\}$$

the comparison matrices elements of experts U_1, U_2 and U_3 are given in Table 18, Table 19 and Table 20; respectively.

Table 18. The Comparison Matrices of experts U_1

	K_1	K_2	K_3
K_1	1	$(D_1^N)_{12}$	$(D_1^N)_{13}$
K_2	$(D_1^N)_{21}$	1	$(D_1^N)_{23}$
K_3	$(D_1^N)_{31}$	$(D_1^N)_{32}$	1

Table 19. The Comparison Matrices of experts U_2

	K_1	K_2	K_3
K_1	1	$(D_2^N)_{12}$	$(D_2^N)_{13}$
K_2	$(D_2^N)_{21}$	1	$(D_2^N)_{23}$
K_3	$(D_2^N)_{31}$	$(D_2^N)_{32}$	1

Table 20. The Comparison Matrices of experts U_3

	K_1	K_2	K_3
K_1	1	$(D_3^N)_{12}$	$(D_3^N)_{13}$
K_2	$(D_3^N)_{21}$	1	$(D_3^N)_{23}$
K_3	$(D_3^N)_{31}$	$(D_3^N)_{32}$	1

Stage 2.2. A single pairwise comparison matrix is obtained by using the comparison matrices of the experts. While obtaining the comparison matrix of the criteria, the average intersection operator given in Definition 2.5 was used and the order of the experts was taken as U_1 , U_2 and U_3. The comparison matrix of the criteria obtained using the average intersection operator $\widetilde{\cap}_O$ in Definition 2.5 is in Table 21. With the help of the GSVNQN of experts U_1 , U_2 and U_3 in Table 18, Table 19 and Table 20, which show the effect of criterion K_1 on criterion K_2, the GSVNQN

$$(D^N)_{12} = ((D_1^N)_{12} \,\widetilde{\cap}_O\, (D_2^N)_{12}) \,\widetilde{\cap}_O\, (D_3^N)_{12}$$

given in Table 21, is obtained such that

$$\{S,Wi,H,J,B,CG,W\} = \big((\{S,Wi,H,J,B,CG,W\} \cap \{S,Wi,H,J,B,CG,W\}) \cap \{S,Wi,H,J,B,CG,W\}\big)$$

$$\{S,Wi,H,J,B,CG,W\} = \big((\{S,Wi,H,J,B,CG,W\} \cap \{S,Wi,H,J,B,CG,W\}) \cap \{S,Wi,H,J,B,CG,W\}\big)$$

$$\{B\} = \big((\{B,J\} \cap \{B,S\}) \cap \{B,H\}\big)$$

$$\{CG\} = \big((\{CG\} \cap \{CG,R\}) \cap \{J,CG\}\big)$$

$$\{W\} = \big((\{W,H\} \cap \{W\}) \cap \{CG,W,J\}\big)$$

and

$$0{,}5 = \frac{\frac{0{,}6+0{,}4}{2}+0{,}5}{2};\ 0{,}8 = \frac{\frac{0{,}7+0{,}9}{2}+0{,}8}{2};\ 0{,}7 = \frac{\frac{0{,}6+0{,}4}{2}+0{,}7}{2} \text{ and } 0{,}5 = \frac{\frac{0{,}6+0{,}4}{2}+0{,}5}{2}.$$

Thus, we obtained that

$$(D^N)_{12} = \{< \{S,Wi,H,J,B,CG,W\}, \{S,Wi,H,J,B,CG,W\}(0{,}5), \{B\}(0{,}8), \{CG\}(0{,}7), \{W\}(0{,}5) >\}$$

Similarly, the other elements of Table 21 are obtained such that

$$(D^N)_{13} = \{< \{S,Wi,H,J,B,CG,W\}, \{S,Wi,H,J,B,CG,W\}(1{,}0), \{CG\}(0{,}92), \emptyset(0{,}82), \{W\}(0{,}8) >\}$$

$$(D^N)_{21} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B, S\}(0{,}75), \{S, Wi, H\}(0{,}1), \{CG, W, J, R, S\}(0{,}95), \{CG, W\}(0{,}35) >\}$$

$$(D^N)_{23} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J\}(0{,}22), \{S, B\}(0{,}72), \{W, J\}(0{,}6), \{CG\}(0{,}8) >\}$$

$$(D^N)_{31} = < \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, Wi, J, B\}(0{,}9), \{B, S, CG, W\}(0{,}8), \{H, Wi, J, CG, W\}(0{,}5), \{W\}(0{,}2) >\}$$

$$(D^N)_{32} = \{< \{S, Wi, H, J, B, CG, W\}, \{H, R, J\}(0{,}75), \{S, B\}(0{,}9), \{J, B\}(0{,}7), \{CG, W\}(0{,}86) >\}$$

Table 21. Single Pairwise Comparison Matrix According to $\widetilde{\cap}_o$ Operator

	K_1	K_2	K_3
K_1	1	$(D^N)_{12}$	$(D^N)_{13}$
K_2	$(D^N)_{21}$	1	$(D^N)_{23}$
K_3	$(D^N)_{31}$	$(D^N)_{32}$	1

Stage 2.3. The net value matrix of the criteria was created. The net value matrix was obtained using the score function in Definition 3.1 and given in Table 22. For example, the net value for GSVNQN $(D_N)_{12}$ in Table 21 is obtained such that

$$S((D_N)_{12}) = \frac{|7 - 1 - 1 - 1|}{7} + \frac{|0{,}5 - 0{,}8 - 0{,}7 - 0{,}5|}{3}$$
$$= 1{,}071.$$

Similarly, the net values for other GSVNQN are obtained and Table 22 is obtained. Also, the local weight of the K_1 criterion is obtained such that

$$YA(K_1) = \frac{1}{1 + 0{,}930 + 1{,}057}$$
$$= 0{,}344.$$

Similarly, local weights for K_2 and K_3 criteria are obtained and given in Table 22.

Table 22. Net Values of Criteria

	K_1	K_2	K_3
K_1	1,000	1,071	1,222
K_2	0,930	1,000	0,919
K_3	1,057	0,998	1,000
Local Weights	0,334	0,325	0,318

Stage 2.4. Using the local weights in Table 22, the local weight matrix is

$$W_{YA} = \begin{bmatrix} 0{,}334 \\ 0{,}325 \\ 0{,}318 \end{bmatrix}$$

created.

Step 3. Using the CR formulas in Step 4 of the Classical ANP (Saaty, 1986) in Definition 2.6, the CR of the net value matrix of the criteria in Table 22 is obtained. Here,

λ_{max} = 3,058;

n = 3 criteria;

RI= 0,58;

CI = ((3,067-3))/2=0,025;

CR = 0,029/0,58=0,051;

and

$0 \leq 0{,}051 \leq 0{,}1$;

Thus, the matrix is consistent.

Step 4. Eigenvectors are obtained to create a super matrix.

Step 4.1. Comparison matrices of the internal dependencies of the criteria were created according to each criterion. Table 23, Table 24, and Table 25 show the internal dependency matrices according to the criteria.

Table 23. Comparison Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_1

	$\boldsymbol{K_2}$	$\boldsymbol{K_3}$
$\boldsymbol{K_2}$	1	$(D^N)_{23}$
$\boldsymbol{K_3}$	$(D^N)_{32}$	1

Table 24. Comparison Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_2

	$\boldsymbol{K_1}$	$\boldsymbol{K_3}$
$\boldsymbol{K_1}$	1	$(D^N)_{13}$
$\boldsymbol{K_3}$	$(D^N)_{31}$	1

Table 25. Comparison Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_3

	$\boldsymbol{K_2}$	$\boldsymbol{K_3}$
$\boldsymbol{K_2}$	1	$(D^N)_{23}$
$\boldsymbol{K_3}$	$(D^N)_{32}$	1

Stage 4.2. Net value matrices of the matrices obtained in Stage 4.1 are created. Similar to Stage 2.3, net values and weights are obtained. Internal dependency comparison net value matrices according to the criteria are given in Table 26, Table 27, and Table 28.

Table 26. Comparison Net Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_1

	$\boldsymbol{K_2}$	$\boldsymbol{K_3}$
$\boldsymbol{K_2}$	1,000	0,919
$\boldsymbol{K_3}$	0,998	1,000
Weights	0,500	0,521

Table 27. Comparison Net Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_2

	$\boldsymbol{K_1}$	$\boldsymbol{K_3}$
$\boldsymbol{K_1}$	1,000	1,222
$\boldsymbol{K_3}$	1,057	1,000
Weights	0,486	0,450

Table 28. Comparison Net Matrix of Internal Dependencies According to Criterion K_3

	K_1	K_2
K_1	1,000	1,071
K_2	0,930	1,000
Weights	0,518	0,482

Stage 4.3. Eigenvectors were created using the weights obtained in Stage 4.2.

Eigenvectors of criteria K_1, K_2 and K_3 is obtained such that

$$V_{K_1} = \begin{bmatrix} 1{,}000 \\ 0{,}500 \\ 0{,}521 \end{bmatrix}, V_{K_2} = \begin{bmatrix} 0{,}486 \\ 1{,}000 \\ 0{,}450 \end{bmatrix} \text{ and } V_{K_3} = \begin{bmatrix} 0{,}518 \\ 0{,}482 \\ 1{,}000 \end{bmatrix}$$

Step 5. Super matrix created.

Step 5.1. Using the eigenvectors obtained in Step 4.3, the super matrix in Table 29 is obtained.

Table 29. Super Matrix

	K_1	K_2	K_3
K_1	1,000	0,486	0,518
K_2	0,500	1,000	0,482
K_3	0,521	0,450	1,000

Step 5.2. The super matrix is normalized.

For example, using the values (in the matrix in Table 29)

$$N\left((A(K_1))_{K_1}\right) = \frac{1{,}000}{1{,}000 + 0{,}500 + 0{,}521} = 0{,}494$$

is obtained. Similarly, the other elements are obtained to obtain the normalized super matrix given in Table 30.

Table 30. Normalized Super Matrix

	K_1	K_2	K_3
K_1	0,494	0,251	0,259
K_2	0,274	0,516	0,241
K_3	0,257	0,232	0,500

Step 6. To calculate the global weight of the criteria, the local weight matrix is obtained in Step 2.4 is multiplied by the normalized super matrix obtained in Step 5.2.

$$\begin{bmatrix} 0{,}494 & 0{,}251 & 0{,}259 \\ 0{,}274 & 0{,}516 & 0{,}241 \\ 0{,}257 & 0{,}232 & 0{,}500 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0{,}334 \\ 0{,}325 \\ 0{,}318 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}329 \\ 0{,}327 \\ 0{,}320 \end{bmatrix}$$

Step 7. With the global weights obtained in Step 6, an impact ranking is made among the criteria. The obtained weights of the criteria are given in Table 31.

Table 31. Weights of the Criteria

Criteria	Weights
K_1	0,329
K_2	0,327
K_3	0,320

As can be seen in Table 26, it is clear that environmental criteria have the greatest impact on other criteria when choosing RES with a weight of 0,329; followed by social criteria with a weight of 0,327 and economic criteria with a weight of 0,320. Also, attention should be paid to the impact of the internal dependencies of the criteria on the weights. Because, the internal dependencies changed the weights of the main criteria from (0,334; 0,325; 0.318) to (0,329; 0,327; 0,320). This change in the weights of the main criteria reveals a certain change in the order of importance in the MCDM process. Therefore, taking into account the interdependencies of the criteria in future applications will provide more objective results in MCDM.

4. Comparison Method

The comparison matrices created by experts U_1, U_2, and U_3 were obtained by using the average intersection, optimistic intersection, pessimistic intersection, average union, optimistic union, and pessimistic union operators (Şahin et al., 2023) defined for GSVNQN. The CR of the obtained comparison matrices are obtained and these CR are given in Table 32.

Table 32. CR of Comparison Matrices Obtained from Operators (Şahin et al., 2023)

Operator	CR
Average Intersection	0,051
Optimistic Intersection	0,116
Pessimistic Intersection	-0,086
Average Union	0,419
Optimistic Union	0,491
Pessimistic Union	0,288

As can be seen in Table 32, only the matrix obtained using the average intersection operator is found to be consistent. However, the comparison matrices obtained with other operators were not consistent. Operations cannot be performed with inconsistent matrices. If it is done, the results obtained may contradict the real results.

Although the comparison matrix obtained with the optimistic intersection operator is not consistent, calculations are performed. The ranking obtained with the inconsistent optimistic intercept operator and the ranking obtained with the consistent average intercept operator are given in Table 33.

Table 33. Rankings Obtained from Operators (Şahin et al., 2023)

Operator	Ranking
Average Intersection	$K_1 > K_2 > K_3$
Optimistic Intersection	$K_3 > K_2 > K_1$

As can be seen in Table 33, K_1 is found to be the most important criterion in the ranking of the importance of the criteria with the consistent comparison matrix obtained using the average intersection operator, while K_3 is found to be the most important criterion in the ranking of the importance of the criteria with the inconsistent comparison matrix obtained using the optimistic intersection operator. It was also seen that the rankings obtained were opposite to each other. Therefore, the choice of the operator to be used in MCDM applications and the consistency of the matrix obtained as a result of the selected operator are of great importance. Because the different rankings obtained will greatly affect the outcome of MCDM applications.

5. Conclusion

In this article, score and accuracy functions for GSVNQN are determined. The steps of the ANP method using these numbers and how it can be applied in practice are explained. The ANP method defined on GSVNQN also includes the consistency ratio calculation and global weight calculation steps in the classical ANP method. An application was made using fictitious data on a sample problem from current life. In the example problem, an MCDM application was carried out by considering the environmental, social, and economic criteria in the selecting RES and deciding which criterion is more effective than other criteria. As a result of this application, it was concluded that the environmental criterion was more effective than the other criteria, followed by the social and economic criteria.

Although the example was conducted with fictitious data, researchers can obtain more objective results by using this method with real data. It was also observed that the interdependencies between the criteria significantly affect the weight results and this effect can lead to a certain change of priority in the MCDM process. In addition, the comparison matrix obtained must be consistent, otherwise the results obtained will be different from the results obtained with a consistent matrix.

Researchers can use interval GSVNQS and bipolar GSVNQS in the ANP Method thanks to the obtained algorithm, score and accuracy functions. Furthermore, researchers can define similarity or distance measure for using the in the obtained algorithm instead of score and accuracy functions. Researchers also can use GSVNQS in other specialized MCDM methods (The DEMATEL Method, AHP Method, TOPSIS Method, ...) thanks to the obtained algorithm, score, and accuracy functions. In addition, the algorithm will be converted into a computer program by the researchers so that they can try the algorithm directly on their own.

Abbreviations

NS: Neutrosophic Sets

NQS: Neutrosophic Quadruple Sets

NQS: Neutrosophic Quintuple Sets

SVNQS: Set-Valued Neutrosophic Quintuple Sets

SVNQN: Set-Valued Neutrosophic Quintuple Numbers

QPNS: Quadri-Partitioned Neutrosophic Sets

QSVNQS: Generalized Set-Valued Neutrosophic Quintuple Sets

QSVNQN: Generalized Set-Valued Neutrosophic Quintuple Numbers

MCDM: Multi Criteria Decision-Making

RES: Renewable Energy Sources

Conflict of Interest Statement

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

Contribution Rate Statement Summary of Researchers

The author declares that he contributed 100% to the article.

References

Abdel-Basset M., Gamal A., Son LH., Smarandache F. A bipolar neutrosophic multi criteria decision making framework for professional selection. Applied Sciences 2020; 10(4): 1202.

Alkabaa AS., Taylan O., Guloglu B., Baik S., Sharma V., Mishra R., Upreti GA. Fuzzy ANP-based criticality analyses approach of reliability-centered maintenance for CNC lathe machine components. Journal of Radiation Research and Applied Sciences 2024; 17(1): 100738.

Al-Tahan M., Davvaz B., Smarandache F., Al-Kaseasbeh S. Fundamental group and complete parts of neutrosophic quadruple hυ-groups. Neutrosophic Sets And Systems 2023; (53): 107-116.

Bakhshizadeh A., Yazdani-Chamzini A., Benmaran ML., Šaparauskas J., Turskis Z. Extracting and prioritizing the attractiveness parameters of shopping centers under intuitionistic fuzzy numbers. International Journal of Strategic Property Management 2024; 28(2): 130-142.

Borujeni SHA., Zare M., Saadabadi LA. Comparison of factors affecting the acceptance of the trenchless technology and open-trench method using ANP and AHP: case study in Iran. Journal of Construction Engineering and Management 2024; 150(1): 04023145.

Büyüközkan G., Karabulut Y., Göçer F. Spherical fuzzy sets based integrated DEMATEL, ANP, VIKOR approach and its application for renewable energy selection in Türkiye. Applied Soft Computing Article 2024; (58): 111465 58.

Chatterjee R., Majumdar P., Samanta SK. On some similarity measures and entropy on quadri-partitioned single valued neutrosophic sets. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems 2016; (30): 2475-2485.

Debnath S. Fuzzy quadri-partitioned neutrosophic soft matrix theory and its decision-making approach. Journal of Computational and Cognitive Engineering 2022; 1(2): 88-93.

Garg H. A new exponential-logarithm-based single-valued neutrosophic set and their applications. Expert Systems with Applications 2024; (238): 121854.

Gayen D., Chatterjee R., Roy S. A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development. International Journal of Environmental Science and Technology 2024; 21(5): 5285-5310.

Hanafi AM., Moawed MA., Abdellatif OE. Advancing sustainable energy management: a comprehensive review of artificial intelligence techniques in building. Engineering Research Journal (Shoubra) 2024; 53(2): 26-46.

Hussain S., Hussain J., Rosyida L., Broumi S. Quadri-partitioned neutrosophic soft graphs. In: S. Broumi (ed.) Handbook of Research on Advances and Applications of Fuzzy Sets and Logic. IGI Global 2022; 34, 771-795.

Jana C., Pal M., Karaaslan F., Wang JQ. Trapezoidal neutrosophic aggregation operators and their application to the multi-attribute decision-making process. Scientia Iranica 2020, 27(3): 1655-1673.

Kar A., Rai RN. QFD-Based hybrid neutrosophic MCDM approach with six sigma evaluation for sustainable product design in industry 4.0. Kybernetes 2024; DOI: 10.1108/K-09-2023-1757.

Karaaslan F. Neutrosophic soft set with applications in decision making," International Journal of Information Science and Intelligent System, 2015, 4(2): 1-20.

Karaaslan F. Correlation coefficients of single-valued neutrosophic refined soft sets and their applications in clustering analysis. Neural Computing and Applications, 2017, 28(9): 2781-2793.

Karaaslan A., Aydın S. Evaluation of renewable energy resources with multi-criteria decision-making techniques: Türkiye example. Atatürk University Journal of Economics and Administrative Sciences 2020; 34(4): 1351-1375.

Kargın A., Dayan A., Şahin NM. Generalized hamming similarity measure based on neutrosophic quadruple numbers and its applications to law sciences. Neutrosophic Set and Systems 2021; (40): 45-67.

Kungumaraj E. An evaluation of triangular neutrosophic pert analysis for real-life project time and cost estimation. Neutrosophic Sets and Systems 2024; 63(1): 5.

Li T., Rui Y., Zhao S., Zhang Y., Zhu H. A quantitative digital twin maturity model for underground infrastructure based on D-ANP. Tunnelling and Underground Space Technology 2024; (146): 105612.

Liao H., Mi X., Xu Z., Xu J., Herrera F. Intuitionistic fuzzy analytic network process. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 2018; 26(5): 2578-2590.

Lyu HM., Yin ZY., Zhou A., Shen SL. Sensitivity analysis of typhoon-induced floods in coastal cities using improved ANP-GIS. International Journal of Disaster Risk Reduction 2024; (104): 104344.

Mahmood T., Azam M., Hayat K., Özer Ö., Rehman U. Classification of helium hard disk drives by employing multi-attribute decision making approach relying on bipolar complex fuzzy dombi geometric Heronian mean operators. PLOS One, 2025

Mary SA. Quadri partitioned neutrosophic soft set. International Research Journal on Advanced Science Hub 2021; (3): 106-112.

Mikhailov L., Singh MG. Fuzzy analytic network process and its application to the development of decision support systems, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part c. Applications and Reviews 2003; 33(1): 33-41.

Mousavi SR., Sepehri M., Najafi SE. A framework for improving patient satisfaction by reducing the length of stay in the operation suite using the combined DEMATEL-ANP model. decision making. Applications in Management and Engineering 2024; 7(2): 197-220.

Nalbant KG., Özdemir Ş., Özdemir Y. Evaluating the campus climate factors using an interval type-2 fuzzy ANP. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences 2024; 42(1): 89-98.

Onwusinkwue S., Osasona F., Ahmad IAI., Anyanwu AC., Dawodu SO., Obi OC., Hamdan A. Artificial intelligence (AI) in renewable energy: a review of predictive maintenance and energy optimization. World Journal of Advanced Research and Reviews 2024; 21(1): 2487-2499.

Özer Ö. Hamacher prioritized aggregation operators based on complex picture fuzzy sets and their applications in decision-making problems, J. Math. Comput. Sci., 2022; 1(1): 33–54.

Panimalar A., Mohana K., Parvathi R. Mathematical morphological operations for quadri-partitioned neutrosophic set. International Journal of Neutrosophic Science 2023; 23(2): 77.

Pouyakian M., Shafikhani AA., Najafi AA., Afshar-Najafi B., Kavousi A. Utilising the fuzzy analytic network process technique to prioritise safety challenges ın construction projects. International Journal of Critical Infrastructures 2024; 20(1): 16-32.

Qing K., Du Y., Huang Q., Duan C., Hu W. Energy scheduling for microgrids with renewable energy sources considering an adjustable convex hull based uncertainty set. Renewable Energy 2024; (220): 119611.

Rather KN., Mahalik MK., Mallick H. Do renewable energy sources perfectly displace non-renewable energy sources? evidence from Asia–pacific economies. Environmental Science and Pollution Research 2024; 31(17): 25706-25720.

Saaty TL. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. Management Science 1986; 32(7): 841-855.

Şahin B., Soylu A. Intuitionistic fuzzy analytical network process models for maritime supply chain. Applied Soft Computing 2020; (96): 106614.

Şahin M. Neutro-sigma algebras and anti-sigma algebras. Neutrosophic Sets and Systems 2022; 51(1): 56.

Şahin M., Kargın A. Bipolar neutrosophic quintuple numbers and bipolar set valued neutrosophic quintuple numbers. in: G. Özyazıcı, M. Ceritoğlu (ed.), V. International Sciences and Innovation Congress 2022a; sayfa no:516-531, Ankara.

Şahin M., Kargın A. Bipolar neutrosophic valued neutrosophic crisp Sets**.** in: M. Faisal, A. Amanzholova (ed.), IV. International Ankara Multidisciplinary Studies Congress 2022b, sayfa no: 494-507, Ankara.

Şahin M., Kargın A. Interval neutrosophic quintuple numbers and interval set valued neutrosophic quintuple numbers. in: G. Özyazıcı, M. Ceritoğlu (ed.), V. International Sciences and Innovation Congress 2022c; sayfa no: 532-547, Ankara

Şahin M., Kargın A., Doğan K. Generalized set valued neutrosophic quintuple numbers. in: P. A. Gürel, K. Beşaltı (ed.), 9th Ankara International Congress on Scientific Research 2023; sayfa no: 55-62. Ankara.

Şahin M., Kargın A., Doğan K. Neutrosophic quintuple numbers and set valued neutrosophic quintuple numbers. in: M. Şahin, A. Amanzholova (ed.), III. Başkent International Conference on Multidisciplinary Studies 2022; sayfa no: 605-614, Ankara.

Şahin M., Kargın A., Kılıç A. Generalized set valued neutrosophic quadruple sets and numbers. in: F. Smarandache, M. Şahin, V. Uluçay, A. Kargın (ed.), Quadruple neutrosophic theory and applications, Pons Publishing House, Brussels 2020; 2, 23-40.

Şahin M., Kargın A., Uz MS. Generalized euclid measures based on generalized set valued neutrosophic quadruple numbers and multi criteria decision making applications. Neutrosophic Sets and Systems 2021; (47): 573-600.

Sayed ET., Olabi AG., Alami AH., Radwan A., Mdallal A., Rezk A., Abdelkareem MA. Renewable energy and energy storage systems. Energies 2023; 16(3): 1415.

Shoaei M., Noorollahi Y., Hajinezhad A., Moosavian SF. A review of the applications of artificial intelligence in renewable energy systems: an approach-based study. Energy Conversion and Management 2024; (306): 118207.

Slamaa AA., El-Ghareeb HA., Saleh AA. A roadmap for migration system-architecture decision by neutrosophic-ANP and benchmark for enterprise resource planning systems. IEEE Access 2021; (9): 48583-48604.

Smarandache F. Neutrosophic quadruple numbers, refined neutrosophic quadruple numbers, absorbance law, and the multiplication of neutrosophic quadruple numbers. Neutrosophic Set and Systems 2015; (10): 96-98.

Smarandache F. Neutrosophy: neutrosophic probability, set and logic. Amer. Research Press Reheboth, USA, 1998.

Talaat M., Elkholy MH., Alblawi A., Said T. Artificial intelligence applications for microgrids integration and management of hybrid renewable energy sources. Artificial Intelligence Review 2023; 56(9): 10557-10611.

Vaz-Patto CM., Ferreira FA., Govindan K., Ferreira NC. Rethinking urban quality of life: unveiling causality links using cognitive mapping, neutrosophic logic and DEMATEL. European Journal Of Operational Research 2024; 316(1): 310-328.

Voskoglou MG., Smarandache F., Mohamed M. Q-rung neutrosophic sets and topological spaces. Neutrosophic Systems with Applications 2024; (15): 58-66.

Wang H., Smarandache F., Zhang Y., Sunderraman R. Single valued neutrosophic sets. Multispace and Multistructure 2010; (4): 410-413.

Wilberforce T., Olabi AG., Sayed ET., Mahmoud M., Alami AH., Abdelkareem MA. The state of renewable energy source envelopes in urban areas. International Journal of Thermofluids 2024; (21): 100581.

Yang Y., Li H., Zhang Z., Liu X. Interval-valued intuitionistic fuzzy analytic network process. Information Sciences 2020; (526): 102-118.

Zaied ANH., Ismail M., Gamal A. An integrated of neutrosophic-ANP technique for supplier selection. Neutrosophic Sets and Systems 2019; (27): 237-244.

Zhang Y., Wang S., Liu J., Liu D., Li T., Wu W. A corrosion assessment methodology based on triangular intuitionistic fuzzy comprehensive evaluation (TIFCE) with analytic network process (TIFANP): an application to external corrosion of the storage tank floor. Expert Systems with Applications 2024; (238): 121896.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1572-1597, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1572-1597, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Psikiyatrik Hastalığı Olan Ergenlere Uygulanan Derecelendirilmiş Ölçeklerden Elde Edilen Scalogram Görüntüleri Kullanılarak Bilgisayar Destekli Hastalık Teşhis Tahmini

Sinan ALTUN[1]*, Hatice ALTUN[2]

[1]Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Kahramanmaraş
[2]Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tıp Fakültesi Çocuk ve Ergen Ruh Sağlığı ve Hastalıkları ABD, Kahramanmaraş

[1]https://orcid.org/0000-0002-2356-0460
[2]https://orcid.org/0000-0002-6802-8216
*Sorumlu yazar: s.altun@yaani.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 02.12.2024
Kabul tarihi:27.03.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Ergenlik dönemi
Ergenlik döneminde psikiyatrik bozukluklar
Makine öğrenmesi
Otomatik hastalik teşhisi tahmini

ÖZ

Ergenlik dönemi hem ergenler hem de aileleri için zor bir dönemdir. Ergenler üzgün ve karamsardır. Ayrıca ergenler zaman zaman öfke patlamaları yaşayabilirler. Ergenler her şeyden önce anlaşıldıklarını ve kendilerine değer verildiğini hissetmeye ihtiyaç duyarlar. Aksi takdirde, ergenler bu duygularını tatmin etmek için başka bir ortama ihtiyaç duyarlar. Ergenlik, yaşamın zor bir dönemidir ve birey ve aile için psikolojik olarak zorlayıcı bir dönemdir. Ergenlik dönemindeki psikiyatrik hastalıklar tedavi edilmezse, ergenler kalıcı ruhsal bozukluklara maruz kalabilir. Bu bozukluklar kişinin psikolojik rahatsızlığını artırarak devam edebilir. Gençlik, bir ülkenin her alanda gelişmesinde önemli bir faktördür. Bu nedenle ergenlik dönemi uygun şekilde yönetilmeli ve psikiyatrik bir hastalık ortaya çıktığında hızlı bir tanı/tedavi süreci uygulanmalıdır. Ruhsal hastalıkların teşhisi de uzman gözlemine dayanır ve iyi bir uzmanlık gerektirir. Tabii ki bu sistemler karar destek sistemleridir ve son karar uzmanlara bırakılır. Bu çalışmada, ergenlik döneminin zorlu yaşam evrelerinde akıl hastalıklarının otomatik tedavisi için makine öğrenimini araştırmak üzere kullanıyoruz. Literatürde sıkça kullanılan, Random Forest ve Support Vector Machines algoritmaları ile çalışılmıştır. Bu algoritamalarda, işlenmeden kullanılan veri setine göre Scalogram görüntülerinde daha yüksek sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Random Forest: %91, Support Vector Machines: %88.

Computer-Aided Disease Diagnosis Prediction Using Scalogram Images Obtained From Graded Scales Applied To Adolescents With Psychiatric Illness

Research Article

Article History:
Received: 02.12.2024
Accepted: 27.03.2025
Published online: 16.09.2025

ABSTRACT

Adolescence is a difficult period for both adolescents and their families. Adolescents are sad and pessimistic. Adolescents may also experience outbursts of anger from time to time. Adolescents need above all to feel understood and valued. Otherwise, adolescents need another environment to

Keywords:
Adolescence
Psychiatric disorders in adolescence
Machine learning
Automatic disease diagnosis prediction

satisfy these feelings. Adolescence is a difficult period of life and a psychologically challenging time for the individual and the family. If psychiatric illnesses during adolescence are left untreated, adolescents may suffer from permanent mental disorders. These disorders may continue by increasing the psychological disturbance of the person. Youth is an important factor in the development of a country in every field. For this reason, adolescence should be managed appropriately and a rapid diagnosis/treatment process should be applied when a psychiatric illness occurs. Diagnosis of mental illnesses is also based on expert observation and requires good expertise. Of course, these systems are decision support systems and the final decision is left to the experts. In this study, we use machine learning to investigate the automatic treatment of mental illnesses in the challenging life stages of adolescence. Random Forest and Support Vector Machines algorithms, which are frequently used in the literature, are used. In these algorithms, higher classification success was obtained in scalogram images compared to the unprocessed data set. Random Forest: 91%, Support Vector Machines: 88%.

To Cite: Altun S., Altun H. Computer-Aided Disease Diagnosis Prediction Using Scalogram Images Obtained From Graded Scales Applied To Adolescents With Psychiatric Illness. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1572-1597.

1.Introduction

Psychiatric disorders in children and adolescents cause difficulties and impairments in many areas of life such as social, emotional, academic and financial areas. Adolescence in particular is a challenging period in which children undergo multifaceted and major changes and make the transition from childhood to adulthood. Adolescence is a sensitive and important period in which, in addition to physical changes, ideas about adult life begin to form, adolescents try to find their identity and self, acquire various social skills, begin to establish close relationships with the opposite sex, make plans about their careers and undergo intense emotional changes. Therefore, as normal development continues during this period, early recognition and treatment of psychiatric disorders is very important. Scientific data such as the fact that the first symptoms of various psychiatric disorders begin in childhood or adolescence and that delayed diagnosis and treatment of some psychiatric disorders leads to poor prognosis show the importance of psychiatric evaluations during this period. Early interventions can ensure that the child completes normal development in biopsychosocial areas and prevent future medical and psychiatric disorders (Çuhadaroğlu et al., 2008; Akçan et al., 2012).

It is very important to work in cooperation with the family and school to address the problems recognized during adolescence. Mental health professionals conduct a comprehensive assessment and gather information about the family's reasons for seeking treatment. Sometimes they use different scales and tests during treatment. Sometimes, family concerns lead to a referral. Based on an assessment of the seriousness and timing of the problem, a caseworker determines a solution to address the youth or family's concern. They also consider the impact of the issue on youth functioning (Agnafors et al., 2020).

A wide range of psychiatric disorders can be seen during adolescence. Attention deficit hyperactivity disorders (ADHD), anxiety disorders, depressive disorders, mood disorders, obsessive-compulsive

disorders, conduct disorders, risky behaviors (behavioral sexual risk, teen pregnancy, etc.), substance abuse and eating disorders are among the common psychiatric disorders (Gizli Çoban et al., 2022).

1.1. Attention Deficit and Hyperactivity Disorder

Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) is a disorder that negatively affects the educational life and social relationships of preschool and school-age children. ADHD is a neurodevelopmental disorder that begins in childhood and can have a lifelong impact, is chronic, and is very common in childhood. ADHD has symptoms that vary according to the age and developmental level of the child. The main symptoms include attention problems, hyperactivity, impulsivity and inability to postpone requests, which are not appropriate for the child's age and developmental level.

It has a multifactorial etiology. In addition to genetic factors, environmental factors such as the mother's alcohol use during pregnancy, malnutrition and food poisoning, exposure to chemical poisons, difficulties during childbirth, exposure to infections and chemical poisons, and iron deficiency also play a role in the etiology of ADHD.

Observation of symptoms and elaboration of patient history, detailed examination of complaints, gathering information from the immediate environment, physiological and neurological examination, as well as rating scales and cognitive tests are used in diagnosis. ADHD is diagnosed by a child psychiatrist after a detailed evaluation and according to the American Psychiatric Association Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5 (Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders)) .

1.2. Oppositional Defiant Disorder

Oppositional defiant disorder is known as a disorder in which children and adolescents constantly have problems with their environment and have problems in obeying the rules. Behaviors such as defiance against parents and defiance against teachers may occur. Symptoms can be listed as follows (Ghosh et al., 2017);

- Frequent moodiness,
- Fights with elders,
- Difficulty in following rules and rejection of rules,
- A state of intense aggression,
- Touchy, resentful behavior,
- He is often vindictive and wants revenge.

1.3. Behavior Disorders

Conduct disorder is a mental problem that can negatively affect the child or adolescent himself/herself, his/her family and the society in which he/she lives. There are two types of the disorder: childhood-onset and adolescent-onset (DSM 5). Childhood-onset conduct disorder usually occurs before the age

of 10. Physical violence, disturbance in peer relationships and problems at school can be considered as symptoms. In adolescence-onset conduct disorder, although there are no symptoms before the age of 10, it is stated that this disorder emerges between the ages of 12-15. Symptoms of conduct disorder (Gupta et al., 2017);

- Physical and verbal aggression,
- Tendency to argue/fight constantly,
- Don't treat animals cruelly,
- Destructiveness,
- Outbursts of anger.
- Anxiety Disorder

1.4. Depression

Depression is unfortunately one of the most common psychological problems of the modern age. It is a problem that draws attention with symptoms such as feeling sad, depressed, hopeless, worthless, withdrawal from social life and withdrawal. Clinical features of depression (Bansal et al., 2009):

- A persistent state of unhappiness,
- Not wanting to do anything, being in a bad mood and reluctant,
- Irritability
- Crying spells, irritability,
- Sleep and eating disorders,
- Excessive weight gain or weight loss,
- Slowness of movements, withdrawal,
- Thinking about death, talking about dying, suicidal tendencies

1.5. Obsessive Compulsive Disorder

Obsessive-compulsive disorder (OCD) is a chronic mental disorder characterized by obsessions and/or compulsions. Obsessions are recurrent thoughts, impulses or images that arise spontaneously, cause distress, and are usually known to be absurd. Compulsions, on the other hand, are motor or mental actions that are usually performed with certain rules in response to an obsession. When the symptoms of this disorder, which can be seen in children and adolescents, are observed by families, treatment should be sought. It is very important to get professional support. Symptoms of obsessive-compulsive disorder (Nazeer et al., 2020);

- Fear of contamination
- Obsession with order and symmetry
- Do not think that you or your loved ones will be harmed
- Continuous hand washing
- Excessive obsession with cleanliness

- Fear of germs
- Constant desire to take a shower
- Counting in certain patterns
- Repeating a prayer, word or phrase internally

1.6. Tic Disorder

Tic Disorders are sudden, fast, involuntary, non-rhythmic movements or sounds. They can be partially suppressed. In most cases, tics and twitches can be harmless and temporary. If they last less than 1 year, they are called transient tic disorders; if they last longer than 1 year, they are called chronic tic disorders. Tic disorders can usually be managed with treatment (Ueda and Black., 2021).

1.7. Adjustment Disorders

Adjustment disorders are defined as the development of emotional and behavioral symptoms that occur within 3 months of the onset of stressors as a reaction to demonstrable stressors and that cause a significant impairment in social, occupational or educational functioning. Exposure to a stressor results in greater and more pronounced distress than expected. If the stressor becomes persistent, the disorder may become chronic (Ferrer and Kirchner, 2021).

Adjustment disorders;

- Short depressive reaction,
- Prolonged depressive response,
- Mixed type with a combination of depression and depressive reactions,
- The type in which behavioral disorders are prominent,
- Combination of emotional disturbance and conduct disorder,
- Type in which other emotional disorders are evident,
- There are seven subtypes, including the type in which other symptoms are prominent.

The type in which other symptoms are prominent can also be exemplified by regressive behaviors such as bedwetting, baby talk and thumb sucking in children.

Depressive symptoms are the most common symptom group in children and adults with adjustment disorder.

Other symptoms are;

- Insomnia,
- Social withdrawal,
- Suicide symptoms,
- Anxiety,
- Reckless driving,
- Aggressive behavior,
- Failure to fulfill legal responsibilities or breaking the law,

- Alcohol and substance abuse.

1.8. Mild Intellectual Disability

Individual with intellectual disability refers to an individual who differs below two standard deviations below the average in terms of intellectual functions, has deficiencies or limitations in conceptual, social and practical adaptation skills, these characteristics occur in the developmental period before the age of 18 and needs special education and support education services. Intellectual disability is the most common and heterogeneous group of individuals in need of special education. It is possible to encounter these individuals in preschool and primary education years. Mostly children with mild intellectual disabilities are recognized by teachers at school. Those with moderate and severe intellectual disabilities may be recognized earlier. It refers to an individual who has a limited need for special education and supportive education services due to his/her mild deficiency in mental functions and conceptual, social and practical adaptation skills (Davison et al., 2022).

1.9. Borderline Personality Disorder Pattern

Borderline personality disorder is a mental disorder characterized by rapidly fluctuating moods, excessive impulsivity, poor self-perception and sensitivity to abandonment, which greatly affects the way of thinking and feeling and causes difficulties in daily life. Instability in moods can be detrimental to many areas of an individual's life and can negatively affect close relationships, school, work, interactions with the social environment or the individual's self-image. The individual's risky behaviors towards themselves (alcohol, substance abuse, suicide attempts, harming someone, risky sexual behaviors, illegal acts, abusive relationships) can affect the quality of life in many ways and can lead to serious problems in daily life (Guilé et al., 2018).

Borderline personality disorder is first seen in young adulthood and more commonly in early adulthood. Most borderline personality disorder, like other mental health problems, can be cured over time with the right treatment and can continue their lives in a quality enough for themselves (Tschan et al., 2017; Coskun et al., 2022).

1.10. Conversion Disorder

Conversion disorder (also known as functional neurological system disorder) is a condition in which a person experiences physical and sensory problem such as paralysis, numbness, blindness, deafness or seizures without an underlying neurological pathology. These problems are serious enough to negatively affect important life functions such as academic performance, social relationships and family life (Brazier and Venning, 1997). Children with conversion disorder do not fake or deliberately fabricate their physical or sensory problems. They are real, but the problems are not caused by underlying medical problems; rather, they are disturbances in the normal functioning of the body. Conversion disorder is usually, but not always, caused by poorly expressed distress that is relieved by the presence of symptoms (Pehlivantürk and Unal, 2002).

Conversion disorder is still a poorly understood diagnosis in children. The name "conversion disorder" refers to the transformation of emotional stress into physical symptoms. However, the same type of physical and sensory problems can occur with or without known psychosocial or traumatic stressors. For this reason, the broader term "functional neurological symptom disorder" is accepted for this condition. Diagnosis and treatment are essentially the same whether or not the problem has an identifiable emotional cause (De Cos Milas et al., 2016).

1.11. Bipolar Disorder

Bipolar Disorder is often characterized by episodes of depression and mania. Depression seen in Bipolar Disorder is generally a severe depression with a more severe course, causing more loss of functioning and more suicidal thoughts and attempts. In mania attacks, symptoms such as seeing oneself as big and strong, decreased need for sleep, being more talkative than usual, flight of ideas, inability to focus attention, easy distraction, increase in purposeful activities, excessive participation in activities that are likely to have bad consequences are observed. It usually starts insidiously and with few symptoms. It can also start acutely in adverse life events and stressful situations. Its course is chronic and continuous (Demeter et al., 2008).

In order to diagnose Bipolar Disorder, there must be an episode of mania or symptoms of mania mixed with depression. In children and adolescents, these episodes of mania and depression may alternate rapidly or may be mixed. The most common symptoms are irritability, overstimulation and restlessness. Irritability, irritability and severe behavioral problems are also common. Especially during mania, the ability to evaluate reality may be impaired. In adolescents, substance abuse and serious violations of rules may occur during these episodes. Unnecessary boasting, self-righteousness, mobility, impulsive and reactive behaviors may be observed in children (Buckley et al., 2023).

It is thought to be a largely genetically inherited mental disorder. Genetic predisposition is higher in Bipolar Disorder that emerges in childhood. Factors such as adverse life events, stressful situations, exposure to neglect and abuse, physical illnesses can cause Bipolar Disorder or trigger attacks (Geller and Luby, 1997).

1.12. Trichotillomania

Trichotillomania is a condition in which a person pulls, twists or plucks their own hair. This hair pulling is not for cosmetic reasons (such as shaping eyebrows with tweezers) and usually causes distress. It can start at a young age (under 5 years old), but when it starts this early, the child usually stops. When hair pulling starts later in life, in the pre-adolescent or adolescent years, it can be more persistent and last into adulthood (Grant, 2019).

The etiology is not known for certain, but biological, behavioral, learning and psychological factors are involved in its development.

1.13. Psychotic Disorders

Serious mental problems that interfere with a child or adolescent's ability to think clearly, react emotionally, communicate normally, have unusual perceptions (hallucinations), have delusions (a false, fixed, bizarre belief), understand reality and behave appropriately are known as psychotic disorders (Stevens et al., 2014). Psychotic symptoms are seen in children and adolescents with schizophrenia, depression, bipolar disorder and some forms of alcohol and drug addiction.

Psychotic disorders are often the result of a complex network of underlying genetic, hereditary, psychological and environmental factors. Sometimes they occur secondary to an underlying medical condition, such as a brain tumor, brain infection, blood salt imbalance (and other metabolic disorders), seizure disorder, and others (Ringbom et al., 2022). Most young people will need multiple interventions, comprehensive community programs, medications, psychotherapy, family support, vocational and rehabilitation assistance, special education programs, residential and/or inpatient treatment to manage symptoms.

Artificial intelligence applications are being studied by scientists in many fields, from autonomous systems to the creation of expert decision support systems in disease diagnosis, and high successes are being achieved. These achievements of artificial intelligence have now turned theoretical studies into practice. When the literature is examined, it is seen that the application of artificial intelligence / machine learning methods in psychiatric diseases of children and adolescents is not as much as studies for other diagnostic methods. It is very important that psychiatric diseases of young people, who are the guarantee of our future, are diagnosed and treated urgently. Fast and accurate diagnosis is important as in all diseases and needs an objective approach. Machine learning based expert decision support system offers this objective approach based on the studies in the literature. In this study, automatic diagnosis of psychiatric disorders in adolescents will be attempted using DSM 5 and various scales. Figure 1 shows the block diagram of the study.

Timely and accurate diagnosis of these illnesses is of critical importance. The effective involvement of children and adolescents who are diagnosed quickly and accurately in treatment processes is of great importance in terms of preventing negative effects on families and society. For this reason, diagnosis and treatment processes need to be free from errors made by specialised physicians. Machine learning, as a sub-branch of artificial intelligence, is used in a wide range of applications from autonomous vehicles to production processes, quality control applications to various biomedical imaging and blood value analyses. In fact, studies are currently being carried out on artificial intelligence-supported robots that assist doctors in surgical interventions. Although the future role of artificial intelligence is frequently discussed and is a matter of concern, it is clear that with the right applications and generally accepted protocols, it will improve the quality of human life. In this direction, our study aims to create a decision support system that helps the expert to diagnose psychological disorders in adolescents quickly and accurately. In this direction, 5 different tests were used to diagnose adolescents who applied to the clinic with suspicion of illness. Numerical values of these tests were applied various algorithms

to obtain scalogram images. Then, these images were preprocessed with Sobel filter and finally, Random Forest and Support Vector Machines algorithms were used for diagnostic classification.

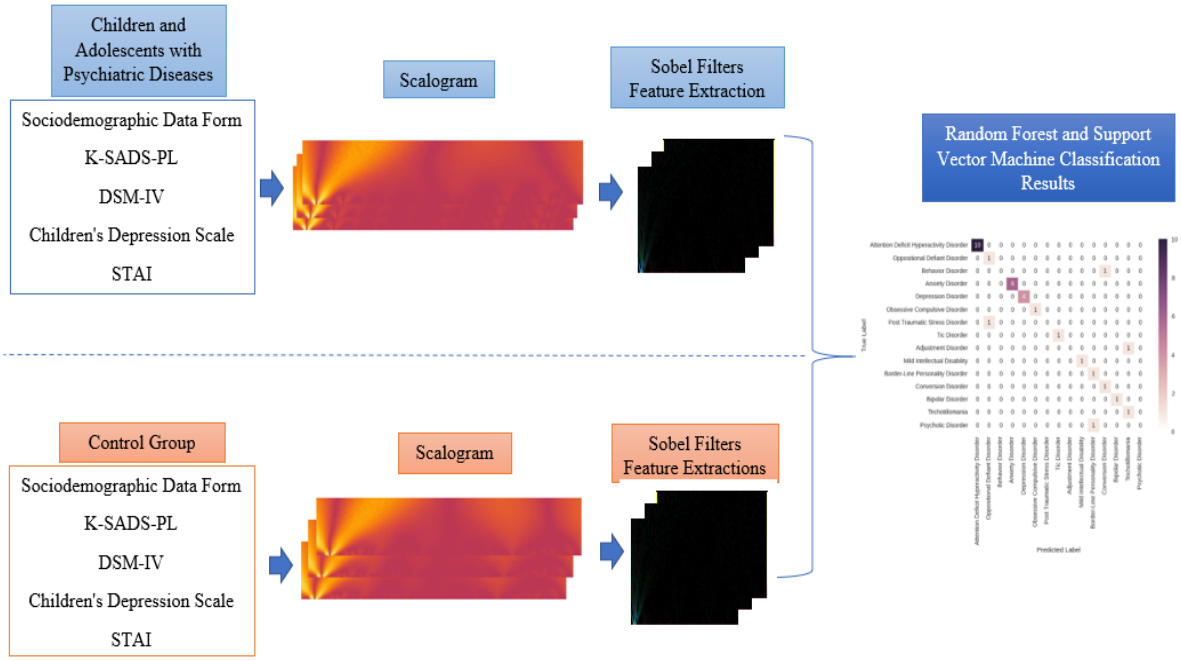


Figure 1. Block diagram

2. Dataset

The sample of this cross-sectional study consisted of adolescents between the ages of 11 and 18 with at least one psychiatric disorder according to DSM 5 who applied to Kahramanmaraş Sütçü İmam University Faculty of Medicine, Child and Adolescent Psychiatry Polyclinic. A total of 160 adolescents, 81 girls and 79 boys, were included in the study.

Inclusion criteria;

1. Being between the ages of 11-18,
2. Having at least one psychiatric diagnosis according to DSM 5
3. Absence of severe intellectual disability in both the child and the parents, which would complicate the implementation of the K-SADS-PL.
4. Information obtained from the files that completed the questionnaire forms completely.

A data set was created with the scale values obtained with the forms described below, and classification was made with machine learning methods for the diagnosis of psychiatric illness in adolescents.

2.1.1. Sociodemographic Data Form

This form was developed by the researchers and used to collect sociodemographic characteristics of adolescents and their families. The content of the data included the adolescent's name, age, gender, education level, number of siblings, place of residence, parents' age, field of education, occupation, presence or absence of mental illness, family relationship between parents, monthly income of the child, psychiatric, etc. The mother's care problems during pregnancy, treatments received, method of delivery,

history of prematurity, family type, additional medical history, medications, time of saying first words, how long she breastfed, whether the child had a known medical condition, and if any, medication history for medical illness.

2.1.2. Affective Disorders and Schizophrenia Interview Schedule for School-Age Children Now and Lifespan Version

The CGVI-SDI was developed by Kaufman et al. in 1997 and translated into Turkish by Gökler et al. in 2004. An interim study was conducted to determine lifetime and current psychopathology according to the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders-IV, DSM 5 and interview-style diagnostic criteria. The form consists of three parts. Initial information, general information such as child demographics, general health status, previous psychiatric admissions and treatments, family and age relationships, school status and other school information are structured and not considered as a starting point. The second part of the diagnostic screening includes screening questions and an assessment report documenting disease-specific psychiatric symptoms. If the screening is positive, an additional list of symptoms is requested to further narrow down the psychopathology. In interviews, the symptom structure is graded as "unavailable", "subconscious" and "threshold". The subconscious level of acquisition is not sufficient to detect errors, but is a pool for further investigation of specific errors. The parents and children in the Affective Disorders and Schizophrenia Interview Schedule for School-Age Children Now and Lifespan Version (K-SADS-PL) expanded the knowledge gained through interviews and assessments to everything they eventually saw (mother, father, child, school, etc.). With adolescents, parents are the first to be interviewed. When working with young people, they are spoken to first. The clinician uses his/her own clinical perspective to separate information from other sources. Psychotic disorders, mood disorders, anxiety disorders, disruptive behavioral disorders, substance abuse, externalizing disorders, tic disorders and eating disorders are assessed with the K-SADS-PL. The third part is a general rating scale used to determine the level of functioning of the child or young person at the time of assessment (Kaufman et al., 1997; Gökler et al., 2004).

2.1.3. DSM-5 Based Disruptive Behavior Disorders Symptom Screening Scale (DBDSS)

Developed in 1994 by Prof. Dr. Atilla Turgay, the validity and reliability of the scale was investigated by Prof. Dr. Eyüp Sabri Ercan and colleagues in 2001. The scales are completed by the child's parents or teachers and allow the child to be rated for attention deficit hyperactivity disorder, oppositional defiant disorder and conduct disorder. Nine attention deficit questions (1-9). The items include 9 items related to hyperactivity/impulsivity (items 10-18), 8 items related to oppositional defiant disorder (items 19-26) and 15 items related to conduct disorder (items 27-41) for a total of 41 items. The person filling out the form is asked to mark 0, 1, 2 or 3 of the items describing each symptom. Each item is scored as None = 0, Less = 1, A lot = 2, Very much = 3. In order to talk about attention deficit, at least 6 of the 9 items associated with this symptom must be 2 or 3. The presence of oppositional defiant disorder (ODD)

requires a score of 2 or 3 on at least 4 of the 8 items, and a diagnosis of conduct disorder (CD) requires a score of 2 or 3 on at least 3 of the 15 items. The analyses performed on the subscales of the DSM 5 Based Disruptive Behavior Disorder Screening and Rating Scale were found to be reliable and valid. Cronbach's alpha coefficients for the subscales are Attention Deficit 0.88, Hyperactivity 0.95, Oppositional Defiant Disorder 0.89, Conduct Disorder 0.85 (Turgay et al., 1997; Ercan et al., 2014).

2.1.4. Depression Scale for Children (DSC)

In 1981, Kovacs developed the Children's Depression Inventory (CDI), which was developed to measure the severity of depression in children and adolescents, revised by Oy in 1991, validity and reliability studies were conducted and translated into Turkish. The Child Depression Inventory is reported to be an excellent scale for determining the severity of depression. It is a self-assessment scale that can be applied to children aged 6-17 years. The scale is read or completed by the child. The application will take approximately 25-30 minutes. Out of 27 points, there are three options for each item. Children are asked to choose the most appropriate statements from the last two weeks. For example; 1. Sometimes I feel sad. 2. I am often sad. 3. I am always sad. Each item is worth 0, 1 or 2 points depending on the severity of the symptoms. Opposite items on the scale are reverse scored. These items are 2,5,7,8,10,11,11,13,15,16,18,21,24,25. The score is calculated in such a way that questions marked with 0 are counted as 2,2 points. The maximum score that can be obtained from the scale is 54. The higher the score, the more severe the depression. A pathologic cut-off score of 19 is recommended (9, 10). Oy reported the test-retest reliability of the Depression Scale in Children as 0.70 and the internal consistency as 0.80 (Kovacs, 1981; Oy, 1991).

2.1.5. State–Trait Anxiety Inventory (STAI)

Developed in 1970 by Spielberger and colleagues, it is a self-assessment scale. The scale has two sub-dimensions, the Trait Anxiety Scale and the State Anxiety Scale, each consisting of 20 items. The State Anxiety Scale determines the anxiety level of an individual at a specific time and situation, while the Trait Anxiety Scale determines the general anxiety level of the individual regardless of the situation. It is an easy-to-use, self-completion scale (Spielberger, 1970; Öner and Le Compte, 1985). Both scales can be used at the same time. In this case, the State Anxiety Scale should be completed first and then the Trait Anxiety Scale. The scale can be completed individually or as a group and takes approximately 20 minutes to answer without any time limit. The State Anxiety Inventory includes 1=none, 2=somewhat, 3=very much, 4=completely options according to the severity of the feelings, thoughts and behaviors expressed by the item. In the anxiety trait scale, you should choose the appropriate option from 1=never, 2=sometimes, 3=often, 4=almost always. Representations and even inverted representations should be considered when scoring. The evaluation of inversions converts 1 to 4, 4 to 1 and so on. Total scores on both scales range from 20 to 80. A high score indicates a high level of anxiety and a low score indicates a low level of anxiety. The State-Trait Inventory of Private Fear has two types

of statements. Direct statements express negative emotions and reverse statements express positive emotions. The inverse statements for the State Anxiety Inventory are 1, 2, 5, 8, 10, 11, 15, 16, 19 and 20. The inverse statements for the Trait Anxiety Inventory are items 1, 6, 7, 10, 13, 16 and 19. After determining the total scores of the direct and inverse statements separately, they are subtracted from the total score of the inverse statements. The total score assigned to the direct statement is taken. A predetermined constant value is added to this number. This constant value is 50 for the State Anxiety Inventory and 35 for the Trait Anxiety Inventory. The average score recorded in the application varies between 36 and 41. A score between 0-30 indicates low anxiety, 31-49 indicates moderate anxiety, and 50 and above indicates high anxiety (Caci et al., 2003).

An example of the data set is given in Figure 2.

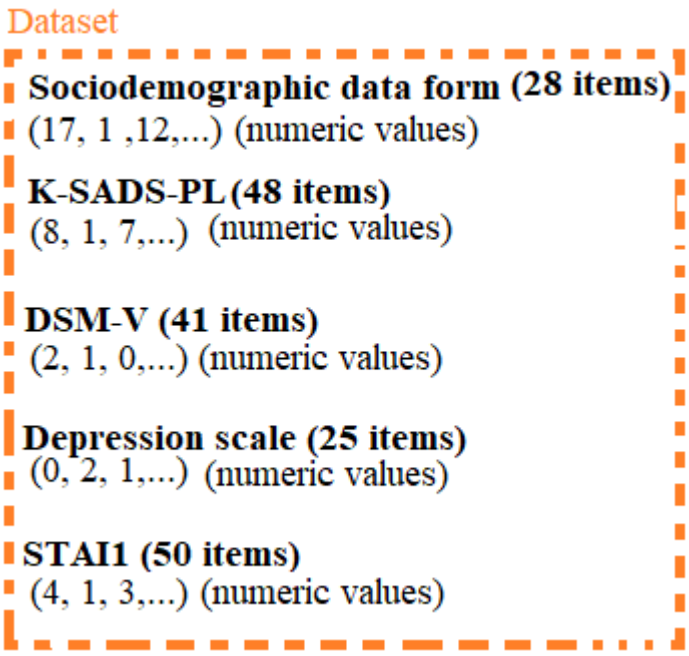


Figure 2. Dataset example

3. Method

In the study, a database was created from the graded scales applied to children and adolescents. This database was converted into images using the Scalogram method. In order to process Scalogram images with computer-aided software, the second step of the study is to extract various features from the images. In the last step, the features extracted from the images are classified using machine learning Methods . Python software and libraries were used for the computer-aided applications throughout the study.

3.1.1. Scalogram

The scalogram is the absolute value of the continuous wavelet transform coefficients of a signal. The wavelet transform is a more powerful time-frequency transform than the traditional cosine and Fourier transforms (Li and Zhou, 2016). Morlet introduced the wavelet as a family of translations and dilations

from a single function called the mother wavelet. This new signal processing was developed more efficiently by Mallat, Meyer, Daubechies and Grossman and became a popular technique in biosignal analysis. Instead of analyzing Fourier transforms at a single scale (time or frequency), wavelet transforms are analyzed on a multiscale basis. A wavelet is a windowing method with different resolutions for regions. Wavelet decomposition maps a signal onto a time scale plane using a scale instead of frequency. This is the same as the time-frequency plane in the short-time Fourier transform (STFT), with each scale of the time-scale plane representing a specific frequency range of the time-frequency plane. A wavelet- a small waveform- is a localized wave for a limited time. Comparing wavelet with Fourier transform, Fourier analysis decomposes the signal into sinusoids of different frequencies, while wavelet decomposes the signal from a mother wavelet into shifted or scaled shapes (Sejdic et al., 2008; Salles and Ribeiro, 2023).

As can be seen in Equation 1, the continuous wavelet transform (CWT) for signal f(t) is defined as the integration of f(t) with shapes shifted or scaled from a mother wavelet ψa, b(t).

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

$$a \in R^{+} - \{0\}, B \in R$$

In other words, as seen in Equation 2, the CWT is the sum of the signal multiplied by the shifted and scaled shapes from a mother wavelet ψ.

$$CWT(scale, position) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) * \psi(\text{scale}, \text{posisiton}, \text{t}) dt \quad (2)$$

The original fundamental wavelet ψ(t) is called the mother wavelet and its variations ψa,b(t) are called daughter wavelets. The daughter wavelets are shifted or scaled shapes from a mother wavelet. 'a' is the scale factor to scale the ψ(t) function, while 'b' is a shift factor to translate the ψ(t) function. The result of the CWT is a matrix filled with wavelet coefficients fitted according to scale and position. Figure 3 shows scalogram images from graded scales administered to adolescents with different psychiatric illnesses. A 160x192 matrix is created from our input data set. Here, the number of rows comes from the number of 160 patients and the number of 192 columns comes from the total number of items of 5 different scales. With the applied scalogram algorithm, 224x224 images are obtained.

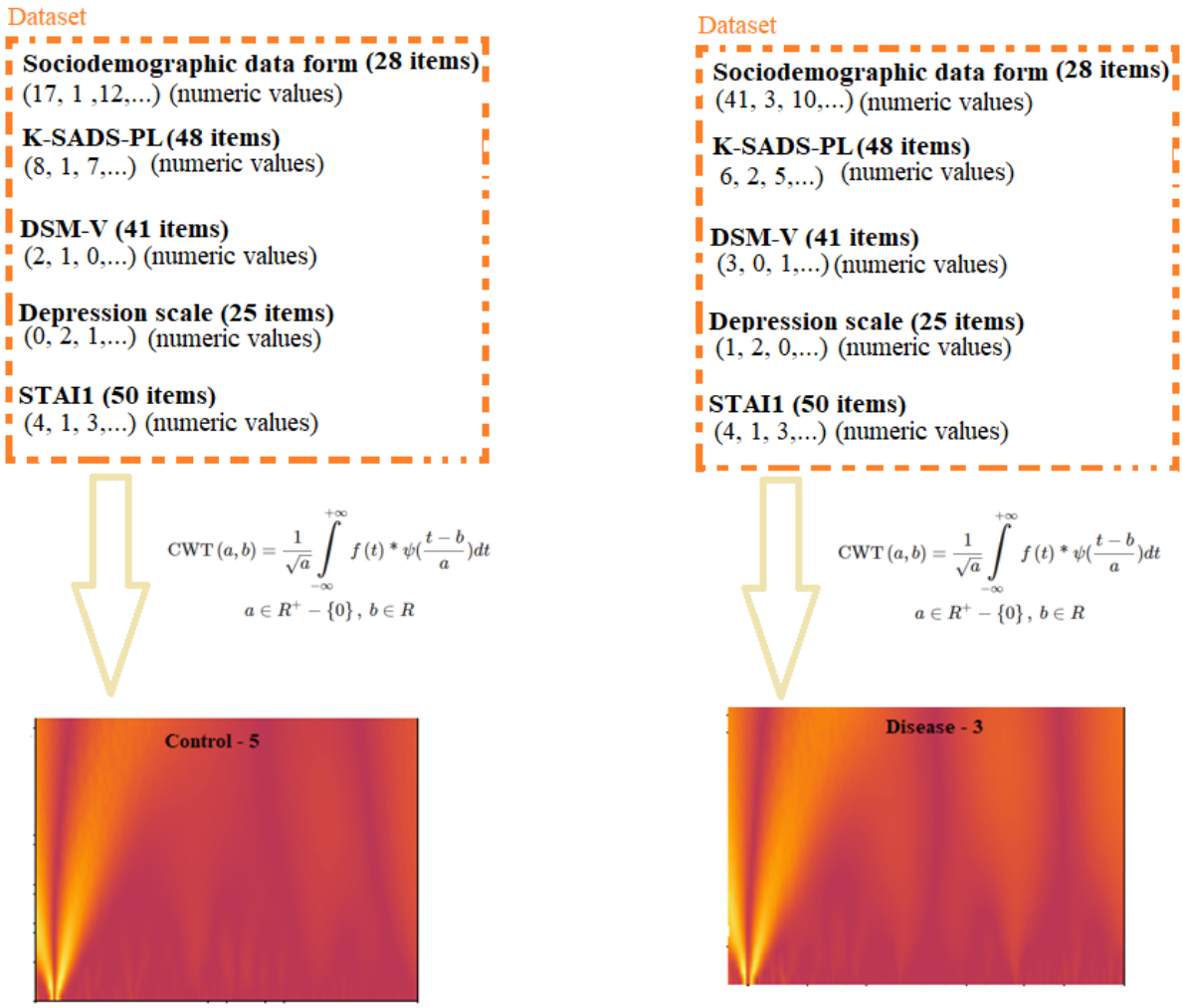


Figure 3. Scalogram images obtained from the dataset

Scalogram images obtained from signals cannot be processed in machine learning methods in this state. Machine learning methods work by extracting various features from images. Although there are different feature extraction methods in the literature, some of them have proven themselves since they are now being studied on many different images and give high performance results. One of them is the Sobel Filter, and this method was used in our study to extract features from images. The features extracted with the filter are automatically classified in Support Vector Machines and Random Forest machine learning methods, which have proven themselves in different datasets and are widely used in the literature.

3.2. Sobel Filter

In computer vision and digital image processing, the Sobel operator is a popular edge detection algorithm used to identify and highlight boundaries in an image. The Sobel operator performs a 2D spatial gradient operation on the image, primarily providing high spatial frequency fields corresponding to edges (Tian et al., 2021).

Sobel filter was applied to the scalogram images obtained in our study. As a result of applying Sobel filter to the 224x224 size images obtained with scalogram, 224x224 size processed images were obtained.

Edge detection is critical in many applications such as object detection and recognition, scene understanding and feature extraction. By understanding where an object begins and ends, computers can more efficiently identify and categorize it (Zhang Jin-Yu et al., 2009).

Essentially, the Sobel operator is a mechanism that predicts changes in the intensity levels of an image. It is like a tool that helps us see where colors in an image change suddenly or slightly, implying edges or boundaries in the image.

The Sobel filter uses two 3×3 kernels convolved with the original image- one for horizontal changes and one for vertical changes- to approximate the derivatives. If we define A as the source image and Gx and Gy as the two images containing the horizontal and vertical derivative approximations at each point, respectively, the calculations look like Equation 3. Here '*' stands for the convolution process of 2D signal processing.

$$G_x = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * A \; and \; G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \tag{3}$$

Since the Sobel kernels can be decomposed as the product of an average and a differentiation kernel, they compute the gradient with smoothing as seen in Equation 4.

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} * ([+1 \quad 0 \quad -1] * A) \; and \; G_y = \begin{bmatrix} +1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} * ([1 \quad 2 \quad 1] * A) \tag{4}$$

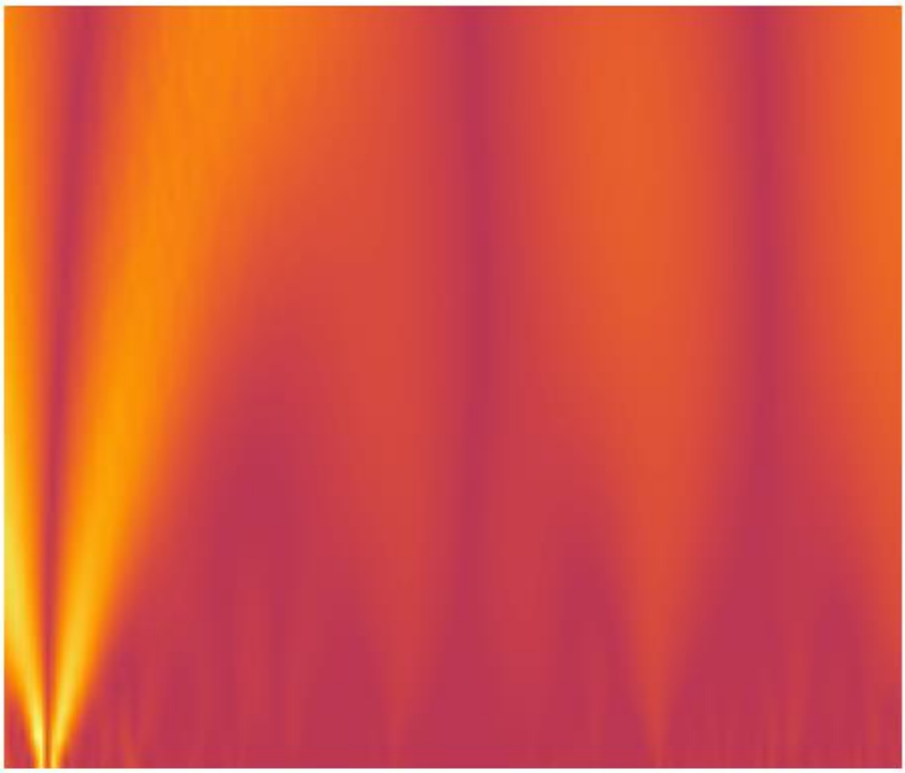
Here the x-coordinate is defined as increasing in the "right" direction and the y-coordinate is defined as increasing in the "down" direction. At each point in the image, the resulting gradient approximations can be combined as in Equation 5 to give the gradient magnitude.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \tag{5}$$

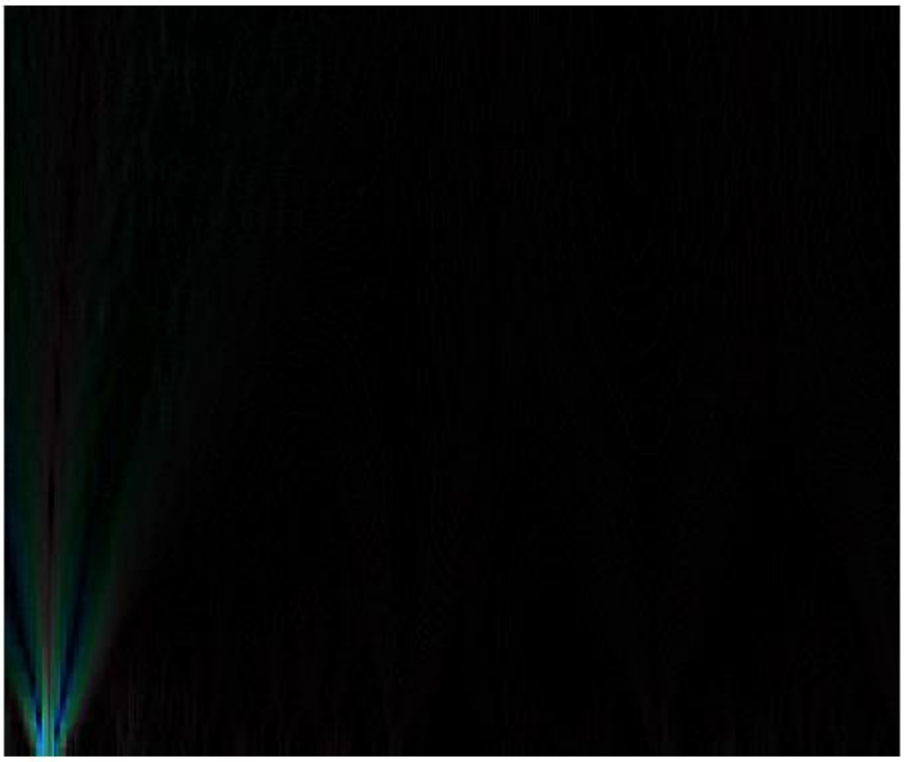
Using this information, the direction of the gradient Θ can also be calculated using the formula in Equation 6. It is 0 for a vertical edge that is lighter on the right-hand side in the equation.

$$\Theta = atan2(G_y, G_x) \tag{6}$$

The resulting images were classified using proven feature extraction (Sobel) and classification methods that are frequently used in the literature. Figure 4 shows the scalogram image of one of the data in the dataset.



Skalogram Image



Sobel Filtered Image

Figure 4. Sobel Filter image obtained from Scalogram images

3.3. Random Forest

Random Forest is a supervised learning algorithm. As the name suggests, it creates a forest and does so in a somewhat randomized way. The "forest" it builds is a collection of decision trees, often trained by "bagging". The general idea of bagging is that a combination of learning models increases the overall result (Sun et al., 2024).

In simple words: A random forest generates multiple decision trees and combines them to obtain a more accurate and stable prediction.

A big advantage of random forest is that it can be used for both classification and regression problems, which make up the majority of existing machine learning systems. Figure 5 shows an architectural example of a Random Forest.

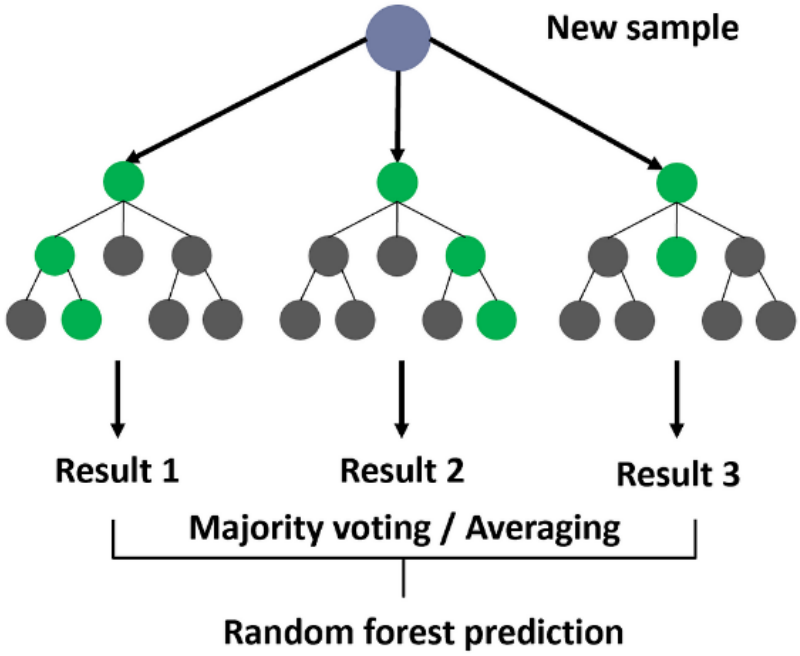


Figure 5. Random forest.

Random Forest has approximately the same hyperparameters as a decision tree or a bagging classifier. One does not have to combine the decision tree with a bagging classifier and can easily use only the Random Forest classifier. In this method, regression tasks can also be taken care of using the Random Forest regressor. Random Forest adds additional randomness to the model when growing trees. Instead of looking for the most important feature when partitioning a node, it looks for the best feature among a random subset of features. This results in a wide variety, often resulting in a better model. In a Random Forest, only a random subset of features is considered by the algorithm for splitting a node. It can even make trees more randomized by using random thresholds for each feature, instead of searching for the best possible thresholds (like a normal decision tree) (Zhao et al., 2024).

3.4. Support Vector Machine

The Support Vector Machine (SVM) is a supervised machine learning algorithm used for both classification and regression. It is best suited for classification, although we also call it regression problems. The main goal of the SVM algorithm is to find the optimal hyperplane in an N-dimensional space that can separate data points of different classes in the feature space. The hyperplane works so that the margin between the closest points of different classes is as maximum as possible. The size of the hyperplane depends on the number of features. If the number of input features is two, the hyperplane is just a line. If the number of input features is three, the hyperplane becomes a 2-dimensional plane. When the number of features exceeds three, a complex structure will be formed (Yin et al., 2023).

SVM Assume two independent variables x1, x2 and a dependent variable which is either a blue circle or a red circle as shown in Figure 6 (a). The hyperplane that separates the data points or makes a classification between the red and blue circles is a line and it can be seen that there is more than one line considering only two input features x1, x2. The best hyperplanes to represent the best separation or margin between the two classes are in Figure 6(b). Therefore, it is necessary to select the hyperplane whose distance to the nearest data point on each side is maximized. If such a hyperplane exists, it is known as the maximum margin hyperplane/hard margin. So in Figure 6(b) above, select L2. Here there is a blue ball on the border of the red ball. The blue ball on the border of the red balls is the outlier of the blue balls. The SVM algorithm has the ability to ignore the outlier and finds the best hyperplane that maximizes the margin. SVM is robust to outliers. So, what SVM does in such data points is to find the maximum margin, as in the previous data sets, and add a penalty every time a point crosses the margin. So the margins in such cases are called soft margins. When there is a soft margin in the dataset, the SVM tries to minimize (1/margin+∧(∑penalty)). Hinge Loss is a commonly used penalty. If there is no violation, there is no Hinge Loss; if there is a violation, there is Hinge Loss proportional to the violation distance (Alfaleh et al., 2023). SVM solves this by creating a new variable using a kernel as shown in Figure 6(c). A point on the line is called xi and a new variable yi is created as a function of distance from the origin o. In this case, the new variable y is created as a function of distance from the origin. A nonlinear function that creates a new variable is called a kernel and the structure shown in Figure 6(d) is obtained.

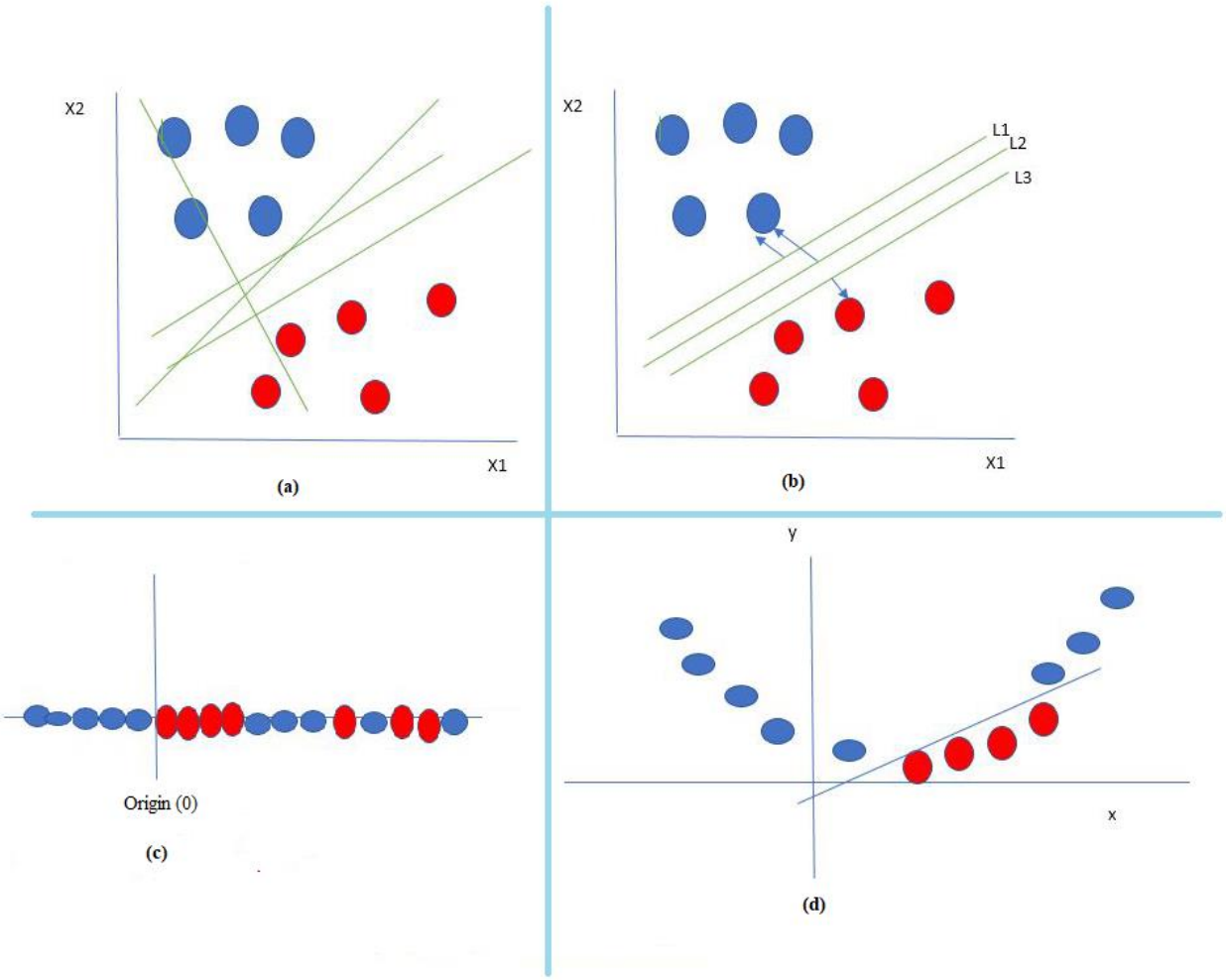


Figure 6. Support vector machine

4. Results and Discussion

The classification success of the unprocessed 1D data and the scalogram images created by processing the data are given in Table 1. As can be seen in Table 1, higher classification success was achieved in the scalogram images obtained by processing the data. In addition, the Random Forest method achieved higher success in Scalogram and unprocessed data.

Table 1. Success comparison of scalogram image and raw data sets

	Classification success with 1D raw data set	**Classification success with 2D Scalogram images**
Support Vector Machines	%75	%88
Random Forest	%86	%91

The filtered and feature extracted images are classified using Support Vector Machines and Random Forest methods. Machine learning based automatic classification results are interpreted with Confusion Matrix and Receive Operator Curve (ROC) curves. Thanks to these two methods, the classification results can be analyzed in detail.

In particular, the Confusion Matrix provides the opportunity to see the correct and incorrect label-based classification. Figure 7 shows the Confusion Matrix obtained with the Support Vector Machines method and Figure 8 shows the Confusion Matrix obtained with the Random forest method. There are 32 data without any training and 4 of them are calculated in different classes. Support Vector Machines performed up to 88% correct classification.

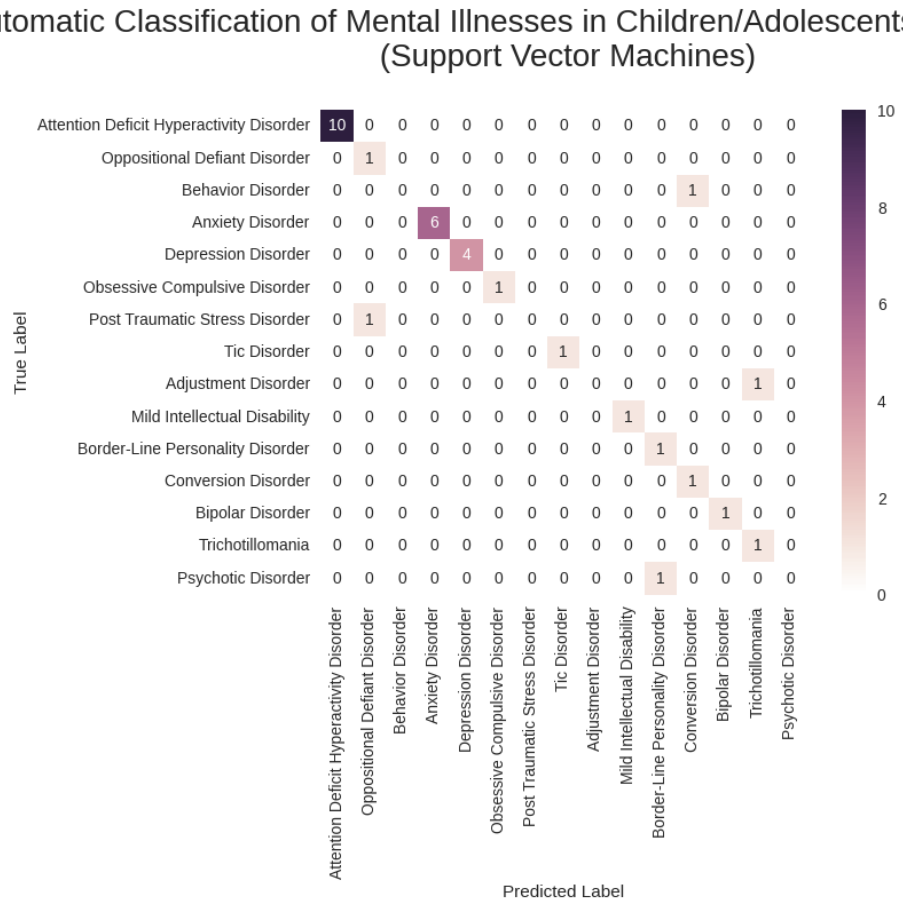


Figure 7. Support vector machines confusion matrix.

The Random Forest method achieved high classification success by misclassifying only 3 out of 32 test images. The obtained classification success was 91%.

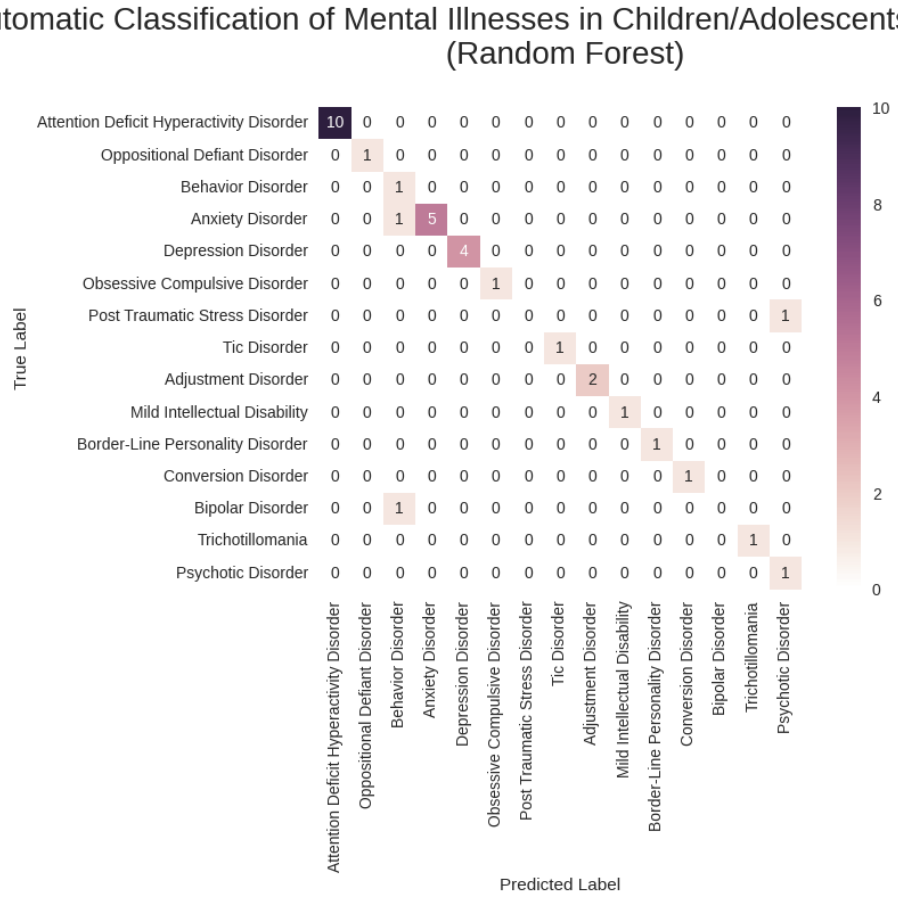


Figure 8. Random forest confusion matrix

ROC curves were also obtained from the results of the automatic classification software used in the study. Figure 9 shows the ROC curve of Random Forest methods. Both graphs were obtained from the training data set of the study. When evaluated on a disease class basis, both methods achieved high classification success. There is also a balanced distribution of success. If there were significant differences between the training on a class basis, outlier values would have been removed from the data set using different data preprocessing methods. Thus, a more accurate result would have been obtained on data that was not subjected to any training. When the two methods are evaluated among themselves, it is seen that they draw close ROC curves. Considering that both methods are frequently used in the literature and have proven themselves in the field of Medicine, it is possible to say that they are ideal methods for our study. On the other hand, we have obtained results that are a reference for the use of these methods for future studies.

The results obtained encourage us to work with data obtained from more and different locations in the future. Thus, with more data, we can perform machine training similar to the years of training of an expert physician. On the other hand, by including adolescents from different locations, we will be able to make a general evaluation as well as a comparison between regions. In all these respects, the ROC curves obtained by both methods in training and the confusion matrices obtained in the classification of

the test data proved that the study was concluded efficiently and can be a resource for experts who will work in the field.

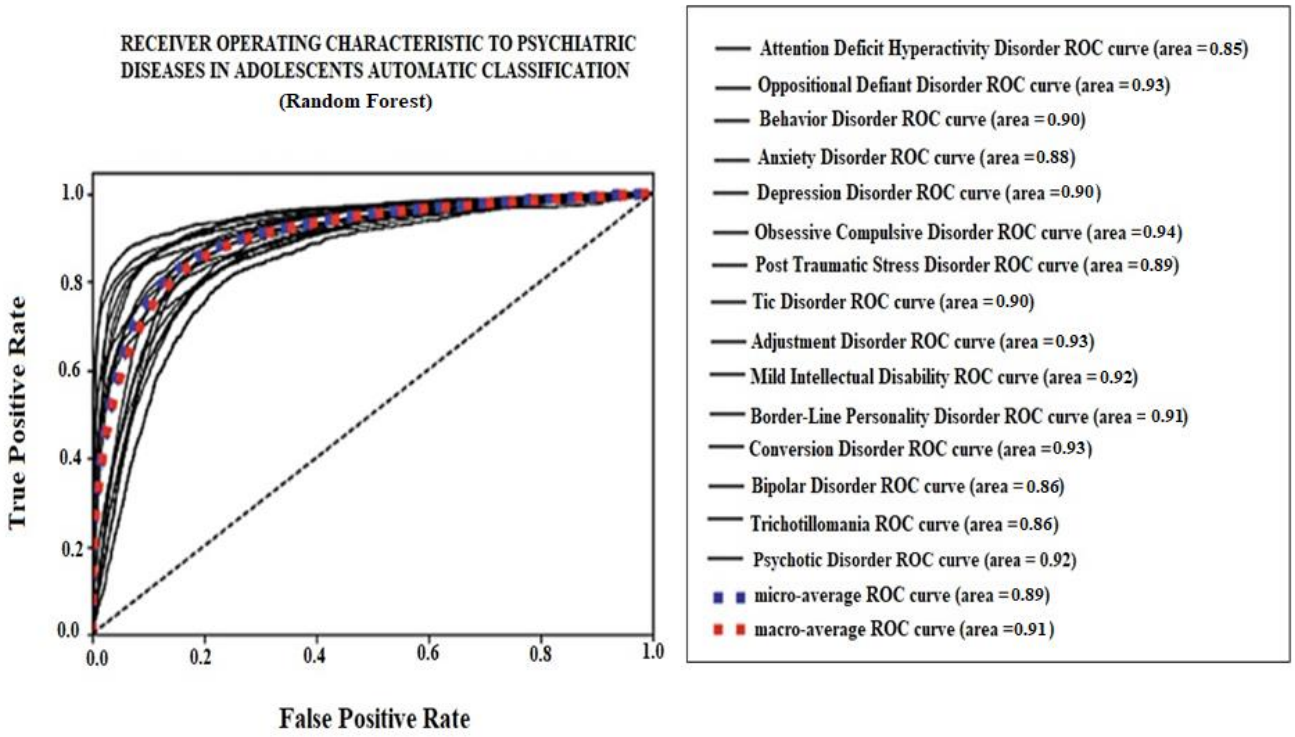


Figure 9. Random forest ROC curve.

5. Conclusion

Psychiatric illnesses in children and adolescents affect the individual, the family and society. Timely and accurate diagnosis is vital for psychiatric illnesses. Ensuring that children and adolescents who are diagnosed correctly and quickly enter the rapid treatment process is very important in terms of preventing negative consequences that will affect the family and society. Since the main thing is correct diagnosis and treatment, these processes should be free from errors caused by specialist physicians.

Machine learning, which is a sub-branch of artificial intelligence, is used in a wide range of areas, from autonomous vehicles, production processes and quality control to the creation of expert decision support systems using various blood values and biomedical images. Studies have even gone so far that artificial intelligence robots that make decisions and assist the doctor in surgery are now being studied. Although the future destination of artificial intelligence is often discussed and feared, it is obvious that it will increase the quality of life of human beings with the right use and protocols that will be accepted by everyone.

When the literature is examined, it is still a new field of study to study the diagnosis/treatment processes of psychiatric diseases using various artificial intelligence software. However, when the literature is examined, the success of artificial intelligence on biomedical images has caught up or even surpassed the expert. In our study, an artificial intelligence study that can support the expert in obtaining fast and accurate results in the diagnosis of psychiatric diseases that negatively affect children and adolescents,

which are the future of every country and the greatest resource. While conducting this study, a database was created from the answers given to the graded scales used in diagnosis. This database was not processed directly with machine learning methods, but was converted into Scalogram images from which more detailed features could be extracted.

Conflict of Interest Statement

The authors of the article declares that no conflict of interest.

Authors' Contribution Declaration

Sinan ALTUN: %70; Hatice ALTUN: %30

References

Agnafors S., Torgerson J., Rusner M., Kjellström AN. Injuries in children and adolescents with psychiatric disorders. BMC Public Health 2020; 20(1): 1-10.

Akcan PE., Tekgül N., Karademirci E., Öngel K. Ergenlik dönemi fiziksel büyüme, psikolojik ve sosyal gelişim süreci. Turkish Family Physician 2012; 4: 10-16.

Alfaleh A., Khedher NB., Eldin SM., Alturki M., Elbadawi I., Kumar R. Predicting thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluid by employment of support vector machines: A review. Energy Reports 2023; 10: 1259–1267.

Bansal V., Goyal S., Srivastava K. Study of prevalence of depression in adolescent students of a public school. Industrial Psychiatry Journal 2009; 18(1): 43-46.

Brazier DK., Venning HE. Conversion disorders in adolescents: A practical approach to rehabilitation. Rheumatology 1997; 36(5): 594–598.

Buckley V., Young AH., Smith P. Child and adolescent anxiety as a risk factor for bipolar disorder: A systematic review of longitudinal studies. Bipolar Disorders 2023; 25(4): 278–288.

Caci H., Baylé FJ., Dossios C., Robert P., Boyer P. The Spielberger trait anxiety inventory measures more than anxiety. European Psychiatry; 2003 18(8): 394–400.

Coskun F., Akca OF., Bilgic A., Sharp C. The validity and reliability of borderline personality features scale for children-short form in Turkish adolescents. Turkish Journal of Psychiatry; 2022 33(1): 44-52.

Çuhadaroğlu Çetin F., Coşkun A., İşeri E. Çocuk ve ergen psikiyatrisi temel kitabı. 1. Baskı. Ankara: Hekimler Yayın Birliği 2008; 293-312.

Davison J., Maguire S., McLaughlin M., Simms V. Involving adolescents with intellectual disability in the adaptation of self-reported subjective well-being measures: Participatory research and methodological considerations. Journal of Intellectual Disability Research 2022; 66(7): 628–641.

De Cos Milas A., Garcia Moreno M., Gómez Macías V., Chinchurreta de Lora NE., Rodríguez Criado N., Sánchez Sánchez B. Conversion disorder in adolescents: A review and case report. European Psychiatry 2016; 33(1): 349-350.

Demeter CA., Townsend LD., Wilson M., Findling RL. Current research in child and adolescent bipolar disorder. Dialogues in Clinical Neuroscience 2008; 10(2): 215–228.

Ercan E., İpci M., İnci SB., Ercan E., Ercan ES. The effects of attention deficit hyperactivity disorder on clothing selection and habits among Turkish University students. ADHD Attention Deficit and Hyperactivity Disorders 2014; 7(3): 191–198.

Ferrer L., Kirchner T. How do adolescents with adjustment disorder cope with stressful situations relationship with suicidal risk. Revista de Psiquiatría y Salud Mental 2020; 13(2): 63–72.

Geller B., Luby J. Child and adolescent bipolar disorder: A review of the past 10 Years. Journal of the American Academy of Child; Adolescent Psychiatry 1997; 36(9): 1168–1176.

Ghosh A., Ray A., Basu A. Oppositional defiant disorder: Current insight. Psychology Research and Behavior Management 2017; 10: 353–367.

Gizli ÇÖ., Bedel A., Önder A., Sürer A., Tuhan H., Parlak M. Psychiatric disorders and peer-victimization in children and adolescents with growth hormone deficiency. Clinical Pediatrics 2022; 61(10): 684–691.

Gökler B., Ünal MF., Özsungur, B., Çengel Kültür SE., Akdemir D., Taner Y. Okul çağı çocukları için duygulanım bozuklukları ve şizofreni görüşme çizelgesi şimdi ve yaşam boyu şekli Türkçe uyarlamasının geçerlik ve güvenirliği. Çocuk ve Gençlik Ruh Sağlığı Dergisi 2004; 11: 109-116.

Grant J. Trichotillomania (hair pulling disorder). Indian Journal of Psychiatry 2019; 61(7): 136-139.

Guilé JM., Boissel L., Alaux-Cantin S., Garny de La Rivière S. Borderline personality disorder in adolescents: Prevalence, diagnosis, and treatment strategies. Adolescent Health, Medicine and Therapeutics 2018; 9: 199–210.

Gupta A., Mongia M., Garg A. A descriptive study of behavioral problems in schoolgoing children. Industrial Psychiatry Journal 2017; 26(1): 91-94.

Kaufman J., Birmaher B., Brent D., Rao U., Flynn C., Moreci P., Williamson D., Ryan N. Schedule for affective disorders and schizophrenia for school-age children-present and Lifetime version (K-SADS-PL): Initial reliability and Validity Data. Journal of the American Academy of Child. Adolescent Psychiatry 1997; 36(7): 980–988.

Kovacs M. Rating scales to assess depression in school-aged children. Acta Paedopsychiatrica: International Journal of Child & Adolescent Psychiatry 1981; 46(5-6): 305–315.

Li T., Zhou M. ECG classification using wavelet packet entropy and random forests. Entropy 2016; 18(8): 285.

Nazeer A., Latif F., Mondal A., Azeem MW., Greydanus DE. Obsessive-compulsive disorder in children and adolescents: Epidemiology, diagnosis and management. Translational Pediatrics 2020; 9(1): 76-93.

Oy B. Cocuklar icin depresyon ölçegi geçerlik ve güvenirlik çalışması. Turk Psikiyatri Dergisi 1991; 2: 137-140.

Öner N., LeCompte WA. Durumluk-sürekli kaygı envanteri el kitabı: Boğaziçi Üniversitesi Yayınları 1985.

Pehlivantürk B., Unal F. Conversion disorder in children and adolescents. Journal of Psychosomatic Research 2002; 52(4): 187–191.

Ringbom I., Suvisaari J., Kääriälä A., Sourander A., Gissler M., Kelleher I., Gyllenberg D. Psychotic disorders in adolescence and later long-term exclusion from education and Employment. Schizophrenia Bulletin 2022; 49(1): 90–98.

Salles RS., Ribeiro PF. The use of deep learning and 2-D wavelet scalograms for power quality disturbances classification. Electric Power Systems Research 2023; 214(1): 1-11.

Sejdic E., Djurovic I., Stankovic LJ. Quantitative performance analysis of Scalogram as instantaneous frequency estimator. IEEE Transactions on Signal Processing 2008; 56(8): 3837–3845.

Spielberger C. Manual for the state-trait anxiety inventory (Self-evaluation questionnare). Consulting Psychogyists Press 1970.

Stevens JR., Prince JB., Prager LM., Stern TA. Psychotic disorders in children and adolescents: a primer on contemporary evaluation and management. The primary Care Companion For CNS Disorders 2014; 16(2): 13:15.

Sun Z., Wang G., Li P., Wang H., Zhang M., Liang, X. An improved random forest based on the classification accuracy and correlation measurement of decision trees. Expert Systems with Applications 2024; 237(PB): 1-19.

Tian R., Sun G., Liu X., Zheng B. Sobel edge detection based on weighted nuclear norm minimization image denoising. Electronics 2021; 10(6): 1-14.

Tschan T., Peter-Ruf C., Schmid M., In-Albon T. Temperament and character traits in female adolescents with nonsuicidal self-injury disorder with and without comorbid borderline personality disorder. Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health 2017; 11(1): 130-134.

Turgay A. Turgay's DSM 5 based ADHD and disruptive behaviour disorders screening scale. Integrative Therapy Institute Publication, Toronto-Ontario 1997.

Ueda K., Black KJ. A comprehensive review of TIC disorders in children. Journal of Clinical Medicine 2021; 10(11): 1-34.

Yin W., Xia H., Huang X., Zhang J., Miyombo ME. A fault diagnosis method for nuclear power plant rotating machinery based on adaptive deep feature extraction and multiple support vector machines. Progress in Nuclear Energy 2023; 164: 1-10.

Zhang Jin-Yu., Chen Yan., Huang Xian-Xiang. Edge detection of images based on improved Sobel operator and genetic algorithms. 2009 International Conference on Image Analysis and Signal Processing 2009: 31-35.

Zhao F., Hao J., Zhang H., Yu X., Yan Z., Wu F. Quality recognition method of oyster based on U-net and random Forest. Journal of Food Composition and Analysis 2024; 125: 105746.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1598-1612, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1598-1612, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Ölmez Çiçek Ekstresi Kullanılarak Gümüş Nanoparçacıkların Yeşil Sentezi, Karakterizasyonu ve Antioksidan Özellikleri

Nilay BEĞİÇ[1,2*]

[1]Biruni University, Faculty of Pharmacy, Department of Analytical Chemistry, 34015, Istanbul, Türkiye
[2]Biruni University Research Center (B@MER), Biruni University, 34015, Istanbul, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-3941-3887
*Correspondence author: nbegic@biruni.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 28.12.2024
Kabul tarihi:27.03.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Gümüş nanoparçacıklar
Ölmez çiçek ekstresi
Yeşil sentez
Sürdürülebilirlik
Yeşil nanoteknoloji

ÖZ

Gümüş nanoparçacıklar, benzersiz kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde ilaç taşıma sistemleri, biyomedikal uygulamalar, kanser tedavileri, kozmetikler ve gıdalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Gümüş nanoparçacıklar fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç farklı şekilde sentezlenebilir. Son yıllarda araştırmacılar, çevre dostu, güvenilir ve biyouyumlu olması nedeniyle yeşil senteze yönelmiştir. Bu bağlamda, bu çalışmada doğal bir fitokimyasal kaynak olan *Helichrysum* sp. ekstresi kullanılarak gümüş nanoparçacıkların sentezi için yeni bir yöntem önerilmiştir. Nanoparçacık oluşumu üzerinde gümüş iyon konsantrasyonunun, *Helichrysum* sp. ekstresi konsantrasyonunun ve reaksiyon süresinin etkileri araştırılmış ve optimum reaksiyon koşulları belirlenmiştir. *Helichrysum* sp. ekstresi varlığında sentezlenen gümüş nanoparçacıklar, ultraviyole (UV) spektrofotometri, dinamik ışık saçılması (DLS), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), wet-STEM (taramalı geçirimli elektron mikroskobu), and termogravimetrik analiz (TGA) kullanılarak karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonuçlarına göre, ortalama 54 nm boyuta sahip homojen ve küresel nanoparçacıklar başarıyla sentezlendi. Sentezlenen gümüş nanoparçacıkların antioksidan kapasiteleri/aktiviteleri Bakır İndirgeyici Antioksidan Kapasite (CUPRAC) ve DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) yöntemleri kullanılarak belirlendi. Önerilen yeşil nanoteknoloji esaslı sentez yöntemi yeni, basit, hızlı, düşük maliyetli, sürdürülebilir ve çevre dostudur.

Green Synthesis, Characterization, and Antioxidant Properties of Silver Nanoparticles Using *Helichrysum* sp. Extract

Research Article

Article History:
Received: 28.12.2024
Accepted: 27.03.2025
Published online: 16.09.2025

Keywords:
Silver nanoparticles
Helichrysum sp. extract
Green synthesis
Sustainability
Green nanotechnology

ABSTRACT

Silver nanoparticles are used in many fields such as drug delivery systems, biomedical applications, cancer treatments, cosmetics and food thanks to their uniqe chemical and physical properties. Silver nanoparticles can be synthesized in 3 different ways: physical, chemical and biological. In recent years, researchers have turned to green synthesis because it is environmentally friendly, reliable and biocompatible. In this context, a new method for the synthesis of silver nanoparticles was proposed in this study using *Helichrysum* sp. extract, a natural phytochemical source. The effects of silver ion concentration, *Helichrysum* sp. extract concentration and reaction time on nanoparticle formation were investigated, and optimum reaction conditions were determined. Silver nanoparticles synthesized in the presence of *Helichrysum* sp. extract were characterized using ultraviole (UV) spectrophotometry, the dynamic light scattering (DLS) analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), dynamic light scattering (DLS), wet-STEM (scanning transmission electron microscope), and thermogravimetric

analysis (TGA). According to characterization results, homogeneous and spherical nanoparticles with an average size of 54 nm were successfully synthesized. The antioxidant capacities/activities of the synthesized silver nanoparticles were determined using Cupric Reducing Antioxidant Capacity (CUPRAC) and DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) assays. The proposed green nanotechnology-based synthesis method is novel, simple, rapid, low-cost, sustainable, and eco-friendly.

To Cite: Beğiç N. Green Synthesis, Characterization, and Antioxidant Properties of Silver Nanoparticles using *Helichrysum* sp. Extract. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1598-1612.

1. Introduction

The genus *Helichrysum* Mill. is a member of the plant family Asteraceae and consists of about 600 species worldwide (Akaberi et al., 2019). Plants of this genus exhibit various biological properties, including antimicrobial, antiallergic, antioxidant, anti-inflammatory, and healing effects for coughs, colds, and wounds. These biological activities are depend of compounds like flavonoids, α-pyrones, coumarins, and terpenoids, which are found in various parts of *Helichrysum* plants. *Helichrysum* species (sp.) are extraordinarily rich in phenolic compounds and flavonoids that plays an important role in defense mechanisms (Gouveia and Castilho, 2010). *Helichrysum* sp. has been used for centuries as flavoring spices in various foods, for cosmetic purposes and in folk remedies (Viegas et al., 2014).

Nanotechnology is recognized as one of the most important milestones of science in the last decade. Nanomaterials have applications in many fields including electronics, agriculture, pharmacy, and medicine. The increasing demand for nanomaterial applications has also created the need for new synthesis methods (Huston et al., 2021). Noble metal nanoparticles such as silver, gold and palladium are in the size range of 1-100 nm and have a high surface-to-volume ratio. These properties enable the use of noble metal nanoparticles for a wide variety of purposes (Apak et al., 2018). Silver nanoparticles are widely used in many fields such as medicine, pharmacy, cosmetics and food due to their unique chemical and physical properties (Gurunathan et al., 2015; Zhang et al., 2016; Bamal et al., 2021). Metal nanoparticles are synthesized by physical, chemical and biological methods. Due to the disadvantages of traditional synthesis methods such as being toxic, harmful to the environment and expensive, researchers have turned to greener methods and natural resources (Hutchison, 2008; Zhang et al., 2016). The synthesis of silver nanoparticles by biological reduction is environmentally harmless, rapid, simple and inexpensive (Gurunathan et al., 2009). In addition, silver nanoparticles produced by green synthesis have high yield and high stability (Gurunathan et al., 2015). Therefore, green chemistry is an important approach for the synthesis of silver nanoparticles.

The biogenic synthesis of nanoparticles is called green chemistry (Singh et al., 2018). Green synthesis requires harmless solvent/reagent consumption and the use of renewable natural resources (Singh et al., 2016). The green synthesis of nanoparticles can be realized using plant extracts or microorganisms. However, the use of plant sources is more preferred by researchers in terms of reaction time, process ease and simplicity (Khandel et al., 2018). Phytochemicals such as flavonoids, flavones, phenolic compounds, carbohydrates, vitamins in the composition of plant extracts enable the reduction of metal

ions to metal nanoparticles (Singh et al., 2018). *Helichrysum* sp. has phytochemicals such as flavonoids, phenolic acids, terpenes, chalcones, essential oils, and pyrones (Akaberi et al., 2019). In this context, *Helichrysum* sp. was selected as a bioreducing agent to synthesize safe and environmentally friendly silver nanoparticles in this study. The method enables the production of pure and safe nanoparticles by eliminating some of the drawbacks, such as the toxicity of strong chemical reductants and the accumulation of these harmful reductants on the nanoparticles during synthesis. In addition, this method replaces conventional solvents with distilled water, which is a safer and environmentally friendly alternative. It is also a simple and inexpensive method that researchers can easily reproduce in any laboratory. In this work, the effect of silver concentration, concentration of *Helichrysum* sp. extract and reaction time on the synthesis of silver nanoparticles was investigated. The synthesized silver nanoparticles were characterized by ultraviole (UV) spectrophotometer, the dynamic light scattering (DLS) analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and scanning transmission electron microscope (wet-STEM). The thermal stability of the synthesized silver nanoparticles was investigated by thermogravimetric analysis (TGA). Finally, the antioxidant properties of the synthesized nanoparticles were evaluated using the CUPRAC and DPPH assays. Thus, environmentally friendly, safe, and biocompatible silver nanoparticles were produced that can be used in many fields such as food, materials science, and health.

2. Material and Methods

2.1. Chemicals and Instruments

Silver nitrate ($AgNO_3$), copper (II) chloride dehydrate ($CuCl_2$), ammonium acetate (NH_4Ac): Merck (Darmstadt, Germany); neocuproine (2,9-dimethyl-1,10-phenanthroline) (Nc), DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), ethanol, methanol: Sigma-Aldrich (Steinheim, Germany). Dried *Helichrysum* sp. was provided by seller of the medicinal herbs.

Inesa L7 Double Beam UV–Vis spectrophotometer (Hinotek, China) was used for absorption measurements. Anton-Paar Litesizer 500 analyzer (Graz, Austria) was used for particle size distribution (DLS) analysis. HE-SNPs were imaged with the Thermo Scientific Quattro S (ThermoFisher Scientific, Waltham, MA, USA). Fourier transform infrared (FTIR) spectra of HE-SNPs were recorded via using a Shimadzu IRTracer100 (Kyoto, Japan) spectrometer. Telstar Cryodos freeze dryer (Terrassa, Spain) was used to dry silver nanoparticles and *Helichrysum* sp. extract for FTIR analysis. Thermogravimetric analysis (TGA) of HE-SNPs was carried out using a Netszch TG 209- F3 Tarsus testing device.

2.2. Preparation of Solutions

2.2.1. Preparation of Ag^+ solution

A stock solution of silver nitrate in distilled water was 10 mM. Silver nitrate solutions were diluted to different concentrations (1.0; 2.5; 5.0; and 7.5 mM) for the optimization study of the synthesis of silver nanoparticles.

2.2.2. Preparation of Helichrysum sp. extract (HE)

0.2 g of dried *Helichrysum* sp. was weighed into the beaker. 70 mL of boiled distilled water was added and incubated for 30 minutes at room temperature. It was filtered through filter paper into a 100 mL volumetric flask. The extract was made up to 100 mL with distilled water and cooled. To study the effect of the concentration of *Helichrysum* sp. extract on the production of silver nanoparticles, HE was diluted to different concentrations (1:2 diluted, 1:5 diluted, 1:10 diluted and 1:20 diluted).

2.3. Optimization Study for the Synthesis of Helichrysum sp. Extract Capped Silver Nanoparticles (HE-SNPs)

Effects of concentration of Ag^+ ion, concentration of *Helichrysum* sp. extract, and reaction time were investigated on the synthesis of silver nanoparticles using *Helichrysum* sp. extract. In order to observe the effect of Ag^+ ion concentration, various Ag^+ concentrations (1.0; 2.5; 5.0; 7.5; and 10.0 mM) were studied in the presence of *Helichrysum* sp. extract diluted 1:2 (v:v) for 60 min incubation at room temperature. Whereas, to observe the effect of the concentration of *Helichrysum* sp. extract, different dilutions of *Helichrysum* sp. extracts (1:2, 1:5, 1:10, and 1:20 (v:v)) were studied in the presence of 5.0 mM Ag^+ for 60 min incubation at room temperature. In order to observe the duration of the reaction, the mixture containing 5.0 mM Ag^+ and diluted 1:2 (v:v) *Helichrysum* sp. extract was incubated at room temperature for 60 minutes. Finally, to observe the effect of pH on the HE-SNPs formed with *Helichrysum* sp. extract, the mixtures containing 5.0 mM Ag^+ and diluted 1:2 (v:v) *Helichrysum* extract were incubated in the range pH 2.0–9.0 at room temperature for 40 minutes.

2.4. Synthesis of HE-SNPs

HE-SNPs were synthesized using *Helichrysum* sp. extract by green synthesis. *Helichrysum* sp. extract was used as a bioreducing and stabilizing reagent. According to the results of the optimization studies, 1 mL of 1:2 diluted *Helichrysum* sp. extract was added to 2 mL of 5.0 mM $AgNO_3$ for the synthesis of HE-SNPs. The mixture solution was kept at room temperature for 40 minutes and light-yellow nanoparticles were obtained.

2.5. Characterization of Synthesized HE-SNPs

In the optimization and characterization of HE-SNPs, absorption spectras of silver nanoparticle solutions synthesized in the presence of silver ions and Helichrysum sp. extract were obtained by L7 Dual Beam UV-Vis spectrophotometer. The particle size distribution of the synthesized HE-SNPs was determined by Anton-Paar Litesizer 500 analyzer. Synthesized HE-SNPs were imaged using wet-STEM. The chemical properties of HE-SNPs synthesized in the presence of the *Helichrysum* sp. extract were investigated by FTIR spectroscopy. Thermogravimetric analysis (TGA) of HE-SNPs was conducted.

2.6. Antioxidant Properties of Synthesized HE-SNPs

2.6.1. CUPRAC method

The total antioxidant capacity of HE-SNPs was determined by the CUPRAC method (Apak et al., 2004). In this method, CUPRAC reagent consists of 1 mL of 10 mM $CuCl_2$, 1 mL of 7.5 mM Nc, and 1 mL of 1.0 M NH_4Ac. 0.6 mL of HE-SNP solution and 0.5 mL distilled water were added to this reagent mixture. The absorbance of the nanoparticle solution was recorded at 450 nm against a reagent blank after 30 min. The TAC was expressed as a Trolox equivalent (mmol TR/g-dried sample (DS)) based on the standard curve of TR standard.

2.6.2. DPPH assay

The radical scavenging activity (RSA) of HE-SNPs on DPPH free radicals was determined using the DPPH assay (Sánchez-Moreno et al., 1998). In this method, 2 mL of HE-SNP solution was added to 2 mL of 0.2 mM DPPH solution in a test tube. The tubes were shaken, and kept in the dark for 30 min. The absorbance of HE-SNP solution at 515 nm was recorded against methanol.

The absorbance values were used to calculate the RSA of the HE-SNPs. It was calculated from the following Equation (1):

$$\Delta A = A_{DPPH} - (A_s - A_0) \quad (1)$$

where ΔA gives the corrected absorbance of the HE-SNPs, A_{DPPH} indicates the absorbance of DPPH in the absence of the HE-SNPs, A_s indicates the absorbance of the HE-SNPs with DPPH, A_0 indicates the absorbance of the HE-SNPs without DPPH.

2.7. Statistical Analysis

Mean values, their standard deviations and relative standard deviations were obtained using Excel software (Microsoft Office 365).

3. Results and Discussion

In the green synthesis of silver nanoparticles, the phenolic groups (Ar-OH) present in the *Helichrysum* sp. extract are oxidized to the corresponding quinones, while Ag^+ ions are reduced to Ag^0. Thus, light yellow HE-SNPs are produced, showing maximum plasmon absorption at 440 nm.

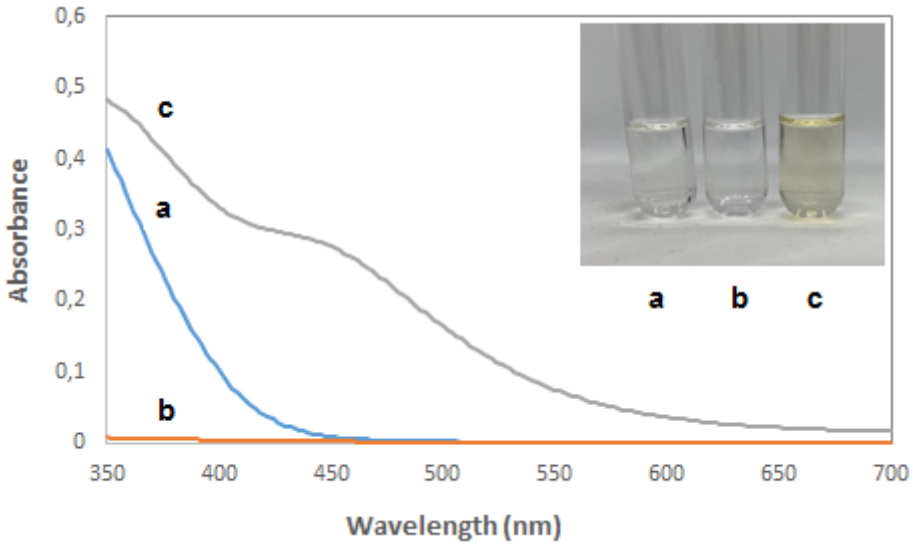


Figure 1. UV–Vis spectra of **a)** *Helichrysum* sp. extract (alone), **b)** $AgNO_3$ (alone), and **c)** HE-SNPs synthesized using *Helichrysum* sp. extract

Figure 1 shows the absorption spectra of HE-SNPs the synthesized using *Helichrysum* sp. extract, $AgNO_3$ alone, and *Helichrysum* sp. extract alone. Figure 1a is the absorption spectrum of *Helichrysum* sp. extract. Figure 1b is the absorption spectrum of $AgNO_3$ (2.5 mM) solution. Figure 1c shows the absorption spectrum of silver nanoparticles synthesized in the presence of *Helichrysum* sp. extract (1:2 diluted). The synthesized silver nanoparticles are light yellow and give maximum absorption at a wavelength of 440 nm. Silver nanoparticles have the surface plasmon resonance (SPR) band in the proximity of 420 nm in the visible region (Amendola et al. 2017). As seen in Figure 1a, and 1b, *Helichrysum* sp. extract (1:2 diluted) and $AgNO_3$ at 2.5 mM initial concentration did not give any absorption at 440 nm.

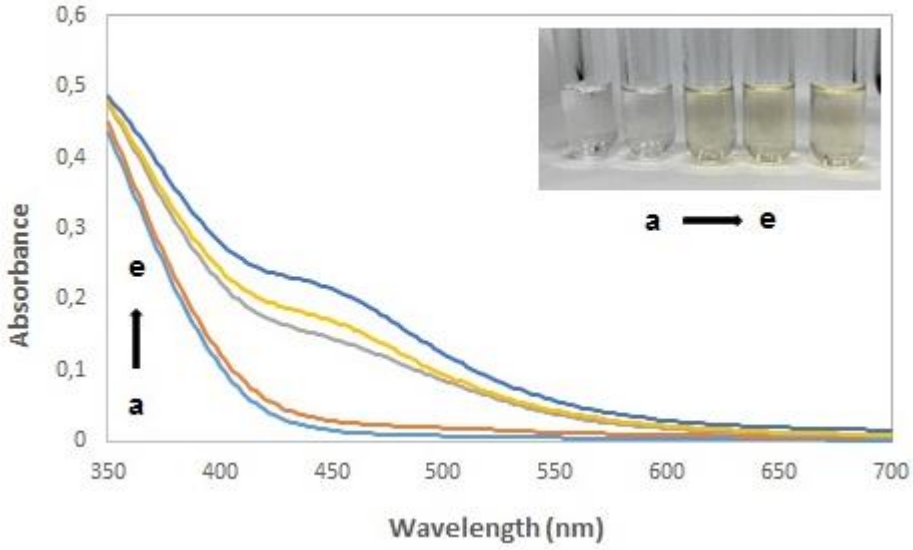


Figure 2. UV-Vis spectra of HE-SNPs with various concentrations of Ag^+ (initial concentration): **a)** 1.0 mM, **b)** 2.5 mM, **c)** 5.0 mM **d)** 7.5 mM, and **e)** 10.0 mM

Figure 2 gives the effect of Ag^+ ion concentration on silver nanoparticle production using *Helichrysum* sp. extract. The optimization study of concentration of Ag^+ ion was performed in the presence 1:2 (v:v) diluted *Helichrysum* sp. extract within the concentration range 1.0–10.0 mM of $AgNO_3$ for 60 min at room temperature. As shown in Figure 2a and 2b, no silver nanoparticle formation was observed in the presence of 1.0 mM and 2.5 mM $AgNO_3$ concentration. In the concentration range of 5.0-10.0 mM $AgNO_3$, silver nanoparticle formation with increasing yellow color was observed with increasing concentration. The light-yellow silver nanoparticles were obtained (Figure 2c-2e). Hence, the optimal concentration of $AgNO_3$ was determined to be 5.0 mM.

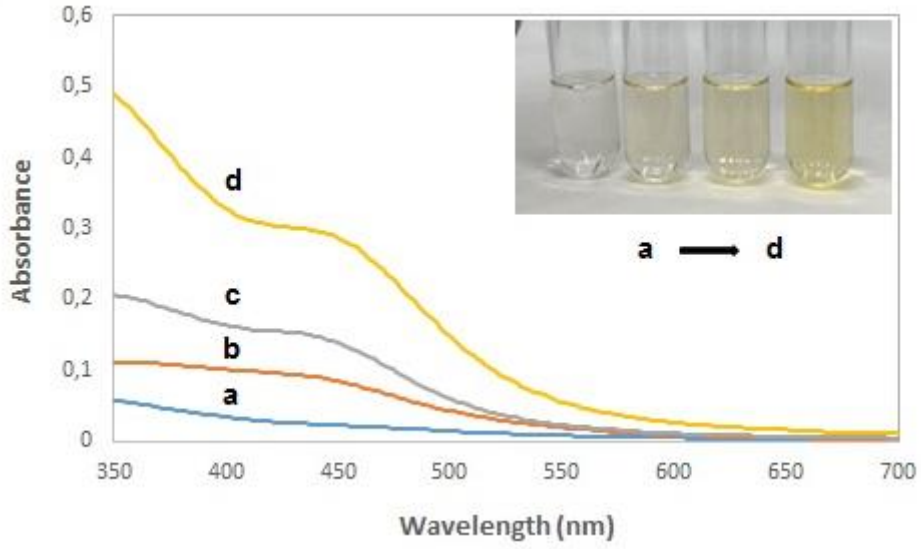


Figure 3. UV-Vis spectra of HE-SNPs with varying dilutions of *Helichrysum* sp. extract (initial concentration): **a)** 1:20 diluted, **b)** 1:10 diluted, **c)** 1:5 diluted, and **d)** 1:2 diluted

The effect of *Helichrysum* sp. extracts at different dilutions on silver nanoparticle synthesis by biogenic reduction is presented in Figure 3. The optimization study of concentration *of Helichrysum* sp. extract was carried out in the presence of *Helichrysum* sp. extract diluted 1:2, 1:5, 1:10, and 1:20 (v:v) and 5.0 mM Ag^+ ion concentration for 60 min incubation at room temperature. In the presence of 1:20 diluted *Helichrysum* sp. extract, no silver nanoparticles were formed. In the presence of 1:10 and 1:5 dilution ratios, respectively, seeds of silver nanoparticles were formed. However, a distinct maximum absorption was observed at 440 nm in the diluted 1:2 *Helichrysum* sp. extract medium. Accordingly, the *Helichrysum* sp. extract concentration was determined as 1:2 diluted *Helichrysum* sp. extract.

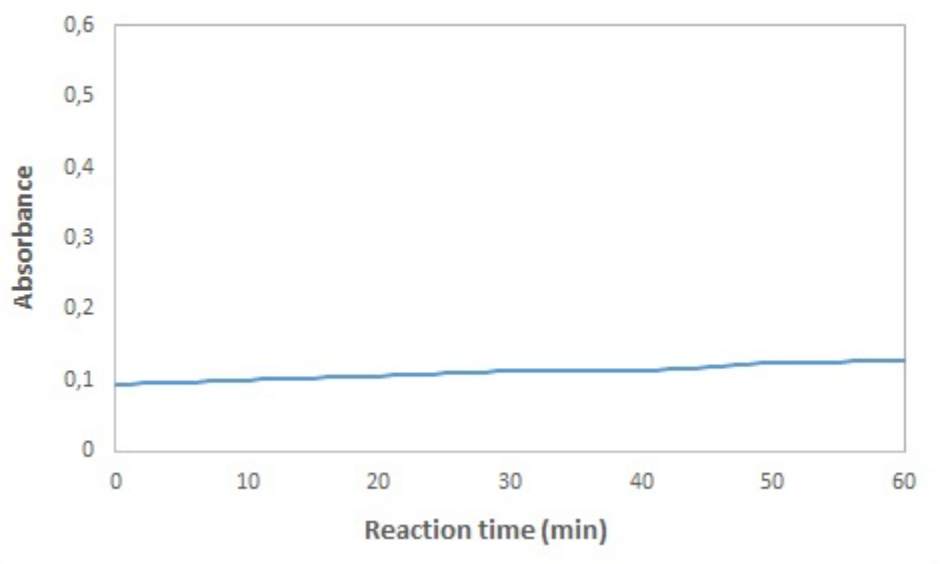


Figure 4. Reaction kinetic of HE-SNPs synthesized using *Helichrysum* sp. extract

Figure 4 shows the reaction kinetic of silver nanoparticles synthesized using *Helichrysum* sp. extract at room temperature for 60 minutes. A rapid increase in SPR absorbance was observed within the first few minutes. The increase in surface plasmon absorbance of HE-SNPs continued for 30 minutes. The absorbance stabilized after 30 minutes. Therefore, the optimum reaction time for synthesis HE-SNPs was determined as 40 min. In a study conducted with *Helichrysum arenarium*, the extract was prepared in 24 hours in the first stage and silver nanoparticles were synthesized by continuous shaking in the second stage (Kahraman, 2024a). However, in the proposed method, silver nanoparticles were prepared in 40 minutes. In this context, the proposed method is a simple and fast method that does not require additional processing.

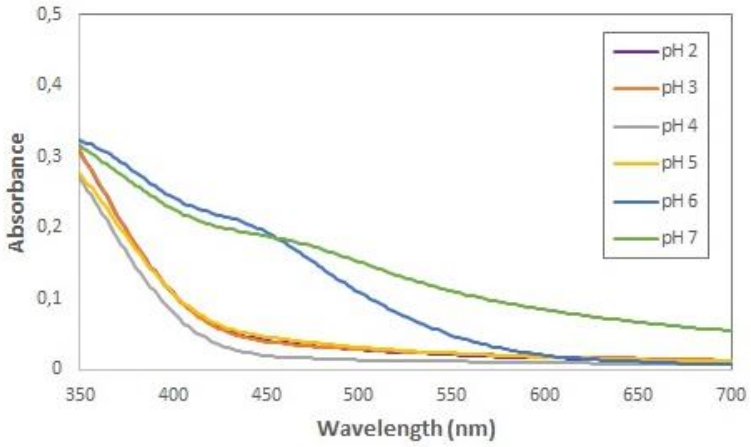


Figure 5. UV–Vis spectra of HE-SNPs formed in the range of pH 2.0–7.0

The effect of pH on the HE-SNPs formed with *Helichrysum* sp. extract was studied in the range pH 2.0–9.0 under the same experimental conditions (the mixture containing 5.0 mM Ag^{+} and diluted 1:2 (v:v) *Helichrysum* sp. extract). Observable from Figure 5, HE-SNPs were not formed at pH 2.0-5.0. HE-SNPs

were formed at pH 6.0, and had maximum absorption at 440 nm. The HE-SNP solution formed at pH 7 was slightly turbid. Therefore, it had a spread absorption spectrum, and the maximum absorption wavelength was 465 nm. Silver nanoparticles have an absorption maximum at approximately 400 nm, and aggregation of metal nanoparticles causes a shift in plasmon absorption toward longer wavelengths (i.e., redshift) (Moores and Goettmann, 2006; Siegel et al., 2012). At pH 8.0 and 9.0, Ag^+ ions precipitated. Undesired oxidation of Ag^+ to Ag_2O is most likely at these pHs. Consequently, pH 6.0 was selected as the most suitable pH for the formation of HE-SNPs. Similarly, the appropriate pH value was found to be 5 in the study with *Helichrysum arenarium* (Kahraman, 2024a). However, in another study, silver nanoparticles could be synthesized at pH 8 in the presence of *Helichrysum arenarium* (Ozdemir et al., 2023).

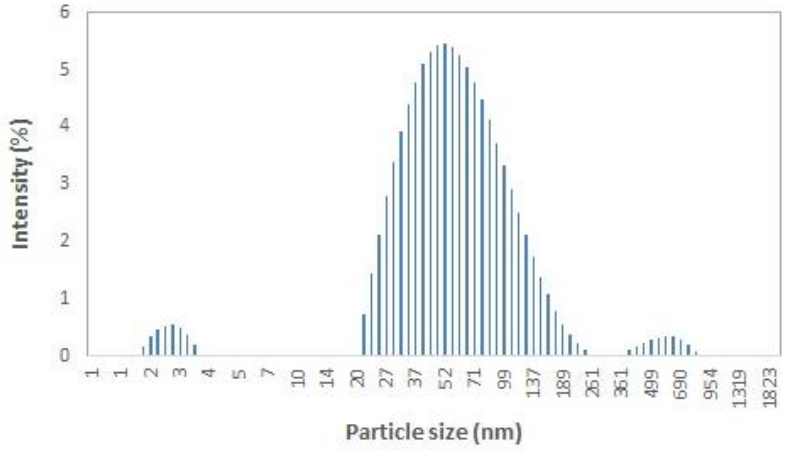


Figure 6. Particle size distribution of the HE-SNPs synthesized using *Helichrysum* sp. extract

The particle size distribution diagram of silver nanoparticles synthesized using *Helichrysum* sp. extract was given in Figure 6. According to dynamic light scattering (DLS) analysis of the HE-SNPs, hydrodynamic diameter was measured to be 54 nm. Polydispersity index (PI) of the HE-SNPs synthesized was determined to be 0.25. The polydispersity index varies depending on the size of the sample and PI is a measure of the heterogeneity of the sample (Mudalige et al., 2019). The value of PI below 0.200 indicates monodisperse nanoparticles, indicating homogeneity (Ledet et al., 2013).

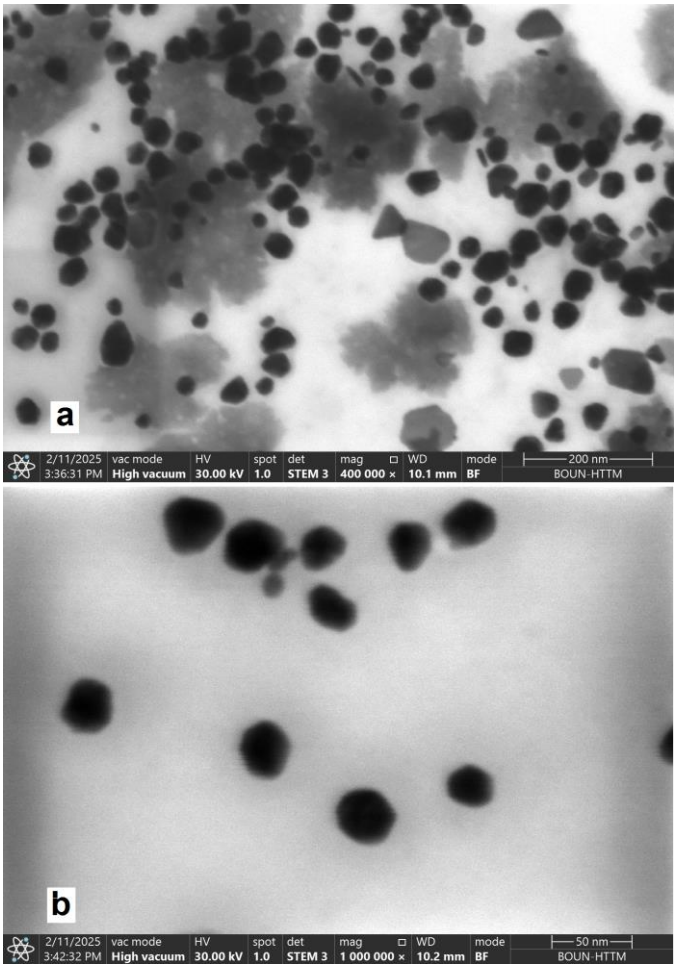


Figure 7. The wet-STEM images of the HE-SNPs synthesized using *Helichrysum* sp. extract at varying magnifications a) 200 nm, b) 50 nm

Figure 7 shows wet STEM images at varying magnifications of silver nanoparticles synthesized using *Helichrysum* sp. extract. According to these images, HE-SNPs synthesized by bioreducing are spherical, monodisperse and homogeneous. The spherical silver nanoparticles give intense surface plasmon absorption bands around 400 nm in the visible region (Liz-Marzán, 2006). In this context, the STEM images are supported by the UV visible region spectra (λmax: 440 nm) of the synthesized HE-SNPs. According to the STEM results, the average size of the synthesized HE-SNPs is 31 nm. However, there are nanoparticles larger and smaller than 31 nm. According to DLS results, the % area density of HE-SNPs with an average size of 54 nm was found to be 94.7%. In this respect, wet-STEM images are consistent with particle size distribution analysis results.

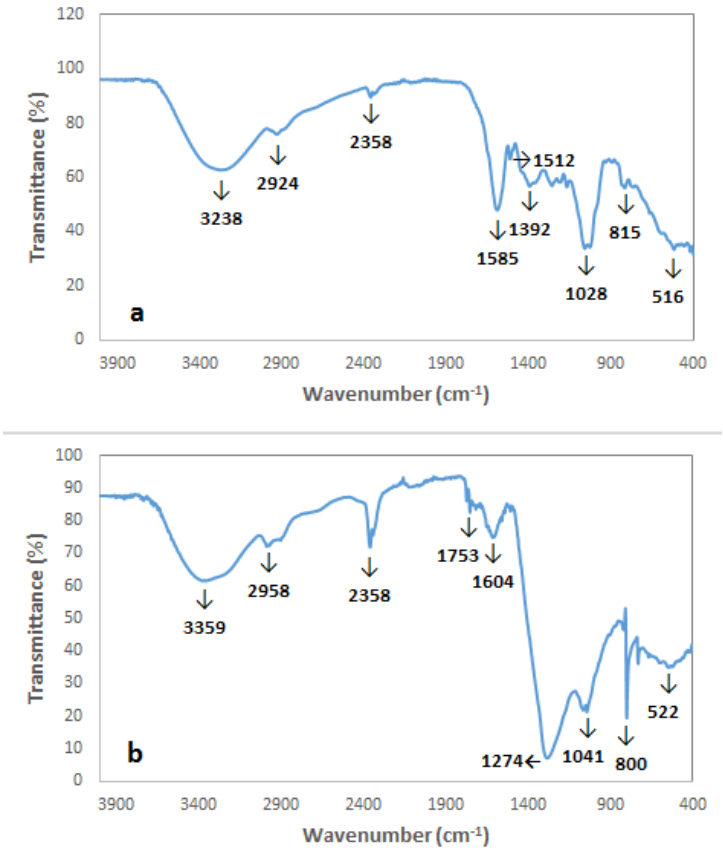


Figure 8. FTIR spectra of **a)** dried *Helichrysum* sp. extract and **b)** HE-SNPs synthesized using *Helichrysum* sp. extract

Figure 8a represents the FTIR spectra of dried *Helichrysum* sp. extract. The hydroxyl (− OH) groups have an absorption band of 3291 cm^{-1} due to vibrational stretching. The absorption band at 2924 cm^{-1} corresponds to aromatic C − H stretching vibration. The absorption band at 1585 cm^{-1} is due to amine (− NH) stretching vibration. The absorption band at 1512 cm^{-1} is assigned to the C = C stretching vibration. The C–N stretching vibration of aromatic and aliphatic amines is responsible for the absorption peak at 1392 cm^{-1}. The absorption band at 1028 cm^{-1} is assigned to the O − H bond and the C − OH stretch in phenolic groups. Aromatic hydroxyl (− OH) groups, C – OH groups, C–N stretching vibration of aromatic and aliphatic amines, and amine (− NH) stretching vibrations are mainly responsible for the reduction of Ag (I) ion to Ag (0). Figure 8b shows the FTIR spectra of the dried HE-SNPs. When the FTIR spectra of HE-SNPs was compared with the FTIR spectra of HE, it was observed that some of the functional groups present in *Helichrysum* sp. extract disappeared. Further, carbonyl C = O double-bond stretching with an absorption band at 1753 cm^{-1} indicated that the hydroxyl groups in the phenolic and flavonide compounds of the *Helichrysum* sp. extract were oxidized to the relevant quinones during the formation of HE-SNPs. Similarly, the FTIR spectra of silver nanoparticle synthesis with *H. arenarium* showed that most of the functional groups were disappeared or there were large shifts in the positions of the existing peaks and it was stated that the reduction and stabilization of silver nanoparticles depend on aromatic carbonyl, amide, flavanone, protein, ether and terpenoid components (Ozdemir et al., 2023).

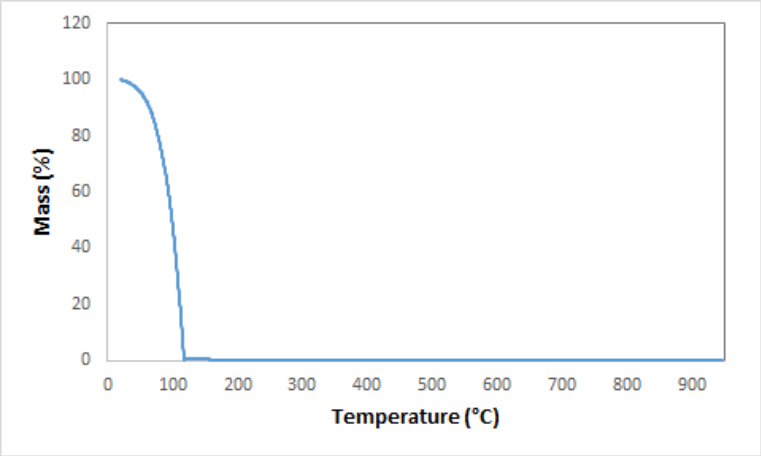


Figure 9. TGA thermogram of the HE-SNP synthesized using *Helichrysum* sp. extract

Figure 9 illustrates the TGA curve of the HE-SNP synthesized by *Helichrysum* sp. extract. It is seen that a thermal mass removal resulting in a temperature of 117 °C removes 86% of the total mass and the remaining mass at the end of 950 °C is 0.1%. It is observed that there is a gradual mass decrease of 0.28% in the range of 117-950 °C. The mass loss occurs in a single and sharp step. These decreases in the mass can be attributed to the loss of absorbed water on the HE-SNPs (De Canha et al., 2021; Kahraman, 2024b).

Table 1. Antioxidant properties of the HE-SNPs synthesized using *Helichrysum* sp. extract

	TAC for CUPRAC (mmol TR/g-DS)	**RSA for DPPH (mmol TR/g-DS)**
HE-SNPs	0.024±0.001	0.005±0.001
HE	0.027±0.001	0.018±0.001

(N=3)

The antioxidant capacity/activity values of HE-SNPs synthesized in the presence of *Helichrysum* sp. extract are presented in Table 1. The TAC values of the synthesized HE-SNPs and HE were found to be 0.024 and 0.027 mmol-TR according to the CUPRAC method, respectively. The RSA values of the synthesized HE-SNPs and HE were found to be 0.005 and 0.018 mmol-TR according to the DPPH assay, respectively. In the present work, the antioxidant capacity/activity of HE-SNPs can be attributed to the high phenolic and flavonoid content in *Helichrysum* sp. The antioxidant capabilities of silver nanoparticles are mostly influenced by the chemical composition of the plant extract and improve with increasing silver nanoparticle concentration. The nanoparticles synthesized with plant extracts abundant in phytochemicals show high scavenging activity (Bedlovičová et al., 2020). As expected, HE-SNPs exhibit lower total antioxidant capacity and activity compared to HE. The hydroxyl groups of flavonoids and phenolic compounds in *Helichrysum* sp. extract reduce Ag^{+} ions to Ag^{0}, while they themselves are oxidized to their respective quinones, thus; silver nanoparticles are produced. Since the number of phenolic compounds present in *Helichrysum* sp. extract decreases during the synthesis of HE-SNPs, the antioxidant capacity/activity value decreases. This is evidence that silver nanoparticles are produced in

the proposed green synthesis method. Similarly, the reduced levels of phenolic and flavonoid measured in the nanoparticles compared to the plant extract are shown as evidence for nanoparticle production (Phull et al., 2016).

4. Conclusion

In this study, a reliable and green silver nanoparticle synthesis method that can be used in many application areas was proposed. *Helichrysum* sp. extract, which was selected as a natural source, was used as both a bioreducing and a stabilizing agent in the proposed method. Distilled water was used as a solvent in the synthesis of silver nanoparticles with *Helichrysum* sp. extract. Thus, the basic principles of green synthesis, such as reducing the consumption of harmful solvents and using renewable natural resources, have been fulfilled. The proposed method is as effective as traditional synthesis methods. In fact, the disadvantage that biological reductants are weaker reductants than chemical reductants have also turned into an advantage. Therefore, green synthesis allowed the synthesis of nanoparticles in a monolayer and homogeneously without aggregation. Thanks to the proposed extraction process of *Helichrysum* sp., an extract rich in polyphenolic compounds was obtained. In this way, silver nanoparticles were synthesized quickly at room temperature without the need for an additional process such as heating in the production of nanoparticles. HE-SNPs showed positive results in terms of total antioxidant capacity and radical scavenging activity. Characterization findings demonstrated the sustainable production of pure nanoparticles below 100 nm that exhibit antioxidant properties using an environmentally friendly process for various applications.

Acknowledgement The author thanks Istanbul University, Faculty of Science, Department of Chemistry, Division of Analytical Chemistry for sharing its research infrastructures. The author thanks Istanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Chemistry, Division of Analytical Chemistry for FTIR measurement. The author thanks Dr. Ceren Aktürk from the Department of Pharmaceutical Botany, Faculty of Pharmacy, Biruni University for her contributions.

Conflict of interest The author declares no conflict of interest.

References

Akaberi M., Sahebkar A., Azizi N., Emami SA. Everlasting flowers: Phytochemistry and pharmacology of the genus Helichrysum. Industrial Crops and Products 2019; 138: 111471.

Amendola V., Pilot R., Frasconi M., Maragò OM., Iatì MA. Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: a review. Journal of Physics: Condensed Matter 2017; 29(20): 203002.

Apak R., Demirci Çekiç S., Üzer A., Çelik SE., Bener M., Bekdeşer B., Can Z., Sağlam Ş., Öner AN., Erçağ E. Novel spectroscopic and electrochemical sensors and nanoprobes for the characterization of food and biological antioxidants. Sensors 2018; 18(1): 186.

Apak R., Güçlü K., Özyürek M., Karademir SE. Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence of neocuproine: CUPRAC method. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2004; 52(26): 7970-7981.

Bamal D., Singh A., Chaudhary G., Kumar M., Singh M., Rani N., Mundlia P., Sehrawat AR. Silver nanoparticles biosynthesis, characterization, antimicrobial activities, applications, cytotoxicity and safety issues: An updated review. Nanomaterials 2021; 11(8): 2086.

Bedlovičová Z., Strapáč I., Baláž M., Salayová A. A brief overview on antioxidant activity determination of silver nanoparticles. Molecules 2020; 25(14): 3191.

De Canha MN., Thipe VC., Katti KV., Mandiwana V., Kalombo ML., Ray SS., Rikhotso R., Van Vuuren AJ., Lall N. The activity of gold nanoparticles synthesized using helichrysum odoratissimum against cutibacterium acnes biofilms. Frontiers in Cell and Developmental Biology 2021; 9: 675064.

Gouveia SC., Castilho PC. Characterization of phenolic compounds in Helichrysum melaleucum by high-performance liquid chromatography with on-line ultraviolet and mass spectrometry detection. Rapid Communications in Mass Spectrometry 2010; 24(13): 1851-1868.

Gurunathan S., Kalishwaralal K., Vaidyanathan R., Venkataraman D., Pandian SRK., Muniyandi J., Hariharan N., Eom SH. Biosynthesis, purification and characterization of silver nanoparticles using Escherichia coli. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 2009; 74(1): 328-335.

Gurunathan S., Park JH., Han JW., Kim JH. Comparative assessment of the apoptotic potential of silver nanoparticles synthesized by Bacillus tequilensis and Calocybe indica in MDA-MB-231 human breast cancer cells: targeting p53 for anticancer therapy. International Journal of Nanomedicine 2015; 10(1): 4203-4223.

Huston M., DeBella M., DiBella M., Gupta A. Green synthesis of nanomaterials. Nanomaterials 2021; 11(8): 2130.

Hutchison JE. Greener nanoscience: a proactive approach to advancing applications and reducing implications of nanotechnology. ACS Nano 2008; 2(3): 395-402.

Kahraman HT. Synthesis of silver nanoparticles using Alchemilla vulgaris and Helichrysum arenarium for methylene blue and 4-nitrophenol degradation and antibacterial applications. Biomass Conversion and Biorefinery 2024a; 14: 13479-13490.

Kahraman HT. Fabrication of electrospun PA66 nanofibers loaded with biosynthesized silver nanoparticles: Investigation of dye degradation and antibacterial activity. Environmental Science and Pollution Research 2024b; 31(40): 53121-53134.

Khandel P., Yadaw RK., Soni DK., Kanwar L., Shahi SK. Biogenesis of metal nanoparticles and their pharmacological applications: present status and application prospects. Journal of Nanostructure in Chemistry 2018; 8: 217-254.

Ledet G., Bostanian LA., Mandal TK., Tiwari A. Nanoemulsions as a vaccine adjuvant. Boca Raton: CRC Press; 2013.

Liz-Marzán LM. Tailoring surface plasmons through the morphology and assembly of metal nanoparticles. Langmuir 2006; 22(1): 32-41.

Moores A., Goettmann F. The plasmon band in noble metal nanoparticles: an introduction to theory and applications. New Journal of Chemistry 2006; 30(8): 1121-1132.

Mudalige T., Qu H., Van Haute D., Ansar SM., Paredes A., Ingle T. Characterization of nanomaterials: Tools and challenges. Nanomaterials for Food Applications 2019; 313-353.

Ozdemir C., Gencer M., Coksu I., Ozbek T., Derman S. A new strategy to achieve high antimicrobial activity: green synthesised silver nanoparticle formulations with Galium aparine and Helichrysum arenarium. Archives of Industrial Hygiene and Toxicology 2023; 74(2): 90-98.

Phull AR., Abbas Q., Ali A., Raza H., Zia M., Kim SJ., Haq IU. Antioxidant, cytotoxic and antimicrobial activities of green synthesized silver nanoparticles from crude extract of Bergenia ciliata. Future Journal of Pharmaceutical Sciences 2016; 2(1): 31-36.

Sánchez-Moreno C., Larrauri JA., Saura-Calixto F. A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. Journal of the Science of Food and Agriculture 1998; 76(2): 270-276.

Siegel J., Kvítek O., Ulbrich P., Kolská Z., Slepička P., Švorčík V. Progressive approach for metal nanoparticle synthesis. Materials Letters 2012; 89: 47-50.

Singh J., Dutta T., Kim KH., Rawat M., Samddar P., Kumar P. 'Green'synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. Journal of Nanobiotechnology 2018; 16: 84.

Singh P., Kim YJ., Zhang D., Yang DC. Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms. Trends in Biotechnology 2016; 34(7): 588-599.

Viegas DA., Palmeira-de-Oliveira A., Salgueiro L., Martinez-de-Oliveira J., Palmeira-de-Oliveira R. Helichrysum italicum: From traditional use to scientific data. Journal of Ethnopharmacology 2014; 151(1): 54-65.

Zhang XF., Liu ZG., Shen W., Gurunathan S. Silver nanoparticles: synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. International Journal of Molecular Sciences 2016; 17(9): 1534.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1613-1623, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1613-1623, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Lack of Pseudouridine Synthase 7 Enzyme Sensitizes Yeast Cells to DNA-Damaging Agents

Mehmet TARDU[1*]

[1]Department of Biology, Faculty of Science, Istanbul University, Istanbul, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-1674-5958
*Corresponding author: mehmet.tardu@istanbul.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 07.01.2025
Accepted: 27.03.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Saccharomyces cerevisiae
Pseudouridine synthase
Pus7
Methyl methanesulfonate
Ultraviolet light
DNA damage

ABSTRACT

RNA modifications are essential in reshaping the chemistry of RNA molecules, influencing their structure, function, and stability. Up to now, more than 160 different types of modifications have been discovered among different RNA species. One prominent modification is the enzymatic transformation of uridine (U) into pseudouridine (Ψ), a process facilitated by pseudouridine synthase (Pus) enzymes, which occurs in both coding (mRNA) and non-coding (ncRNA) RNA species. Among the enzymes responsible for this transformation, Pus7 stands out due to its association with certain developmental and physical conditions. Research links Pus7 to intellectual disabilities, delayed speech development, microcephaly, and short stature. Despite its association with these disorders, the exact biological role and mechanism of Pus7 remain poorly understood, leaving room for further investigation. In this study, we aimed to understand the role of Pus7 in *Saccharomyces cerevisiae* cells under DNA damage stress. To achieve this, wild-type and *pus7*Δ cells were subjected to varying concentrations of DNA-damaging agents, including ultraviolet (UV) light and the chemical methyl methanesulfonate (MMS). Survival curves and spot plating assay results demonstrated that *pus7*Δ cells exhibit growth defects when exposed to 2 mM MMS or 15 J/m² UV light. These findings indicate that the absence of Pus7 enzyme renders yeast cells sensitive to DNA-damaging agents. Further research is necessary to investigate the role of Pus7 under DNA damage stress, which contributes to genomic instability - a hallmark of many cancers.

Psödoüridin Sentaz 7 Enzim Eksikliği DNA Hasarına Neden Olan Ajanlara Karşı Maya Hücrelerini Hassas Hale Getirir

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 07.01.2025
Kabul tarihi:27.03.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Saccharomyces cerevisiae
Psödoüridin sentaz
Pus7
Metil metansülfonat
Ultraviyole ışık
DNA hasarı

ÖZ

RNA modifikasyonları, RNA moleküllerinin kimyasını değiştirmede önemli bir rol oynayarak onların yapılarını, işlevselliklerini ve kararlılıklarını etkiler. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda çeşitli RNA türleri üzerinde 160'tan fazla farklı modifikasyon tipi tanımlanmıştır. Bu modifikasyonlardan biri, üridin (U) molekülünün psödoüridin (Ψ) formuna enzimatik dönüşümüdür ve bu süreç, psödoüridin sentaz (Pus) enzimleri tarafından gerçekleştirilir. Bu modifikasyon, hem kodlama yapan RNA (mRNA) hem de kodlama yapmayan RNA (ncRNA) türlerinde bulunur. Bu dönüşümden sorumlu enzimler arasında, Pus7 belirli gelişimsel ve fiziksel durumlarla ilişkilendirilmesi nedeniyle öne çıkmaktadır. Araştırmalar, Pus7'nin zihinsel yetersizlikler, gecikmiş konuşma gelişimi, mikrosefali ve kısa boy gibi durumlarla bağlantılı olduğunu göstermektedir. Bu rahatsızlıklarla ilişkisine rağmen, Pus7'nin tam biyolojik rolü ve mekanizması yeterince anlaşılmış değildir ve bu durum daha fazla araştırmaya olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, *Saccharomyces cerevisiae* hücrelerinde Pus7'nin DNA hasar stresine karşı rolünü anlamayı

amaçladık. Bu amaçla, yabanıl tip ve *pus7*Δ hücreleri, ultraviyole (UV) ışığı ve metil metansülfonat (MMS) gibi DNA hasarına neden olan ajanların farklı konsantrasyonlarına maruz bırakıldı. Sağ kalım eğri analizleri ve okta ekim sonuçları, *pus7*Δ hücrelerinin 2 mM MMS ve 15 j/m² UV ışığı varlığında büyüme kusurları sergilediğini gösterdi. Bu sonuçlar, Pus7 enziminin yokluğunun maya hücrelerini DNA hasarına neden olan ajanlara duyarlı hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar bize, birçok kanser türünün ayırt edici özelliği olan genomik dengesizliğe katkıda bulunan DNA hasarı stresi altında Pus7'nin rolünü araştırmak için acilen kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

To Cite: Tardu M. Lack of Pseudouridine Synthase 7 Enzyme Sensitizes Yeast Cells to DNA-Damaging Agents. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1613-1623.

1. Introduction

Chemical modifications frequently occur in biological macromolecules, serving to regulate their functional properties. Similar to DNA and proteins, RNA molecules undergo diverse chemical modifications that affect their structure, function, and stability within cells. Up to now, more than 160 distinct RNA modifications have been detected in both coding RNA (mRNA) and non-coding RNA (ncRNA), highlighting the complexity of RNA modification landscape (Cappannini et al., 2023). While these modifications were first discovered more than five decades ago, their importance in cellular functions has only recently garnered significant research attention, giving rise to the field of epitranscriptomics. These RNA modifications are now recognized as crucial contributors to essential biological processes and regulators of gene expression through various mechanisms (Frye et al., 2018; Jin et al., 2022).

Pseudouridine (Ψ), a structural isomer of uridine, is one of the most prevalent RNA modifications. It has been detected both in ncRNAs and as well as in certain mRNAs (Carlile et al., 2014; Lovejoy et al., 2014). Recent studies demonstrate that Ψ modifications in mRNAs influence key processes such as RNA metabolism, pre-mRNA splicing, and the accuracy of mRNA translation across a variety of organisms (Parisien et al., 2012; Nakamoto et al., 2017; Shaheen et al., 2019; Jalan et al., 2023). Transformation of uridine into Ψ is facilitated by pseudouridine synthase (Pus) enzymes, which are highly conserved in both prokaryotes and eukaryotes. Extensive studies in yeast and bacteria have shown that while these enzymes are not essential for survival under standard conditions, their absence can create a competitive growth disadvantage compared to wild-type strains (Gutgsell et al., 2000; Del Campo et al., 2001).

Recent research highlights that mutations in human *PUS* genes, including those encoding *PUS1*, *PUS4*, and *PUS7*, are linked to various disorders. For example, specific mutations in *PUS7* have been associated with intellectual disabilities, speech delays, and physical abnormalities such as microcephaly and short stature (Darvish et al., 2019; Shaheen et al., 2019; Han et al., 2022). Studies have shown that PUS7 predominantly targets RNA sequences with the UGUAR consensus motif. However, not all RNAs containing UGUAR motif undergo pseudouridylation, suggesting that these modification sites are dynamic and may vary depending on the conditions (Purchal et al., 2022).

In mammalian cells, environmental stress is known to trigger changes in pseudouridylation, particularly increasing modification rates in mRNA targets (Carlile et al., 2014; Li et al., 2015). This stress-induced adaptation is thought to be mediated by changes in the cellular localization of Pus enzymes, including Pus7 (Schwartz et al., 2014). In this study, we aimed to explore the role of Pus7 in *Saccharomyces cerevisiae* under conditions of DNA damage stress. To achieve this, wild-type and *pus7Δ* yeast strains were treated with varying concentrations of DNA-damaging agents, such as ultraviolet (UV) light and methyl methanesulfonate (MMS). The growth phenotypes of the wild-type and *pus7*Δ strains were then compared to assess Pus7's involvement in the cellular response to DNA damage. Our findings show that the presence of Pus7 enzyme increases the resistance of yeast cells to UV light and MMS.

2. Materials and Methods

2.1. Cell Cultivation and DNA Damage Assays

Wild-type (WT) and *pus7*Δ *Saccharomyces cerevisiae* cells were cultured as detailed in Tardu et al., 2019. Briefly, single colonies were picked and cultured overnight in YPD medium (yeast extract and peptone with 2% glucose), with or without selective antibiotics, at 30°C and 250 rpm. The overnight cultures were then diluted to an OD_{600}=0.05 in suitable growth media and grown to an OD_{600}=0.5 for DNA damage assays. For stress experiments, ultraviolet (UV) light and methyl methanesulfonate (MMS) were used as DNA-damaging agents. Stress treatments and survival assays were performed as follows: Mid-log phase WT cells (OD_{600} = 0.5) were plated in triplicate on YPD + 1.5% agar containing varying concentrations of MMS (0–8 mM) using the spreading method and incubated at 30°C for 3 days. For UV stress, WT and knockout cells on YPD + 1.5% agar plates were exposed to UV light (254 nm) at 1.5 J/m² for 10, 25, 45, and 60 seconds. The plates were then wrapped in aluminum foil and incubated in the dark at 30°C for 3 days. After incubation, colony images were captured using the iBright imaging system (Invitrogen, USA), and survival curves were generated from colony counts under each condition.

2.2. Spot Plating Assays

Spot plating assays were conducted using various concentrations of methyl methanesulfonate (MMS) (0, 1 mM, 2 mM) or ultraviolet (UV) light doses (0, 15 J/m², 37.5 J/m²). In summary, single colonies of wild-type (WT) and *PUS7* knockout yeast cells were selected from streak plates and inoculated into culture tubes containing 3 mL of YPD medium.Then, the cultures were incubated overnight at 30°C with shaking. The following day, cultures were diluted 1:10, and the optical density (OD) was measured at 600 nm using a spectrophotometer. Cells were then diluted to OD_{600} = 0.05 and grown until reaching OD_{600} = 0.5. Subsequently, four serial 1:10 dilutions of each sample were prepared. The diluted samples were transferred into 96-well microplates, and 6 µL aliquots were spotted onto the appropriate solid media. Next, plates were incubated at 30°C for 2–3 days. Images of the plates were captured with the iBright Imaging System (Invitrogen, USA). Spot plating assays were performed in two biological replicates for each condition to ensure reproducibility.

2.3. Construction of Saccharomyces cerevisiae pus7Δ deletion mutant

Saccharomyces cerevisiae pus7Δ mutants were generated following the protocol described in Winzeler et al., 1999. This method replaces the *S. cerevisiae PUS7* gene with the kanMX4 selectable marker gene through homologous recombination. The kanMX4 marker provides resistance to the antibiotic Geneticin (G418), facilitating the identification of successful gene knockouts. In summary, the kanMX4 cassette, flanked by 20-nucleotide sequences homologous to the upstream and downstream regions of *PUS7*, was amplified through PCR using the knockout primers specified in Table 1. The PCR products were purified from the gel using the Monarch DNA Gel Extraction Kit (NEB, USA) and then introduced into wild-type *S. cerevisiae* cells via the lithium acetate/single-stranded carrier DNA/PEG transformation method, following the protocol outlined by Gietz et al. (2007). Transformants were plated onto selective media containing 200 mg/L G418. After 3–4 days of incubation at 30°C, colony PCR was performed to screen for mutants using knockout confirmation primers (P3 and P4) detailed in Table 1. Successful integration of the kanMX4 cassette was confirmed through agarose gel electrophoresis of the PCR products.

3. Results and Discussion

To generate *pus7Δ* mutant, kanMX4 selection marker cassette, flanked by 20-nucleotide sequences homologous to the upstream and downstream regions of *PUS7*, is PCR amplified and subsequently used in transformation to achieve targeted replacement of *PUS7* (Figure 1A). Specifically, the kanMX4 cassette from pJET-kanMX4 (conferring resistance to Geneticin antibiotic) is PCR amplified using the appropriate knockout primers (P1 and P2) listed in Table 1. Following transformation, colonies were screened to identify *pus7Δ* mutants using PCR with knockout confirmation primers of P3 and P4 (Table 1). Expected PCR product sizes are 2614 bp for wild-type and 2167 bp for *pus7Δ* mutant yeast cells. Figure 1B confirms the successful deletion of the *PUS7* gene in *Saccharomyces cerevisiae* cells.

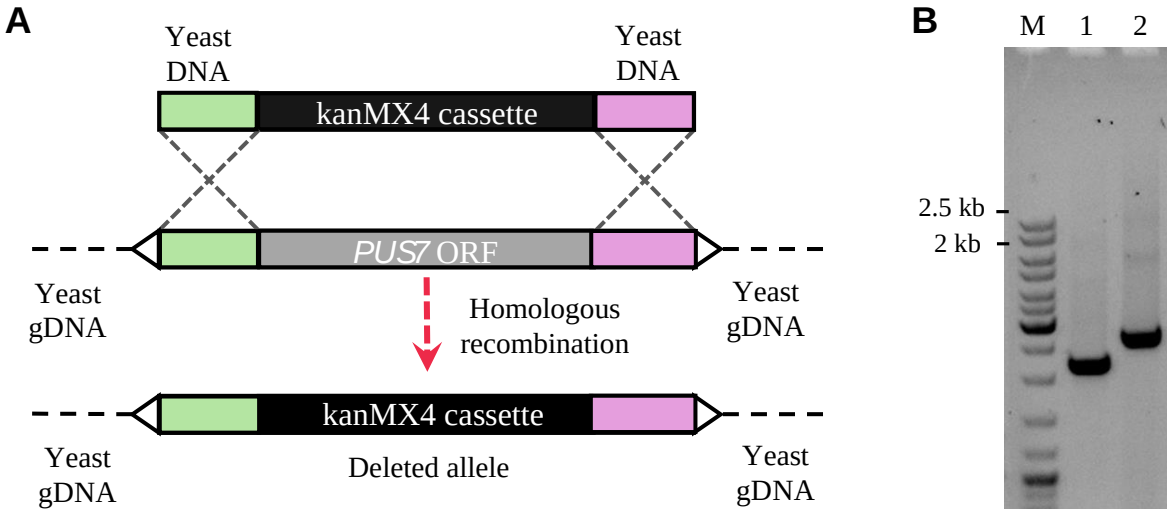


Figure 1. A) Strategy used in this study to generate *PUS7* deleted knockout cells. B) Agarose gel electrophoresis of knockout confirmation PCR. Gel image displaying the PCR products of *pus7Δ* (2167 bp) and wild-type (2614 bp) cells in lanes 1 and 2, respectively. M stands for molecular weight marker.

Table 1. List of oligonucleotides used in this study.

Oligo ID	Oligo Name	Sequence (5'-3')
P1	YOR243C_KO_F	TATCTGTTGCATGCCATGCGTACGCTGCAGGTCGAC
P2	YOR243C_KO_R	GCACCTCGTATAACCTTATCGATGAATTCGAGCTCG
P3	YOR243C_Confirmation_F	ACATCGATGATTTCTTGCAGTATTT
P4	YOR243C_Confirmation_R	CGCGAGAATATATCTGTCTTTTTGT

After successfully confirming the knockout, we performed DNA damage experiments using methyl methanesulfonate (MMS) chemical and ultraviolet (UV) light, both of which are well-known genotoxic agents that generate specific types of DNA damage. To achieve this, survival curves for wild-type *S. cerevisiae* cells were generated under different concentrations of MMS and UV light. As presented in Figure 2A, the percentage of yeast cell survival declined to 67.6% (± 14.8), 58.5% (± 7.7), 51.7% (± 8.5), 42.2% (± 6.0), and 0.25% (± 0.2) following treatment with 0.5 mM, 1 mM, 2 mM, 4 mM, and 8 mM MMS, respectively. MMS acts as a strong alkylating agent, methylating DNA bases mainly at the N3 position of adenine and the N7 position of guanine (Lee et al., 1992). This leads to unstable lesions, like N3-methyladenine, which interfere with DNA replication and transcription (Ma et al., 2008). If not repaired through the base excision repair (BER) pathway, it may cause to strand breaks (Boiteux et al., 2004). Similarly, UV treatment reduced yeast cell survival to 60% (± 15.8), 16% (± 4.1), and 0.4% (± 0.2) after exposure to 15 J/m², 37.5 J/m², and 67.5 J/m² UV, respectively (Figure 2B). UV radiation primarily causes the formation of cyclobutane pyrimidine dimers (CPDs) and 6-4 photoproducts, which disrupt the structure of the DNA double helix and impede both replication and transcription (Cavga et al., 2017; Kavakli et al, 2017). These bulky lesions are primarily addressed through the nucleotide excision repair (NER) pathway, which eliminates the damaged DNA segments and synthesizes new strands (Krasikova et al., 2021). If left unrepaired, DNA damage caused by MMS and UV radiation can lead to mutations, cell cycle arrest, or apoptosis, emphasizing the critical role of efficient DNA repair systems in maintaining genomic stability (Boiteux et al., 2004; Lo et al., 2005). These complementary models offer valuable insights into cellular responses to genotoxic stress and the mechanisms of DNA repair. In conclusion, the survival analysis of *S. cerevisiae* showed a dose-dependent decrease in cell viability under MMS and UV exposure, confirming successful DNA damage induction (Figure 2). This validates the experimental setup and supports further investigation using spot plating assays on *pus7Δ* cells.

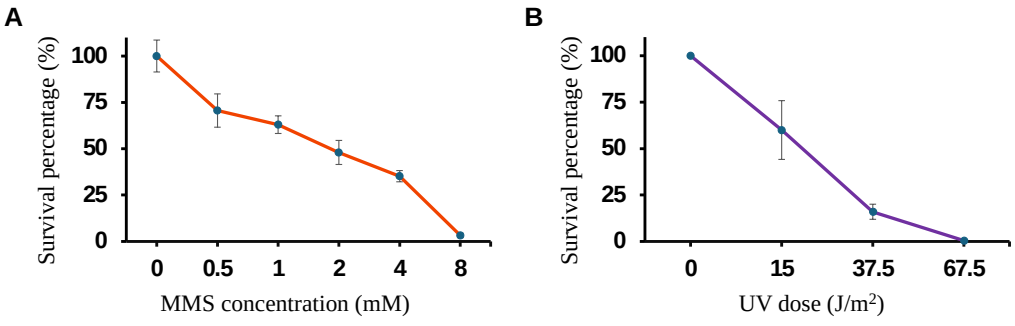


Figure 2. Survival percentages of wild-type *Saccharomyces cerevisiae* cells in the presence of A) methyl methanesulfonate (MMS), and B) Ultraviolet (UV) light.

The spot plating assay is an essential technique in yeast biology, utilized to examine the impact of genetic modifications or environmental conditions on yeast growth. We tested both wild-type and *pus7*Δ cells under MMS and UV DNA damage stress using this assay. Figure 3 shows the spot plating results that compares the growth of both strains under different conditions, including a control (YPD medium) and varying concentrations of MMS (0 mM, 1 mM and 2 mM). Data were recorded over 2 and 3 days with two biological replicates for each strain and condition. Both wild-type and *pus7*Δ strains show comparable growth, indicating no significant growth defect in the *pus7*Δ strain under standard YPD conditions (no-stress). However, while the wild-type strain tolerates 1 mM MMS well, the growth of the *pus7*Δ strain is noticeably impaired, indicating increased sensitivity to MMS (Figure 3). When the MMS concentration is increased to 2 mM, the sensitivity of the *pus7*Δ cells becomes even more obvious, demonstrating a severe vulnerability to higher MMS levels (Figure 3). Previous studies have shown that *PUS7* is involved in modifying RNA to enhance stability and translational fidelity under various stress conditions (Decatur et al., 2002; Shaheen et al., 2019). The absence of Pus7 enzyme could interfere with these processes, leading to increased sensitivity to genotoxic damage induced by MMS. Alternatively, Pus7 might indirectly affect the BER pathway by modifying RNAs that encode repair proteins, potentially influencing the DNA damage response.

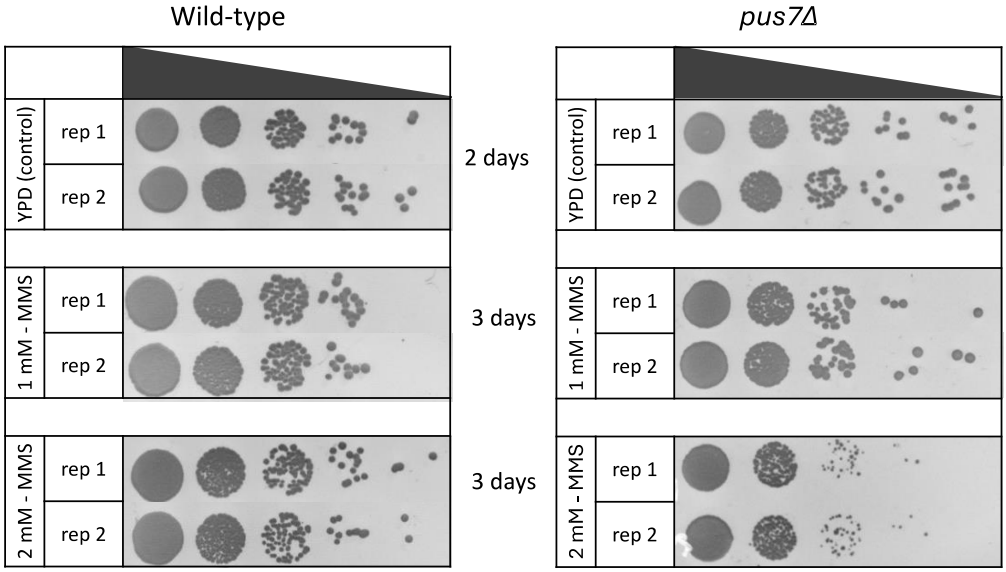


Figure 3. Spot plating assay of wild-type and *pus7*Δ *Saccharomyces cerevisiae* cells in the presence 0 mM (YPD (control)), 1 mM, and 2 mM methyl methanesulfonate (MMS). Plates are incubated at 30 ^{0}C for 2-3 days with two biological replicates (rep 1 and rep 2).

To further investigate the role of *PUS7* under DNA-damage stress, we evaluated its impact under UV stress conditions. At 15 J/m² UV exposure, the wild-type strain displays robust growth across replicates, whereas the *pus7*Δ strain exhibits a marked decrease in growth, suggesting sensitivity to DNA damage at this level (Figure 4). This effect is even more evident at 37.5 J/m², where wild-type growth is reduced but still visible, while the *pus7*Δ strain shows almost no growth, indicating extreme sensitivity to high

UV doses (Figure 4). Similar to MMS, UV exposure revealed a consistent pattern of increased sensitivity in the *pus7*Δ strain, suggesting a broader role for *PUS7* in mitigating diverse genotoxic conditions. These results emphasize the critical role of Pus7 in cellular tolerance to MMS- and UV-induced DNA damage and suggest its involvement in stress-response pathways, potentially through its pseudouridine synthase activity and influence on RNA stability or translation fidelity.

Multiple studies have revealed a strong link between PUS7 enzyme and various cancers (Cui et al., 2021; Du et al., 2022). For example, research has shown that *PUS7* is significantly upregulated in glioblastoma, a highly aggressive form of brain cancer (Cui et al., 2021). Similarly, in colorectal cancer, *PUS7* overexpression has been associated with increased metastasis, highlighting its role in cancer progression (Du et al., 2022) Moreover, elevated *PUS7* expression in non-small cell lung cancer (NSCLC) tissues has been observed, with patients exhibiting higher *PUS7* levels experiencing poorer prognoses (Zhang et al., 2023). In another study, it was shown that *PUS7*-dependent pseudouridylation of ALKBH3 mRNA inhibits gastric cancer cell proliferation and tumor growth. This suggests that *PUS7*'s catalytic activity plays a role in suppressing gastric cancer progression (Chang et al., 2024). These findings indicate that *PUS7* may play a significant role in modulating cancer cell responses to genotoxic stress by enhancing RNA pseudouridylation, a process that may facilitate adaptive stress responses and drive tumor progression. PUS7's involvement in multiple cancer types emphasizes its potential as a promising therapeutic target, particularly in malignancies characterized by elevated cellular stress levels.

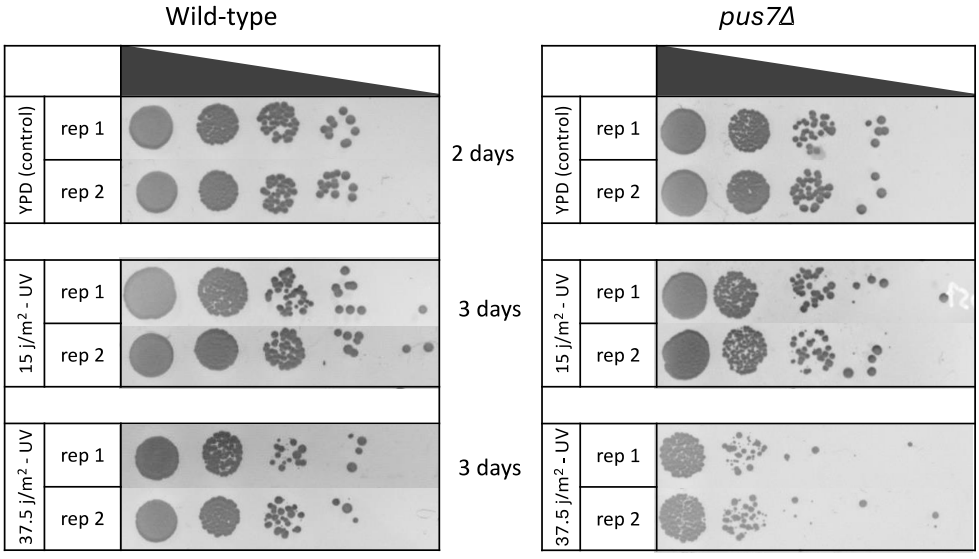


Figure 4. Spot plating assay of wild-type and *pus7*Δ *Saccharomyces cerevisiae* cells in the presence 0 j/m^2 (YPD (control)), 15 j/m^2, and 37.5 j/m^2 ultraviolet (UV) light. Plates are incubated at 30 ^{0}C for 2-3 days with two biological replicates (rep 1 and rep 2).

4. Conclusion

This study demonstrates that Pus7 is critical for yeast cell survival under MMS- and UV-induced DNA damage, particularly during elevated genotoxic stress. However, the molecular mechanisms underlying its protective function remain unclear. Exploring how Pus7 enhances resistance to DNA-damaging agents is essential for understanding its role in maintaining genome stability.

Beyond its role in DNA damage protection, Pus7 may also regulate DNA repair genes at the post-transcriptional level. Pseudouridylation enhances RNA stability and translation efficiency, suggesting that Pus7-mediated modifications may influence the expression of DNA repair factors. Investigating how Pus7 modulates gene expression under genotoxic stress could offer valuable insights into broader cellular stress response networks. To clarify its contribution to MMS and UV resistance, further studies should utilize transcriptomic analysis and complementation assays. These approaches will be crucial in uncovering the role of Pus7-mediated RNA modifications in genome stability and cellular adaptation to DNA damage.

Acknowledgements

This work was supported by research infrastructure provided through the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK, Project No. 121C066) and the Scientific Research Projects Coordination Unit of Istanbul University (IU-BAP, Project No. FHZ-2024-40796).

Statement of Conflict of Interest

The author declares that he has no conflict of interest related to this work.

Author's Contributions

The author declares that he contributed 100% to this work.

References

Boiteux S., Guillet M. DNA abasic sites in Saccharomyces cerevisiae: repair and biological consequences. DNA Repair 2004; 3(1): 1-12.

Cappannini A., Ray A., Purta E., Mukherjee S., Boccaletto P., Moafinejad SN., Lechner A., Barchet C., Klaholz BP., Stefaniak F., Bujnicki JM. Modomics: a database of RNA modifications and related information. 2023 update. Nucleic Acids Research 2024; 52(D1): D239-D244.

Carlile TM., Rojas-Duran MF., Zinshteyn B., Shin H., Bartoli KM., Gilbert WV. Pseudouridine profiling reveals regulated mRNA pseudouridylation in yeast and human cells. Nature 2014; 515(7525): 143-146.

Cavga AD., Tardu M., Korkmaz T., Keskin O., Ozturk N., Gursoy A., Kavakli IH. Cryptochrome deletion in p53 mutant mice enhances apoptotic and anti-tumorigenic responses to UV damage at the transcriptome level. Functional & Integrative Genomics 2019; 19(5): 729-742.

Chang Y., Jin H., Cui Y., Yang F., Chen K., Kuang W., Huo C., Xu Z., Li Y., Lin A., Yang B., Liu W., Xie S., Zhou T. PUS7-dependent pseudouridylation of ALKBH3 mRNA inhibits gastric cancer progression. Clinical and Translational Medicine 2024; 14(8): e1811.

Cui Q., Yin K., Zhang X., Ye P., Chen X., Chao J., Meng H., Wei J., Roeth D., Li L., Qin Y., Sun G., Zhang M., Klein J., Huynhle M., Wang C., Zhang L., Badie B., Kalkum M., He C., Yi C., Shi Y. Targeting PUS7 suppresses tRNA pseudouridylation and glioblastoma tumorigenesis. Nature Cancer 2021; 2(9): 932-949.

Darvish H., Azcona LJ., Alehabib E., Jamali F., Tafakhori A., Ranji-Burachaloo S., Jen JC., Paisán-Ruiz C. A novel PUS7 mutation causes intellectual disability with autistic and aggressive behaviors. Neurology Genetics 2019; 5(5): e356

Decatur WA., Fournier MJ. rRNA modifications and ribosome function. Trends in Biochemical Sciences 2002; 27(7): 344-351.

Del Campo M., Kaya Y., Ofengand J. Identification and site of action of the remaining four putative pseudouridine synthases in Escherichia coli. RNA 2001; 7(11): 1603-1615.

Du J., Gong A., Zhao X., Wang G. Pseudouridylate synthase 7 promotes cell proliferation and invasion in colon cancer through activating PI3K/AKT/mTOR signaling pathway. Digestive Diseases and Sciences 2022; 67(4): 1230-1239.

Frye M., Harada BT., Behm M., He C. RNA modifications modulate gene expression during development. Science 2018; 361(6409): 1346-1349.

Gietz RD., Schiestl RH. High-efficiency yeast transformation using the LiAc/SS carrier DNA/PEG method. Nature Protocols 2007; 2(1): 31-34.

Guegueniat J., Halabelian L., Zeng H., Dong A., Li Y., Wu H., Arrowsmith CH., Kothe U. The human pseudouridine synthase PUS7 recognizes RNA with an extended multi-domain binding surface. Nucleic Acids Research 2021; 49(20): 11810-11822.

Gutgsell N., Englund N., Niu L., Kaya Y., Lane BG., Ofengand J. Deletion of the Escherichia coli pseudouridine synthase gene truB blocks formation of pseudouridine 55 in tRNA in vivo, does not affect exponential growth, but confers a strong selective disadvantage in competition with wild-type cells. RNA 2000; 6(12): 1870-1881.

Han ST., Kim AC., Garcia K., Schimmenti LA., Macnamara E., Network UD., Gahl WA., Malicdan MC., Tifft CJ. PUS7 deficiency in human patients causes profound neurodevelopmental phenotype by dysregulating protein translation. Molecular Genetics and Metabolism 2022; 135(3): 221-229.

Jalan A., Jayasree PJ., Karemore P., Narayan KP., Khandelia P. Decoding the 'Fifth' Nucleotide: Impact of RNA Pseudouridylation on Gene Expression and Human Disease. Molecular Biotechnology 2023; 66(7): 1581-1598.

Jin H., Huo C., Zhou T., Xie S. m^1A RNA modification in gene expression regulation. Genes 2022; 13(5): 910.

Kavakli IH., Baris I., Tardu M., Gül Ş., Öner H., Çal S., Bulut S., Yarparvar D., Berkel Ç., Ustaoğlu P., Aydın C. The photolyase/cryptochrome family of proteins as DNA repair enzymes and transcriptional repressors. Photochemistry and Photobiology 2017; 93(1): 93-103.

Krasikova Y., Rechkunova N., Lavrik O. Nucleotide excision repair: from molecular defects to neurological abnormalities. International Journal of Molecular Science 2021; 22(12): 6220.

Lee GS., Fink GR. Base alterations in yeast induced by alkylating agents with differing Swain-Scott substrate constants. Journal of Molecular Biology 1992; 223(3): 617-26.

Li X., Zhu P., Ma S., Song J., Bai J., Sun F., Yi C. Chemical pulldown reveals dynamic pseudouridylation of the mammalian transcriptome. Nature Chemical Biology 2015; 11(8): 592-597.

Lo HL., Nakajima S., Ma L., Walter B., Yasui A., Ethell DW., Owen LB. Differential biologic effects of CPD and 6-4PP UV-induced DNA damage on the induction of apoptosis and cell-cycle arrest. BMC Cancer 2005; 5: 1-9.

Lovejoy AF., Riordan DP., Brown PO. Transcriptome-wide mapping of pseudouridines: pseudouridine synthases modify specific mRNAs in S. cerevisiae. Plos One 2014; 9(10): e110799.

Ma W., Resnick MA., Gordenin DA. Apn1 and Apn2 endonucleases prevent accumulation of repair-associated DNA breaks in budding yeast as revealed by direct chromosomal analysis. Nucleic Acids Research 2008; 36(6): 1836-1846.

Nakamoto MA., Lovejoy AF., Cygan AM., Boothroyd JC. mRNA pseudouridylation affects RNA metabolism in the parasite Toxoplasma gondii. RNA 2017; 23(12): 1834-1849.

Parisien M., Yi C., Pan T. Rationalization and prediction of selective decoding of pseudouridine-modified nonsense and sense codons. RNA 2012; 18(3): 355-367.

Purchal MK., Eyler DE., Tardu M., Franco MK., Korn MM., Khan T., McNassor R., Giles R., Lev K., Sharma H., Monroe J., Mallik L., Koutmos M., Koutmou KS. Pseudouridine synthase 7 is an opportunistic enzyme that binds and modifies substrates with diverse sequences and structures. Proceedings of the National Academy of Sciences 2022; 119(4): e2109708119.

Schwartz S., Bernstein DA., Mumbach MR., Jovanovic M., Herbst RH., León-Ricardo BX., Engreitz JM., Guttman M., Satija R., Lander ES., Fink G., Regev A. Transcriptome-wide mapping reveals widespread dynamic-regulated pseudouridylation of ncRNA and mRNA. Cell 2014; 159(1): 148-162.

Shaheen R., Tasak M., Maddirevula S., Abdel-Salam GMH., Sayed IS., Alazami AM., Al-Sheddi T., Alobeid E., Phizicky EM., Alkuraya FS. PUS7 mutations impair pseudouridylation in humans and cause intellectual disability and microcephaly. Human Genetics 2019; 138(3): 231-239.

Song D., Guo M., Xu S., Song X., Bai B., Li Z., Chen J., An Y., Nie Y., Wu K., Wang S., Zhao Q. HSP90-dependent PUS7 overexpression facilitates the metastasis of colorectal cancer cells by regulating LASP1 abundance. Journal of Experimental & Clinical Cancer Research 2021; 40(1): 170.

Tardu M., Jones JD., Kennedy RT., Lin Q., Koutmou KS. Identification and quantification of modified nucleosides in Saccharomyces cerevisiae mRNAs. ACS chemical Biology 2019; 14(7): 1403-1409.

Winzeler EA., Shoemaker DD., Astromoff A., Liang H., Anderson K., Andre B., Bangham R., Benito R., Boeke JD., Bussey H., Chu AM., Connelly C., Davis K., Dietrich F., Dow SW., El Bakkoury M., Foury F., Friend SH., Gentalen E., Giaever G., Hegemann JH., Jones T., Laub M., Liao H., Liebundguth N., Lockhart DJ., Lucau-Danila A., Lussier M., M'Rabet N., Menard P., Mittmann M., Pai C., Rebischung C., Revuelta JL., Riles L., Roberts CJ., Ross-Macdonald P., Scherens B., Snyder M., Sookhai-Mahadeo S., Storms RK., Véronneau S., Voet M., Volckaert G., Ward TR., Wysocki R., Yen GS., Yu K., Zimmermann K., Philippsen P., Johnston M., Davis RW. Functional characterization of the S. cerevisiae genome by gene deletion and parallel analysis. Science 1999; 285(5429): 901-906.

Zhang G., Zhu Y., Tan Y., Chen B., Shan S., Zhang G., Lu J. Higher expression of pseudouridine synthase 7 promotes non-small cell lung cancer progression and suggests a poor prognosis. Journal of Cardiothoracic Surgery 2023; 18(1): 222.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1624-1643, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1624-1643, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Sözcük Tabanlı Duygu Analizi: Sosyal Medya Paylaşımlarına Dayalı E-Ticaret Siteleri Memnuniyet Düzeyi Karşılaştırması**

Ahmet DOĞAN[1*], Nurgül KARA[2]

[1]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 80000, Osmaniye
[2]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 80000, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0002-7116-3558
[2]https://orcid.org/0000-0002-8961-1136
*Sorumlu yazar: ahmetdogan@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 20.12.2024
Kabul tarihi: 02.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
E-Ticaret
Veri madenciliği
Duygu analizi
Sosyal medya
Kelime bulutu analizi

ÖZ

Son yıllarda gelişmekte olan teknolojiler hayatın her alanına ve her bireye doğrudan etki etmektedir. Moore Kanunu ve Yığınsal Dijital Depolama Kuralında da vurgulandığı gibi her geçen gün bilgisayarların işlem gücünün ve depolanan veri miktarının artması, aynı zamanda bu işlemlerin maliyetlerinin azalması bu etkinin yaygınlaşmasını kolaylaştırmaktadır. İnternet ortamında bireylerin hemen hemen tüm işlemlerinin kayıt altına alınması, saklanması ve maliyetlerinin azalması büyük bir veri yığının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Büyük veri yığını oluşturan platformlardan birisi de sosyal medyadır. Sosyal medya platformları arasında popüler platformlardan biri de X'tir. Her gün kullanıcıların paylaştıkları milyonlarca veri bulunmaktadır. Son yıllarda araştırmacıların ilgisini çeken bu veriler, birçok çalışmada kullanılmaktadır. Bu makalenin amacı, Türkiye'deki e-ticaret sitelerine yönelik müşteri memnuniyet düzeylerinin sosyal medya paylaşımlarına dayalı olarak duygu analizi yöntemiyle ölçülmesidir. Çalışmada, Trendyol, Sahibinden, Hepsiburada ve Amazon e-ticaret siteleri hakkında X'te paylaşılan gönderiler veri olarak kullanılmıştır. R Studio ortamında, R programlama dili yardımıyla veriler analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, müşteri memnuniyet düzeylerinin genel olarak olumlu olduğunu ve Hepsiburada'nın en yüksek memnuniyeti sağlayan platform olarak öne çıktığını ortaya koymuştur.

Lexicon-Based Sentiment Analysis: Comparison of Customer Satisfaction Levels of E-Commerce Websites Based on Social Media Posts

Research Article

Article History:
Received: 20.12.2024
Accepted: 02.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
E-commerce
Data mining
Sentiment analysis
Social media
Word cloud analysis

ABSTRACT

Developing technologies in recent years have directly impacted every aspect of life and every individual. As emphasized by Moore's Law and the principle of mass digital storage, the increasing processing power of computers, the growing amount of data stored daily, and the decreasing costs of these processes have facilitated the widespread impact of this development. The recording and storage of almost all online transactions of individuals, along with reduced costs, have led to the accumulation of massive amounts of data One of the platforms that generate a massive amount of data is social media. X, one of the most popular social media platforms, has millions of users who share data daily. These data, which have attracted the attention of researchers in recent years, are used in many studies. The article aims to measure customer satisfaction levels regarding e-commerce sites in Türkiye using a sentiment analysis method based on social media posts. In the study, posts shared on the X platform related to the e-commerce websites Trendyol, Sahibinden,

** Bu çalışma, ikinci yazarın birinci yazar danışmanlığında hazırladığı yüksek lisans tezinden üretilmiştir

Hepsiburada, and Amazon were used as data. Data have been analyzed using the R programming language within the R Studio environment. The analysis of the four most used e-commerce sites in Türkiye revealed that customer satisfaction levels were generally positive, with Hepsiburada standing out as the platform with the highest satisfaction.

To Cite: Doğan A., Kara N. Sözcük Tabanlı Duygu Analizi: Sosyal Medya Paylaşımlarına Dayalı E-Ticaret Siteleri Memnuniyet Düzeyi Karşılaştırması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1624-1643.

1. Giriş

Son yıllarda sosyal ağlar; mobil bağlantı ve bilgi paylaşımı gibi iletişim ve bilgi araçlarını bünyesinde barındırmanın verdiği güçle dünya çapında popüler sanal topluluklar haline gelmiştir (Muliadi ve ark., 2024). Sosyal medya (Facebook, X, Instagram vb.), firmaların markaları ve ürünleri hakkında bilgi paylaşabilecekleri, müşterilerin ağlarındaki kişilerle iletişim kurabilecekleri ve çeşitli içerikler paylaşabilecekleri etkileşimli platformlardır. Sosyal medya yalnızca işletmelerin müşterileri çekme ve elde tutma biçimini değiştirmekle kalmayıp, aynı zamanda müşterilerin birbirleriyle ve şirketlerle etkileşime girmesine de olanak tanımaktadır (Kumar ve ark., 2017). Bu yapısıyla sosyal medya platformları, iletişim, bilgi paylaşımı ve fikir alışverişi gibi müşteri etkileşim davranışlarını geliştirmek için çok önemli fırsatlar sunmaktadır (Bozkurt ve ark., 2021; Lian ve ark., 2024). Örneğin; günümüz dünyasında tüketiciler Turkcell'in Instagram paylaşımının altına sorularını veya şikayetlerini yazabilir, Arçelik'in X'te paylaştığı tweet'i retweetleyebilir veya Samsung cep telefonuyla çektikleri resimleri Instagram'da Samsung'u etiketleyerek paylaşabilir (Bozkurt, 2022). Bir başka örnek, Çin'de faaliyet gösteren ünlü şekerleme şirketi Guanshengyuan'ın eski başkanının, Nisan 2016'da turistik bir yeri ziyaret ederken ağaçta oturan bir maymunun yanlışlıkla üzerine taş düşürmesi sonucu hayatını kaybetmesiyle ilgilidir. Eski başkanın bu olaydan yıllar önce şirketten emekli olmasına ve şirkette herhangi bir rolünün olmamasına rağmen, olayla ilgili çok yoğun sosyal medya tartışmaları yaşanmıştır. Bu paylaşım ve tartışmaların ne kadar etkili olduğu Çin'in en büyük arama motoru olan "Baidu Arama Endeksi"nin paylaştığı verilerde görülmüştür. Nisan 2016 verileri, "Guanshengyuan" ile ilgili haberler için arama hacminde bir zirveye ulaşıldığını göstermektedir (Ren ve ark., 2024). Örneklerde de görüldüğü gibi, sosyal medya platformlarındaki buna benzer aktivitelerin insan davranışlarını geleneksel medyadan daha fazla etkilediğini söylemek mümkündür (Bozkurt, 2022).

Sosyal medya, kullanıcıların deneyimlerini paylaşmak ve diğer kullanıcıların görüşlerini öğrenmek için son yıllarda muazzam bir büyüme göstermektedir. Sosyal medyanın kullanım oranındaki ve etkisindeki bu artış, şirketlerin tüketicilerle ilişkiler kurarak sosyal medya pazarlama faaliyetlerini kendi avantajlarına kullanmalarına imkân tanımaktadır. Bununla birlikte, sosyal medya müşteriler açısından da son derece güçlü ve etkili araçlar sunmaktadır. Yeni ortamda müşteriler, belirli bir hizmet veya ürün hakkındaki görüşlerini, deneyimlerini ve değerlendirmelerini yayınlayabilecekleri güçlü dijital araçlarla donatılmıştır (Al-Dwairi ve ark., 2024). Kapsamlı araştırmalar, sosyal medyadaki kullanıcı etkileşimlerinin e-ticaret perakendecileri için yeni siparişler ürettiğini göstermiştir. Bu durum, e-ticaret platformlarının çeşitli stratejiler aracılığıyla sosyal medyadan etkili bir şekilde faydalanabileceği

gerçeğini doğrulamaktadır (Shao ve ark., 2024). Türkiye'de toplam nüfus içinde internet kullanım oranının %88,8, internet üzerinden mal veya hizmet satın alma (e-ticaret) oranının %51,7 ve aktif sosyal medya kullanıcı oranının %66,8 olduğu bilinmektedir. Bu veriler, e-ticaret ve sosyal medya ilişkisinin şirketler açısından göz ardı edilemeyecek kadar önemli olduğunu göstermektedir (TÜİK, 2024). Bu ilişki, müşteri tüketim davranışlarında iş birliği kurma, iletişim kurma, hızlı reaksiyon gösterme ve dinamik hareket etme gibi değişimlere dikkat çekerek yeni bir trende işaret etmektedir. E-ticaret sitelerinin bu yeni trendin dışında kalmamaları için, iş modellerinin işleyiş şekline dikkat etmeleri ve sürekli güncel olmaları gerekmektedir. Bu kapsamda, e-ticaret sitelerinin görünürlük, düzenlenebilirlik, kalıcılık ve müşteri ilişkileri gibi sosyal medya uygunluk düzeyleri ne kadar yüksekse, ziyaretçilerin sosyal medyadan e-ticaret platformlarına geçme isteğinin de o kadar yüksek olduğu ve dolayısıyla müşteri memnuniyetinin arttığı belirtilmektedir (Shao ve ark., 2024).

Günümüzde meydana gelen teknolojik gelişmeler, yapılan birçok işlemin elektronik ortamda kayıt altına alınmasını, bu kayıtların kolayca saklanabilmesini ve gerektiği zaman erişilebilmesini kolaylaştırmaktadır (Coşlu, 2013). Günlük hayatımızda yaptığımız her işlemin bir sonucu olarak çok büyük miktarda veri ortaya çıkmaktadır. Ancak bu verilerden elde edilen anlamlı bilginin oranı oldukça düşüktür. Veri madenciliği, büyük miktardaki veriden anlamlı bilgi elde etmek için kullanılan önemli bir tekniktir (Gürsoy, 2009). Bu yöntem, büyük miktardaki veriyi işlemek için farklı algoritmalarla veri analizi tekniklerini birleştirmek amacıyla geliştirilmiştir (Tan ve ark., 2019). Ancak veri madenciliği yapısal verileri analiz etmede kullanılırken, resim dosyaları, PDF, Word, metin belgeleri, web üzerinde tutulan log dosyaları, e-postalar, çizimler, bloglar, çevrimiçi forumlar, anket yanıtları ve sosyal medya paylaşımları gibi yapısal olmayan verilerin analizinde genellikle metin madenciliği, web madenciliği gibi yöntemler tercih edilmektedir (Dolgun ve ark., 2009; Shamshiri ve ark., 2024; Vakulenko ve ark., 2024). Başka bir ifadeyle, metin madenciliği, yapılandırılmamış metin verilerini yapılandırılmış verilere dönüştürme tekniklerini kapsayan bir alandır (Vakulenko ve ark., 2024). Hem veri madenciliği hem de metin madenciliği, duygu analizi için yaygın olarak kullanılan teknikler arasında yer almaktadır. Araştırmamızın temel veri setini oluşturan X verileri, yapısal olmayan web bilgilerini içerdiğinden, metin madenciliği yöntemi kullanılarak duygu analizleri gerçekleştirilmiştir.

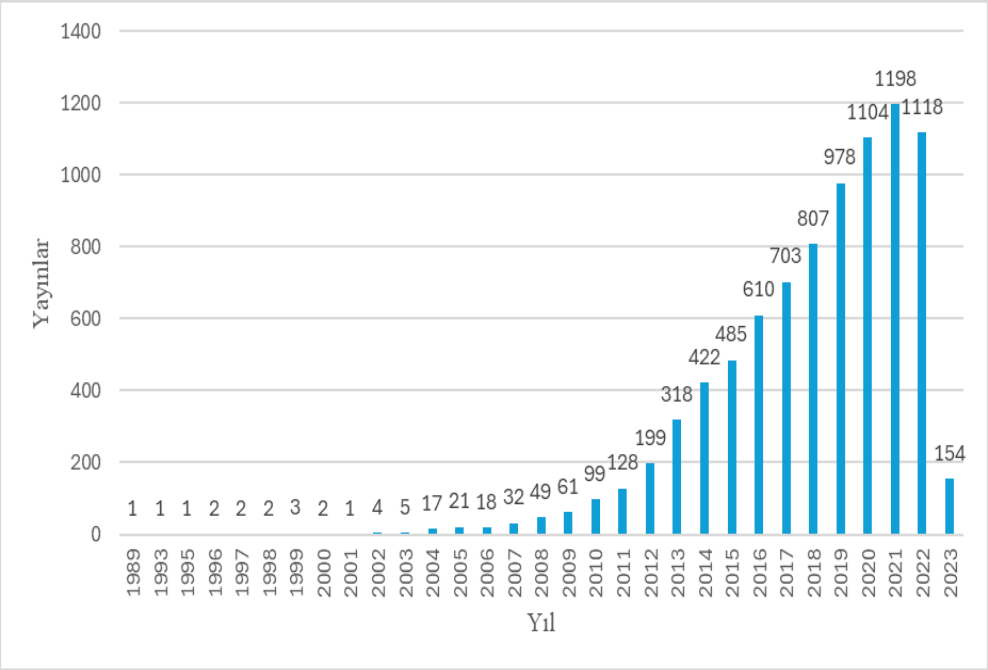
Literatürde fikir madenciliği, his analizi, duygu madenciliği ve duygusallık analizi gibi farklı isimlerle anılan duygu analizi, metin belgelerindeki görüş, duygu ve tutum gibi öznel bilgileri makine öğrenmesi, veri madenciliği ve doğal dil işleme teknikleriyle analiz eden bir araştırma alanıdır (Onan, 2020). Duygu analizi ile metinlerde geçen duygusal kelimelerin çıkarılması ve analiz edilen yazının olumlu, olumsuz veya nötr olarak sınıflandırılması hedeflenmektedir (Göçgün ve Onan, 2021). Duygu analizi, ürün fiyatlandırması, piyasa tahmini, bankacılık sistemlerinde risk tespiti ve seçim tahmini gibi farklı alanlarda kullanışlı analizler sunduğundan, endüstri ve akademi çevrelerinde büyük ilgiyle karşılanmaktadır (Sun ve ark., 2017). İnsanların yaşamları boyunca karar verme sürecinde, sadece mantıklarıyla değil, duygularıyla da karar verdikleri düşünüldüğünde, geçmişten günümüze duyguya

verilen önemin arttığı ve bu konuyla ilgili pek çok araştırmanın yapıldığı görülmektedir. Bu araştırmalarla birlikte, duygu analizinin kullanım alanı her geçen gün yaygınlaşmaktadır.

Çalışmanın ikinci kısmında, ulusal ve uluslararası çalışmaların yer aldığı literatür değerlendirmesi ile bu çalışmanın teorik önemi ortaya konulmaktadır. Üçüncü kısımda, araştırmada kullanılan veri seti ve yöntemin ele alındığı uygulama sunulmaktadır. Daha sonraki kısımda ise bulgular ve tartışmaya yer almaktadır. Son kısım ise çalışmanın sonuçları içermektedir. Bu çalışma temelde, duygu analizi uygulamalarının e-ticaret sitelerinin iş modellerinin işleyiş şekline nasıl katkıda bulunabileceğini göstermeyi amaçlamaktadır. Belirlenen e-ticaret siteleri hakkında duygu analizi gerçekleştirilerek X'te yer alan sosyal medya paylaşımları aracılığıyla olumlu, olumsuz ve nötr çıkarımlarda bulunulmuş ve müşteri memnuniyet düzeyine göre sıralama yapılmıştır. Bu kapsamda, müşteri memnuniyet düzeyi en yüksek olan sitenin belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylelikle, toplamda 15264 gönderi verisi kullanılarak, X kullanıcılarının Türkiye'de en çok tercih edilen dört e-ticaret sitesi hakkındaki duyguları analiz edilmiştir. Çalışma, belirlenen amaçlar doğrultusunda literatüre yeni bir bakış açısı getirmeyi ve katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, Türkiye'de en çok kullanılan dört e-ticaret sitesini (Trendyol, Sahibinden, Hepsiburada ve Amazon) ele alması, sözcük tabanlı bir yaklaşımın kullanılması ve duygu analizinin RStudio ortamında R diliyle gerçekleştirilmesi bakımından literatürden farklılaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, bu çalışmanın oluşumuna katkı sağlamak ve yapılacak diğer çalışmalara ışık tutmak amacıyla konuya ilişkin niteliklere sahip çalışmalardan da bahsetmenin uygun olacağı düşünülmektedir.

2. Alanyazın incelemesi

Sosyal medya, e-ticaret ve duygu analizi üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir (Al-Dwairi ve ark., 2024; Banerji ve Singh, 2024; Bu ve ark., 2024; DaSouza ve Church, 2024; Shi ve ark., 2024; Song ve ark., 2024). Literatürde sosyal medya ve e-ticaret ilişkisi ile ilgili duygu analizi çalışmalarına bakıldığında, genellikle belirli bir konu veya ürün üzerine yapılan analizlerin ya da farklı duygu analizi yaklaşımlarının karşılaştırıldığı çalışmaların çoğunlukta olduğu görülmektedir. Yöntem açısından ise, duygu analizi sınıflandırılmalarında ağırlıklı olarak makine öğrenmesi yaklaşımlarının tercih edildiği tespit edilmiştir. Alanyazın incelemesi sonucunda, araştırma kapsamına dâhil edilen bazı çalışmalar aşağıdaki sunulmuştur.



Şekil 1. DBLP trendlerine göre 1989'dan günümüze "Duygu Analizi" araştırmalarının artan popülerlik eğilimleri (Bu ve ark., 2024)

Shoeb ve Ahmed (2017), sosyal medya kullanıcılarının X paylaşımları üzerine duygu analizi gerçekleştirmek için Karar Ağacı, K-En Yakın Komşu ve Naive Bayes sınıflandırıcıları arasından hangisinin daha doğru ve kesin tahminler sunduğunu veri madenciliği yöntemlerinden faydalanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında, Karar Ağacı sınıflandırıcısının diğerlerine göre daha doğru ve kesin tahminlerde bulunduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Albayrak ve ark. (2017), sosyal medyada tartışılan bir konu üzerine duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen bulgulara göre, sosyal medya tepkilerinin karar alma mercilerinin tutumunu belirleyebileceği, sosyal medyanın gücünden faydalanılarak toplulukların sesini daha hızlı ve etkili bir şekilde duyurabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Sari ve ark. (2018), çalışmalarında Naive Bayes sınıflandırma metodolojisini kullanarak Endonezya'daki en büyük e-ticaret hizmet sağlayıcılarından biri olan Tokopedia'nın hizmet kalitesi ile ilgili çevrimiçi yorumların duygu analizini gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, kişiselleştirme ve güvenilirlik boyutlarının yüksek negatif duygular içerdiğini ve daha fazla dikkat gerektirdiğini ortaya koymuştur. Buna ek olarak, güven ve web tasarımı boyutlarının yüksek pozitif duygular içerdiği, dolayısıyla e-ticaret sitesi hizmet kalitesinin bu anlamda çok iyi olduğu vurgulanmıştır. Cevap verebilirlik boyutunun ise pozitif ve negatif duygular arasında dengeli bir dağılım gösterdiği belirtilmiştir.

Karamanlı (2019), ürün alımı yapan müşterilerin yorumları üzerinden makine öğrenmesi yöntemlerinden yararlanarak duygu analizini ölçmüştür. Çalışmasında, Destek Vektör Makineleri algoritmasına göre negatif yorum tahmininde doğruluk oranının %77,69, pozitif yorum tahmininde doğruluk oranının ise %74,19 olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Aydoğan ve Şener (2020), çalışmalarında e-ticaret sitesi kullanıcılarının ürünlere yapılan yorumları üzerinden duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Yeni bir hibrit öneri sistemi geliştirilerek, olumlu olumsuz ve tarafsız olarak sınıflandırılan yorumlarla birlikte diğer kullanıcılara ürün tavsiyesinde bulunmak hedeflenmiştir.

Göçgün ve Onan (2021), Amazon'da satılan bir ürünün yorumları üzerinden makine öğrenmesi teknikleriyle duygu analizi gerçekleştirmiştir. 4 farklı makine öğrenmesi yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmada Karar ağacı algoritmasının, Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri ve Lojistik Regresyon yöntemlerine göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Kumaş (2021), sosyal medya platformu X verileri üzerinde çeşitli makine öğrenmesi yaklaşımlarını kullanarak duygu analizi gerçekleştirmiştir. Buna göre, Naive Bayes, KNN, Destek Vektör Makinesi, Lojistik Regresyon ve Karar Ağacı sınıflandırma algoritmaları kullanılarak yapılan analizlerde Destek Vektör Makinesinin en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir.

Gümüş (2022), duygu analizi yönteminin pazarlama alanındaki kullanım imkanlarını ortaya çıkarmaya yönelik bir çalışma ortaya koymuştur. Çalışmada, pazarlama alanında bireylerin veya şirketlerin ne yapması ve ne yapmaması gerektiği, değişim ve gelişim süreçleri ve gerçekleştirecekleri eylemlere ilişkin karar verme sürecinde duygu analizinin önemli bir rol oynadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Huang ve ark. (2023), e-ticaret platformlarında kullanılan duygu analizi yöntemleri üzerine bir literatür araştırması sunmuştur. Bu araştırmaya göre, incelenen makalelerde analizlerin %48'inin makine öğrenmesi, %24'ünün derin öğrenme ve %7'sinin her iki yöntemin birlikte kullanıldığı karma yaklaşımlar ile ele alındığı belirlenmiştir. Ayrıca, bu analizlerde veri seti kaynağı olarak araştırmacılar tarafından en çok Amazon ve X'in tercih edildiği vurgulanmıştır.

Kılıçer ve Şamlı (2023), e-ticaret sitelerindeki elektronik cihazlar hakkında yapılan yorumlardan oluşan bir veri seti üzerinde çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarını (K-En Yakın Komşu, K-Star, Naive Bayes, Naive Bayes Multinomial, Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makinesi, Karar Ağacı ve Rastgele Orman) kullanarak duygu analizi gerçekleştirmiştir. Elde edilen duygu durumları pozitif, negatif ve nötr olarak sınıflandırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, en yüksek doğruluk oranı Naive Bayes Multinominal ve Rastgele Orman algoritmaları ile elde edilmiştir.

Bozkurt ve Yalçın (2024) topluluk öğrenmesine dayalı duygu analizi ile Amazon yemek yorumları üzerine yaptıkları çalışmada, Rastgele Orman, CatBoost ve XGBoost topluluk öğrenme modellerini kullanarak olumlu, olumsuz ve nötr duyguları sınıflandırmıştır. Analiz sonucunda, Rastgele Orman yaklaşımının en başarılı sonucu verdiği tespit edilmiştir.

Cheng ve ark. (2024), çalışmalarında işletmelerin sosyal medya sayfalarında kullanıcı etkileşimi kapsamında kullanıcı yorumları ve firma yanıtlarının rolleri üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM), XGBoost, Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makinesi ve Bayes Regresyonu duygu analizi sınıflandırıcıları kullanılarak analizler yapılmıştır. Birden fazla ABD perakende firmasına ait Facebook işletme sayfalarından elde edilen veriler analiz edilerek, firmaların genellikle olumsuz yorumlara yanıt verme olasılığının daha yüksek olduğu, ancak çeşitli görüş ve

duyguları tetikleyen tartışmalı yorumlara yanıt verme olasılıklarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak, olumsuz ve tartışmalı yorumlarla etkileşime girmenin ve yorumlara hızlı bir şekilde yanıt vermenin, sonraki kullanıcı yorumlarının hacmini artırdığı ve bu yorumlardaki duygu durumunun daha olumsuz olmasına yol açtığı da gözlemlenmiştir.

Görmez ve ark. (2024), e-ticaret sitelerinde, sosyal medyada veya diğer dijital platformlarda üretilen metinsel verilerin analizlerinde sıklıkla duygu analizi yönteminin kullanıldığını vurgulamıştır. Bu analizlere destek olmak için derin öğrenme yaklaşımlarının ön işlem sürecinde kullanılabileceği ve başarılı sonuçlar elde edilebileceği önerisinde bulunmuştur. Bu kapsamda çalışmada, Evrişimsel Sinir Ağı (CNN), Transformer ve Hibrit olmak üzere üç farklı derin öğrenme yaklaşımı önerilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, veri setlerine ön işlem uygulanıp uygulanmamasına bağlı olarak duygu analizinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.

Daza ve ark. (2024), sosyal medya platformlarında yer alan, e-ticaret ürün incelemelerinde duygu analizi üzerine en çok kullanılan öğeleri, modellerin performansını test etme yöntemlerini, teknikleri, daha başarılı sonuçlar sağlayan yaklaşımları, metrikleri ve programlama dillerini 20 makale üzerinden inceleyerek çıkarımlarda bulunmuştur. Elde edilen bulgulara göre, farklı ürün kategorilerinin en sık kullanılan analiz konuları olduğu, çapraz doğrulamanın model testinde en yaygın yöntem olarak kullanıldığı, en etkili tekniklerin Destek Vektör Makineleri ve LSTM (uzun kısa süreli bellek) olduğu, en önemli metriklerin F1-Skoru olduğu ve modellerin geliştirilmesinde en çok kullanılan programlama dilinin Python olduğu ortaya konmuştur.

Rasappan ve ark. (2024), e-ticaret platformlarında yer alan kullanıcı yorumlarını duygu analizi yöntemi ile incelemiştir. Yeni ve optimize edilmiş bir makine öğrenimi algoritması ile gerçekleştirilen çalışmada, Amazon verilerine dayalı olarak alışveriş yapanların yorumları olumsuz, olumlu veya nötr sınıflara ayrılmaktadır. Analiz sonuçlarının, önerilen modelin duygu sınıflandırmasında diğer modellerden daha üstün olduğunu gösterdiği belirtilmiştir.

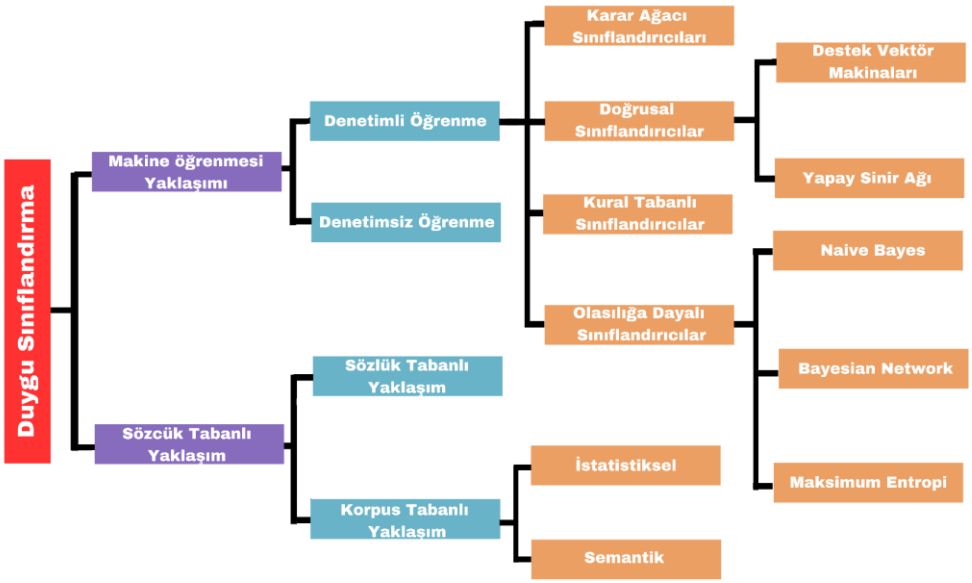
Shi ve ark. (2024), çalışmalarında Gana'daki 232 mezundan oluşan bir örneklem üzerinde araştırma yaparak, sosyal medya-e-ticaret adaptasyonunun ve öncüllerinin girişimcilik üzerindeki etkilerine odaklanan teorik bir model önermiştir. Elde edilen bulgular, sosyal medya-e-ticaret adaptasyonunun girişimcilik üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Bir diğer önemli bulgu ise, öncüller (temel nedenler) bağlamında içsel faktörlerin (sosyal etki, hazcı motivasyonlar, alışkanlık vb.), sosyal medya ve e-ticaretin kabulü üzerinde dışsal faktörlere (performans beklentisi, çaba beklentisi, kolaylaştırıcı koşullar vb.) göre daha olumlu bir etkiye sahip olduğudur.

3. Materyal ve Metot

Görüş analizi veya görüş madenciliği olarak da adlandırılan duygu analizi, bir metin parçasının içeriğinden iletilen duyguları türetmekle ilgilenir (Wankhade ve ark., 2022). Duygu analizi, doğal dil işleme, metin analizi ve hesaplamalı teknikler kullanarak duygu yorumlarından duygu çıkarımını veya sınıflandırmasını otomatikleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu duygu ve görüşlerin analizi, tüketici bilgileri,

pazarlama, kitaplar, uygulamalar, web siteleri ve sosyal medya gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Hussein, 2018). Bir başka ifadeyle, duygu analizi, olayların ait olduğu duygu sınıfını belirlemeye çalışan ve algılanan sözcük niteliklerini pozitif, negatif veya nötr olarak üç kategoriye ayıran doğal dil işleme alt alanıdır (Rysbek, 2019). Otomatik duygu analizinin, ürün ve hizmetlerine yönelik müşteri duygu ve görüşlerini ortaya çıkarmak için kullanıcı yorumları ve sosyal medya içeriklerini analiz etmek isteyen kamu ve özel kuruluşların büyük ilgisini çektiğini söylemek mümkündür (Khoo ve Johnkhan, 2018).

Duygu analizi yapılırken farklı sınıflandırma teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler, temel olarak sözcüğe dayalı yöntemler ve makine öğrenmesine dayalı yöntemler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Oğuzlar ve Kızılkaya, 2019; Amanet, 2020). Şekil 2'de, ana kategoriler ve bunlara ait alt dalların yöntemleri gösterilmektedir.



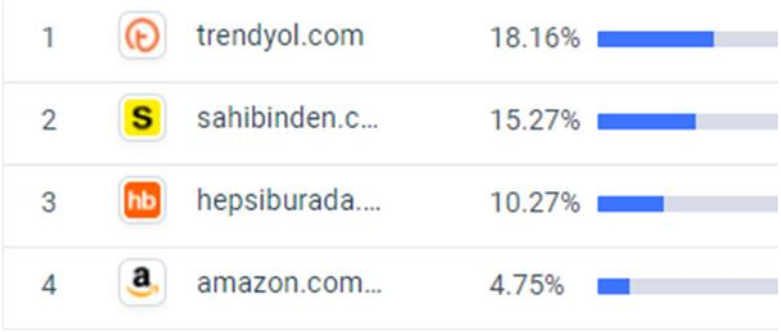
Şekil 2. Duygu analizi yöntemleri (Amanet, 2020)

Çalışmada, müşteri yorumlarına dayalı duygu analizi için X paylaşımlarından elde edilen veriler kullanılmaktadır. Yöntem olarak sözcük tabanlı duygu analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Sözlük tabanlı yaklaşımlar, metnin anlamsal yöneliminin, içinde bulunan kelimelerin ve ifadelerin kutupluluğuyla kesin olarak ilişkili olduğu varsayımına dayanmaktadır (Taboada ve ark., 2011; Catelli ve ark., 2022). Bu yaklaşım, daha anlaşılır olup makine öğrenimi tabanlı algoritmaların aksine uygulaması daha kolaydır (Sadia ve ark., 2018). Sözcük tabanlı duygu analizi (STDA), içeriğinde yer alan sözcüklerin pozitif, negatif veya nötr kutuplu olacak şekilde duygu yönünü belirleyen ve aynı zamanda sayısal duygu puanlarını içeren bir veri tabanıdır (Sağlam, 2019).

X'ten gönderilerin çekilmesi, verilerin ön işlenmesi ve yapılan duygu analizi işlemleri RStudio ortamında, R dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. RStudio, R dili için entegre bir geliştirme ortamı (IDE)'dır. R ise, hem ücretsiz bir yazılım dili hem de basit matematiksel hesaplamalardan karmaşık

istatistiksel analizlere kadar geniş bir yelpazede işlemler gerçekleştirilebilen ve grafiksel gösterimler sunabilen kapsamlı bir paket programdır (Kurt, 2019).

Çalışma kapsamında, Türkiye'de en çok kullanılan e-ticaret siteleri araştırılmış ve ilk dört site belirlenmiştir. Daha fazla e-ticaret sitesinin seçilmeme nedeni, diğer e-ticaret sitelerine yönelik X paylaşımlarının az olması ve Türkiye'deki pazar payının düşük olmasıdır. Şekil 3'te görüldüğü üzere, Türkiye'de en çok kullanılan dört e-ticaret sitesi sırasıyla Trendyol, Sahibinden, Hepsiburada ve Amazon'dur (Similarweb, 2023).



Şekil 3. E-ticaret siteleri

Çalışmada kullanılan veriler X'den çekilmiştir. X'den veri çekmek için kişisel X hesabı ile API (Application Programming Interface – Uygulama Programlama Arayüzü) arayüzünden gerekli izinler alınmıştır. Bu izinlerin alınmasının ardından, dört adet kişiye özel bilgi elde edilmiştir. Bunlar API Key, API Secret, Access Token ve Access Secret'tır. Bu dört bilgi, X'e bağlanarak veri çekmek için kullanılmıştır. X'de ilgili e-ticaret siteleri için yapılan Türkçe paylaşımlar 10.02.2023-16.05.2023 tarihleri arasında RStudio aracılığıyla çekilmiştir. Buna göre Trendyol için 3614, Sahibinden için 3801, Hepsiburada için 2765 ve Amazon için 5084 olmak üzere toplam çekilen gönderi sayısı 15264'tür.

Veriler analiz edilmeden önce işe yaramayan veriler ön işleme aşamasına tabi tutulmalıdır. Verilerin ham haline ilişkin Trendyol örneğinin ilk altı satırı aşağıda verilmiştir.

Trendyol'a ilişkin atılan ham gönderiler;

[1] "@Trendyol kardeşim ne istiyorsun benden öldüm açlıktan girince uygulama kapanıyor, va…"

[2] "@MagnumTurkiye @MagnumSA @Trendyol @MagnumIceCream @AlgidaTurkiye \r\nBu nedir? Bir he…"

[3] "4 gündür istanbuldan İstanbula kargo gelemedi. Seçim Trendyol Expressi de etkiledi."

[4] "@Trendyol indirimli menü siparişi ilk defa verdim daha öncesinde aldığım tüm ürünler v…"

[5] "@Trendyol her gün aynı adrese yemek getiren firma konum uymuyor diye siparişimi iptal …"

[6] "Arkadaşlar Trendyol'daki sepetimizden triko filan alınıyordu sesimiz çıkmıyordu ama Me…"

X'ten çekilen ham veriler; kısaltmalar, noktalama işaretleri ve semboller gibi gereksiz ögeleri de içermektedir. Bu nedenle, veriler analiz edilmeden önce ön işleme aşamasına tabi tutulmuştur. Buna göre gönderiler noktalama işaretleri ve sayılardan temizlenmiştir. Temizleme işlemi ile beraber bütün büyük harfler küçük harflere dönüştürülmüştür. Gönderiler içerisindeki "@", "#" gibi ifadeler ve URL

formatında web sitesi adresleri silinmiştir. Cümle içinde yer alan ancak cümleye anlam katmayan önemsiz kelimelerinin (stopwords) gönderilerden çıkarılması gerekmektedir. R yazılımında farklı diller için hazır halde bulunan önemsiz kelime veri setleri (stopwords korpusları) bulunmaktadır. Ancak Türkçe önemsiz kelimeler korpusu henüz geliştirilip R kütüphanesine eklenmediği için 498 kelimeden oluşan önemsiz kelimeler korpusu oluşturulmuş gönderilerdeki önemsiz kelimeler temizlenmiştir. Ayrıca, temizleme işleminden sonra oluşan fazla boşluklar da giderilmiştir. Tüm temizleme adımlarının ardından, veri seti içinde aynı içeriğe sahip olan gönderilerden yalnızca bir tanesi bırakılarak veri setinden tekrar edenler çıkarılmıştır. Satır silme işlemi sonucunda, Trendyol için 2778, Sahibinden için 2258, Hepsiburada için 1659 ve Amazon için 3272 olmak üzere toplam 9967 adet gönderi kalmıştır.
Trendyol'a ilişkin ön işlemi tamamlanmış gönderiler;
[1] "trendyol kardeşim istiyorsun öldüm açlıktan girince uygulama kapanıyor valla öliyim zaman"
[2] "magnumturkiye magnumsa trendyol magnumicecream algidaturkiye nedir hevesle açtığım dondurma …"
[3] "gündür istanbuldan istanbula kargo gelemedi seçim trendyol expressi etkiledi "
[4] "trendyol indirimli menü siparişi verdim öncesinde aldığım tüm ürünler siparişler yüksek fiya…"
[5] "trendyol gün aynı adrese yemek getiren firma konum uymuyor siparişimi iptal edip parama el k…"
[6] "arkadaşlar trendyoldaki sepetimizden triko filan alınıyordu sesimiz çıkmıyordu mercedes benz…"

Veriler, ön işleme aşamasının tamamlanmasının ardından analize hazır hale gelmektedir. Sözlük tabanlı yaklaşımda, hangi kelimelerin ve ifadelerin olumlu ve hangilerinin olumsuz olduğuyla ilgili bilgi içeren duygu sözlüğü kullanılması gerekmektedir (Bonta ve ark., 2019). Bu doğrultuda, analiz yapılmadan önce çalışmada sözcük tabanlı yöntem kullanıldığı için kelimelerin pozitif ve negatif puanlarını içeren bir sözlüğe ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada SWNetTR++ duygu sözlüğü kullanılmıştır. "SWNetTR++, Genel Amaçlı Türkçe Duygu Sözlüğü olup Fatih Sağlam'ın 2019 yılındaki doktora tezinde geliştirilmiştir. Bu sözlükte yaklaşık 49227 kelime ve kelime grubu bulunmaktadır." (Sağlam, 2019).

4. Bulgular ve Tartışma

Çalışmanın bu kısmında, ilgili e-ticaret sitelerine yönelik X aracılığıyla toplanan gönderilerin duygu analizi kapsamında elde edilen bulgularına yer verilmiştir. Bu bulgular, duygu kutbu ve kelime bulutu olmak üzere iki başlık altında ele alınmıştır. Duygu kutbu hesaplanırken, ön işleme aşamasının tamamlanmasının ardından elde edilen tüm gönderiler için duygu puanı hesaplanmış ve bu puanların ortalaması alınmıştır. Bir gönderinin duygu puanının 0 olması, o gönderide duygu ifade eden hiçbir kelimenin yer almaması ya da pozitif ve negatif kelime sayılarının birbirine eşit olması anlamına gelmektedir. Bu tür gönderilerin duygu kutbu nötr olarak kabul edilmektedir (Oğuzlar & Kızılkaya, 2019). Bir gönderinin duygu puanı 0'dan büyükse duygu kutbu pozitif, 0'dan küçükse duygu kutbu negatif olarak sınıflandırılmıştır.

Yapılan analiz sonucunda, Trendyol, Sahibinden, Hepsiburada ve Amazon e-ticaret sitelerine ilişkin toplam cümle sayısı, toplam kelime sayısı ve duygu kutbu ortalaması tespit edilmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. E-ticaret sitelerine ilişkin duygu kutupları

	Toplam cümle	**Toplam kelime**	**Ortalama kutup**
Trendyol	2778	28179	17210
Sahibinden	2258	22619	13721
Hepsiburada	1659	17141	17476
Amazon	3272	35246	29503

İlgili e-ticaret siteleri karşılaştırılmasına bakıldığında, müşterilerinin memnuniyet düzeylerinin 0'dan büyük olması sebebiyle, e-ticaret sitelerinin tamamının duygu kutbunun "P (Pozitif)" olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada dikkate alınan dört e-ticaret sitesinin gönderilerde kullanılan kelime başına duygu kutbu değerlendirildiğinde;

Trendyol için yaklaşık 0,611,

Sahibinden için yaklaşık 0,607,

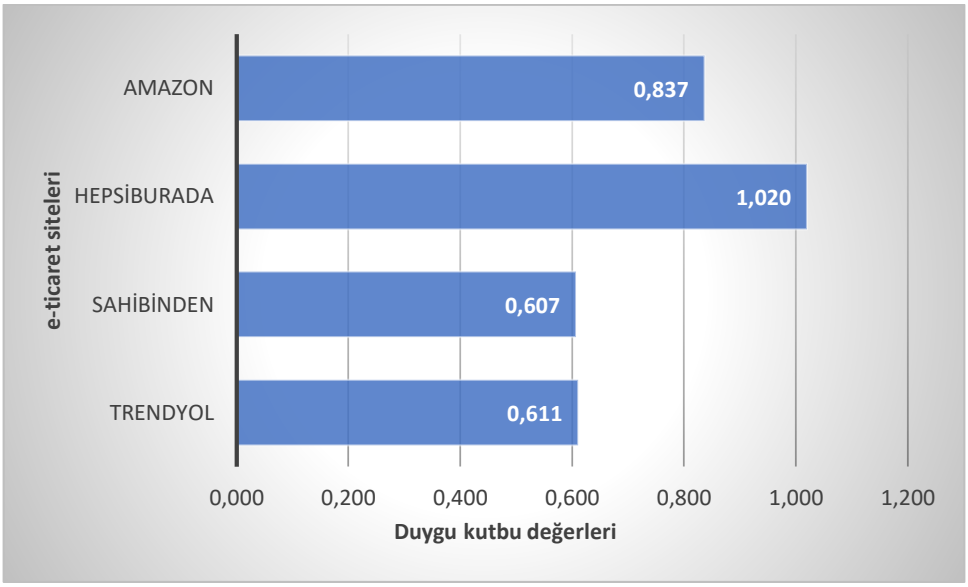
Hepsiburada için yaklaşık 1,020 ve

Amazon için yaklaşık 0,837'dir.

Bu bilgiler doğrultusunda, gönderi yorumlarına göre müşterilerin en memnun olduğu e-ticaret sitesinin Hepsiburada olduğu sonucuna varılmıştır. İlgili dört e-ticaret sitesi, müşteri memnuniyet düzeyine göre en yüksekten en düşüğe sırasıyla Hepsiburada, Amazon, Trendyol ve Sahibinden olarak sıralanmış ve Şekil 4'te sunulmuştur.

Duygu analizi yöntemiyle e-ticaret sitelerinin müşteri memnuniyet düzeyleri karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. Bu analize ek olarak, kelime bulutu analizi de çalışmaya dahil edilerek kullanıcıların araştırmaya konu olan e-ticaret siteleri hakkındaki görüşleri daha geniş bir perspektif ile ele alınmaya çalışılmıştır.

Görselleştirme işlemi esnasında kelime alt sınırı 15, kelime üst sınırı 400 olarak belirlenmiştir. RStudio ortamında gerçekleştirilen kelime bulutu analizi sayesinde, gönderilerde sık tekrarlanan kelimelerle oluşturulan kelime bulutu her e-ticaret sitesi için ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 4. Duygu kutbu değerlerine göre e-ticaret siteleri karşılaştırması



Şekil 5. Trendyol'a ait kelime bulutu

Şekil 5'te görüldüğü gibi Trendyol'a ait gönderilerde en sık kullanılan kelimeler arasında "Trendyol", "sipariş", "ürün", "iade" ve "kargo" yer almaktadır. Bu durum, kullanıcıların platformla en çok etkileşimde bulunduğu alanların sipariş süreci, ürün değerlendirmeleri, iade işlemleri ve kargo hizmetleri olduğunu göstermektedir. Kullanıcı yorumlarında sipariş ve ürün kelimelerinin öne çıkması, alışveriş deneyiminin temel unsurlarına yoğunlaştıklarını gösterirken, "iade" ve "kargo" kelimelerinin sıkça kullanılması, müşteri memnuniyetini etkileyen en kritik konular arasında iade süreçleri ve teslimat hızının yer aldığını düşündürmektedir.



Şekil 6. Sahibinden'e ait kelime bulutu

Şekil 6'ya bakıldığında sahibinden platformuna yönelik kullanıcı yorumlarında, en sık kullanılan kelimeler arasında "sahibinden", "satılık", "ilan", "kiralık" ve "araba"' kelimelerinin yer aldığı görülmektedir. Bu durum, platformun temel işlevlerine dair kullanıcıların en çok hangi konular üzerinde durduğunu göstermektedir. "Satılık" ve "kiralık" kelimelerinin öne çıkması, kullanıcıların büyük ölçüde emlak ve araç alım-satımıyla ilgilendiğini gösterirken, "ilan" kelimesinin yoğun kullanımı, platformun ilan bazlı yapısının kullanıcı deneyiminde önemli bir yer tuttuğunu ortaya koymaktadır. Özellikle "araba" kelimesinin sıkça kullanılması, Sahibinden'in otomotiv sektörü için de yoğun olarak tercih edildiğini göstermektedir.



Şekil 7. Hepsiburada'ya ait kelime bulutu

Şekil 7'de görüldüğü gibi Hepsiburada'ya ait gönderilerde en çok kullanılan kelimeler hepsiburada, merhaba, sepet, özel ve indirimdir. Bu kelimeler, kullanıcıların alışveriş deneyiminde öne çıkan unsurlara işaret etmektedir. "Sepet" kelimesinin sıkça kullanılması, tüketicilerin platformda ürün ekleme ve satın alma süreçlerine yoğunlaştığını gösterirken, "özel" ve "indirim" kelimelerinin ön planda olması, kampanyaların ve fırsatların kullanıcı ilgisini çektiğini göstermektedir. Ayrıca, "merhaba" kelimesinin yaygın kullanımı, müşteri hizmetleriyle olan etkileşimleri ya da platformun kullanıcı dostu iletişim dilini yansıtabileceği gibi, sosyal medya paylaşımlarında sık kullanılan bir selamlama ifadesi olarak da değerlendirilebilir. Bu analiz, Hepsiburada'nın müşteri deneyimini iyileştirmek adına promosyonlar ve kullanıcı dostu alışveriş süreçlerine daha fazla önem vermesi gerektiğini göstermektedir.


amazon
indirim
fırsat
sondakika
için
prime
çok
amazonda
bardakçı
murat
"amazon"
amzn
merhaba
bampını
kaçkını
"sevilayyaziyor
"amazonhelp
trendyol
siparis
ürün
iade
kargo
tesla
türkiye
kitap
satıcı
teslimat
çelik
hafta
erkek
büyük
önemi
hediye
ederiz
nagehan
kilidaroglu
tehdit
kaçkın
olmadan
müşteri
satın
günü
yıl
hatun
farklı
yanlış
olduğu
amazonhelp
gelyor
kadını
şirkeerini
tarafından
etrafa
tüm
beyaz
fiyat
doğru
hocam
pazar
aynı
makinesi
işbirliği
oğlanda
kahve
apple
aws
alışveriş
fiyatı
hatunların
ormanlarında
ssd
ayakkabı
dustyscifi
satış
diğer
işbirliği
amazona
ürünü
teşekkür
amazonun
seti
başka
karaca
hala
güzel
özel
geri
ak
alacağız
bak
takip
varsa
bence
çünkü
şirketini
teslimat
çelik
sinan
üzerinden
dan
aldı
sipariş
ürün
iade
gün
son
iktidar
lira
kadar
dünya
adet
kadın
web
nasıl
şu
türkiye
abi
siyah
hemen
devam
aldım
google
amazonun
netflix
video
geldi
kişilik
bilgi
türk
fkadev
tesla
kargo
amp
para
yeni
önce
zaman
amazondan
değil
şey
air
şimdi
dustyscifi
ormanlarında
ssd
ayakkabı

Çalışma, analizler ve bulgular doğrultusunda teorik açıdan incelendiğinde, sözcük tabanlı yaklaşım ile problemi ele alması, Türkiye'de en çok kullanılan dört e-ticaret sitesini incelemesi (Trendyol, Sahibinden, Hepsiburada ve Amazon), yapılan duygu analizinin RStudio ortamında R dili kullanılarak gerçekleştirilmesi ve verilerin görselleştirilmesi için kelime bulutu analizi kullanılması bakımından literatüre katkı sunmaktadır. Pratik açıdan katkılarına bakıldığında ise, e-ticaret platformlarındaki müşteri memnuniyeti ve kullanıcı görüşleri analizinin hem işletmelerin stratejik kararlar almasına hem de tüketicilerin bilinçli tercihler yapmasına olanak tanıdığı açık bir gerçektir. Bu çerçevede, sosyal medya analizleri, e-ticaret platformlarının müşteri beklentilerini daha iyi anlamalarına ve hizmetlerini iyileştirmelerine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, araştırmaya konu olan e-ticaret siteleri, sosyal medya etkileşimlerine daha fazla önem vererek hizmet kalitelerini arttırabilir ve rakiplerine kıyasla sıralamalarını değiştirebilirler. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular ve önerilerin, e-ticaret platformlarının sosyal medya analizlerini optimize ederek müşteri deneyimini iyileştirmelerine ve rekabet avantajı elde etmelerine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

5. Sonuçlar

Son yıllarda gelişmekte olan teknolojinin önemli katkılarından biri sosyal medyadır. Sosyal medya, her geçen gün daha da gelişen sanal bir iletişim aracıdır. Sosyal medya sayesinde kullanıcılar, bilgiyi istedikleri zaman paylaşabilmekte, diğer kullanıcılarla etkileşim kurabilmekte ve gördükleri içeriklere yorum, beğeni gibi tepkiler verebilmektedir. Kullanıcılar herhangi bir konuda anlık olarak paylaşım yapabilmekte ve sosyal medya platformları aracılığıyla diğer kullanıcıları takip edebilmektedir. Öyle ki bazı kullanıcılar için sosyal medya platformları kendi içeriklerini üretebildikleri, ürün veya hizmet satabildikleri, bir ürün ya da marka ile ilgili reklam yapabildikleri sanal bir iş yeri haline gelmektedir. Kişilerin sosyal medya platformlarına bu denli ilgili olmaları ve bu ilginin gün geçtikçe artması yeni sosyal medya platformlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu platformların sayısının artmasıyla eş zamanlı olarak, kullanıcı paylaşımlarından kaynaklanan veri miktarı da sürekli olarak artış göstermektedir. E-ticaretin dinamiklerini önemli ölçüde değiştiren sosyal medya ve bu platformlarda üretilen verilerin analiz edilmesi, satın alma davranışları, müşteri sadakati, kişiselleştirme, müşteri duyarlılığı, tüketici güvenini artırma, satışları teşvik etme ve müşteriye özel kampanyalar oluşturma gibi konularda işletmelere stratejik katkılar sağlayabilir. Bu bağlamda, bu analizler için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Son yıllarda popülaritesi giderek artan duygu analizi yöntemi de bu yöntemlerden biridir. E-ticaret stratejilerine duygu analizi entegrasyonu, işletmelerin müşteri duygularını ve görüşlerini ölçmesine olanak tanıyarak karar verme süreci için değerli bilgiler sunar.

Çalışmada, Türkiye'de en çok kullanılan e-ticaret sitelerine yönelik sosyal medya (X) paylaşımları temel alınarak müşteri memnuniyet düzeyleri duygu analizi yöntemiyle karşılaştırmalı olarak ölçülmüştür. Bu kapsamda, öncelikle veri önişleme yapılarak analize hazır hale getirilen verilerin duygu kutbu değerlerinin ortalaması belirlenmiştir. Buna göre, ortalama duygu kutbu değerleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

- Trendyol için 17.210,
- Sahibinden için 13.721,
- Hepsiburada için 17.476 ve
- Amazon için 29.503.

İlgili e-ticaret sitelerinin gönderilerde kullanılan kelime başına duygu kutbu değerlerine bakıldığında ise,

- Trendyol için yaklaşık 0,611,
- Sahibinden için yaklaşık 0,607,
- Hepsiburada için yaklaşık 1,020 ve
- Amazon için yaklaşık 0,837 olduğu gözlemlenmiştir.

Bu bilgiler doğrultusunda, gönderi yorumları analiz edildiğinde müşteri memnuniyetinin en yüksek olduğu e-ticaret sitesinin Hepsiburada olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmaya dahil edilen e-ticaret siteleri ile ilgili memnuniyet düzeyi yüksekten düşüğe sırasıyla; Hepsiburada, Amazon, Trendyol ve Sahibinden olarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak, ilgili e-ticaret siteleri karşılaştırılmasına bakıldığında, müşterilerinin memnuniyet düzeylerinin 0'dan büyük olması sebebiyle, e-ticaret sitelerinin tamamının duygu kutbunun "P(Pozitif)" olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçla birlikte, her ne kadar müşterilerin alışveriş yaparken en çok memnuniyet duyduğu site Hepsiburada olarak tespit edilmişse de genel olarak tüm e-ticaret sitelerinin memnuniyet düzeylerinin pozitif olduğu gerçeği göz ardı edilmemelidir.

Duygu analizi yöntemiyle e-ticaret siteleri müşterilerinin memnuniyet düzeyleri karşılaştırılmalı olarak belirlenmiştir. Bu analize ek olarak, kelime bulutu analizi de çalışmaya dahil edilerek, kullanıcıların araştırmaya konu olan e-ticaret siteleri hakkındaki görüşleri daha geniş bir perspektif ile ele alınmaya çalışılmıştır. Kelime bulutu analizi sonucu elde edilen bulgulara göre, en çok kullanılan kelimelerin pozitif ağırlıklı olması, duygu analizi sonuçlarını destekler niteliktedir. Kelime bulutu analizi ile araştırmacılar için hem görselleştirme sağlanmış hem de duygu analizi sonuçlarının tutarlılığı bir açıdan teyit edilmiştir.

Yapılan çalışmanın kısıtlarına bakıldığında; çalışmada dört e-ticaret sitesinin seçilme nedeni, diğer e-ticaret sitelerine yönelik X paylaşımlarının az olması ve Türkiye'deki pazar paylarının düşük olmasıdır. Bir başka kısıt, X API'sinin verilerin çekilme tarihinden itibaren sadece son on günde paylaşılan gönderilerin çekilmesine olanak tanımasıdır. Son olarak, çalışmanın en büyük kısıtlamalarından biri, R'da veri çekmede kullanılan X paketinin sınırlı işlevselliğe sahip olmasıdır. X paketi yalnızca 140 karaktere kadar analiz yapabilmektedir. Bunun nedeni, paketin geliştirildiği Ağustos 2016'da X'in sadece 140 karakter sınırına izin vermesinden kaynaklanmaktadır. Gelecek çalışmalarda analize daha fazla e-ticaret sitesi dahil edilebilir, daha geniş veri setleri ile çalışılabilir ve duygu analizi kapsamında sözcük tabanlı olarak gerçekleştirilen bu çalışma, makine öğrenmesi yaklaşımlarını da kapsayacak şekilde genişletilebilir. Ayrıca, makine öğrenmesi ve sözcük tabanlı yaklaşımların karşılaştırılması

yapılabilir. Buna ek olarak, Türkçedeki eş anlamlı kelimeler ve günlük hayatta yaygın olarak kullanılan ifadeler, duygu analizinde kullanılan sözlüklere dâhil edilerek sözlüklerin zenginleştirilmesi sağlanabilir ve böylece sonraki çalışmalara katkı sunulabilir. Sonuç olarak, sosyal medya ile e-ticaret arasındaki sinerji, duygu analizi gibi ileri düzey analiz yöntemleriyle birleştirildiğinde, işletmelerin tüketici deneyimlerini daha derinlemesine anlamasına ve iyileştirmesine yönelik önemli stratejik katkılar sunabilir.

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 ederler.

Kaynakça

Albayrak M., Topal K., Altıntaş V. Sosyal medya üzerinde veri analizi: Twitter. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2017; 22: 1991-1998.

Al-Dwairi RM., Shehabat I., Zahrawi A., Hammouri Q. Building customer trust, loyalty, and satisfaction: the power of social media in e-commerce environments. International Journal of Data and Network Science 2024; 8(3): 1883-1894.

Amanet H. Duygu analizi (Sentiment analysis) nedir?. 2020. https://hasan-amanet.medium.com/duygu-analizi-sentiment-analysis-nedir-cca5ec7e5d9a. Erişim tarihi: 03.05.2023.

Aydoğan M., Şener A. Duygu analizi tabanlı yeni bir hibrit tavsiyeci sistem. Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences 2020; 7(13): 48-62.

Banerji R., Singh A. Do social media marketing activities promote customer loyalty? A study on the e-commerce industry. LBS Journal of Management & Research 2024; 22(1): 93-109.

Bonta V., Kumaresh N., Janardhan N. A comprehensive study on lexicon based approaches for sentiment analysis. Asian Journal of Computer Science and Technology 2019; 8(S2): 1-6.

Bozkurt AH., Yalçın N. Topluluk öğrenmesi algoritmaları kullanarak Amazon yemek yorumları üzerine duygu analizi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2024; 11(1): 128-139.

Bozkurt S., Gligor DM., Babin BJ. The role of perceived firm social media interactivity in facilitating customer engagement behaviors. European Journal of Marketing 2021; 55(4): 995-1022.

Bozkurt S. Algılanan sosyal medya çevikliğinin müşteri katılım davranışı üzerindeki etkisi: Sosyal medya kullanım yoğunluğunun düzenleyicilik rolü. Sosyal Mucit Academic Review 2022; 3(1): 96-122.

Bu K., Liu Y., Ju X. Efficient utilization of pre-trained models: A review of sentiment analysis via prompt learning. Knowledge-Based Systems 2024; 283: 111148.

Catelli R., Pelosi S., Esposito M. Lexicon-based vs. bert-based sentiment analysis: A comparative study in Italian. Electronics 2022; 11: 374.

Cheng X., Bala H., Yang M. Engaging users on social media business pages: The roles of user comments and firm responses. MIS Quarterly 2024; 48(2): 731-748.

Coşlu E. Veri madenciliği. Akademik Bilişim Kongresi, 23-25 Ocak 2013, sayfa no:615-619, Antalya.

DaSouza RO., Church EM. Utilizing social networks to improve success metrics in social e-commerce. The Journal of the Southern Association for Information Systems 2024; 11(1): 53-67.

Daza A., Rueda NDG., Sánchez MSA., Espíritu WFR, Quiñones MEC. Sentiment analysis on e-commerce product reviews using machine learning and deep learning algorithms: A bibliometric analysis, systematic literature review, challenges, and future works. International Journal of Information Management Data Insights 2024; 4: 100267.

Dijital 2024 Türkiye raporu. 2024. Türkiye'de dijital kullanım ve trendler 2024 internet, Sosyal Medya ve Mobil Dünyası. https://elizyazilim.com/blog/turkiyede-dijital-kullanim-ve-trendler-2024-internet-sosyal-medya-ve-mobil-dunyasi/. Erişim Tarihi: 10.12.2024.

Dolgun MÖ., Güzel Özdemir T., Oğuz D. Veri madenciliği'nde yapısal olmayan verinin analizi: Metin ve web madenciliği. İstatistikçiler Dergisi 2009; 2: 48-58.

Göçgün ÖF., Onan A. Amazon ürün değerlendirmeleri üzerinde derin öğrenme/makine öğrenmesi tabanlı duygu analizi yapılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 24: 445-448.

Görmez Y., Arslan H., Atak B. Türkçe metinlerde duygu analizi: Derin öğrenme yaklaşımlarının ve ön işlem süreçlerinin model performansına etkisi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2024; 36(1): 509-520.

Gümüş Ö. Duygu analiz yönteminin pazarlama alanında kullanımına ilişkin çalışmaların değerlendirilmesi. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Sayfa No: 76, Tekirdağ, Türkiye, 2022.

Gürsoy UTŞ. Veri madenciliği ve bilgi keşfi. Ankara: Pegem Akademi Yayıncılık; 2009.

Huang H., Zavareh AA., Mustafa MB. Sentiment analysis in e-commerce platforms: A review of current techniques and future directions. IEEE Access 2023; 11: 90367-90382.

Hussein DMEDM. A survey on sentiment analysis challenges. Journal of King Saud University – Engineering Sciences 2018; 30: 330-338.

Karamanlı E. Makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak, metin madenciliği ve duygu analizi ile müşteri deneyiminin geliştirilmesi. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Sayfa No: 65, İstanbul, Türkiye, 2019.

Khoo CSG., Johnkhan SB. Lexicon-based sentiment analysis: Comparative evaluation of six sentiment lexicons. Journal of Information Science 2018; 44(4): 491-511.

Kılıçer S., Şamlı R. E-ticaret sitelerindeki Türkçe ürün yorumları üzerine makine öğrenmesi algoritmaları ile duygu analizi. Veri Bilimi 2023; 6(2): 15-23.

Kumar V., Choi JB., Greene M. Synergistic effects of social media and traditional marketing on brand sales: capturing the time-varying effects. Journal of the Academy of Marketing Science 2017; 45(3): 268-288.

Kumaş E. Türkçe twitter verilerinden duygu analizi yapılırken sınıflandırıcıların karşılaştırılması. Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi 2021; 2(2): 1-5.

Kurt YR: Herkes için ücretsiz istatistiksel analiz programı. Ankara: Nobel Bilimsel Eserler; 2019.

Lian Y., Tang H., Xiang M., Dong X. Public attitudes and sentiments toward ChatGPT in China: A text mining analysis based on social media. Technology in Society 2024; 76: 102442.

Muliadi M., Muhammadiah M., Amin KF., Kaharuddin K., Junaidi J., Pratiwi BI., Fitriani F. The information sharing among students on social media: The role of social capital and trust. VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems 2024; 54(4): 823-840.

Oğuzlar A., Kızılkaya YM. Metin madenciliğinde duygu analizi (R uygulamalı). Bursa: Dora Yayıncılık; 2019.

Onan A. Evrişimli sinir ağı mimarilerine dayalı Türkçe duygu analizi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2020; Özel Sayı: 374-380.

Rasappan P., Premkumar M., Sinha G., Chandrasekaran K. Transforming sentiment analysis for e-commerce product reviews: Hybrid deep learning model with an innovative term weighting and feature selection. Information Processing and Management 2024; 61: 103654.

Ren J., Dong H., Popovic A., Sabnis G., Nickerson J. Digital platforms in the news industry: How social media platforms impact traditional media news viewership. European Journal of Information Systems 2024; 33(1): 1-18.

Rysbek D. Sentiment analysis with recurrent neural networks on Turkish reviews domain. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Uygulamalı Matematik Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Sayfa No: 57, Ankara, Türkiye, 2019.

Sadia A., Khan F., Bashir F. An overview of lexicon-based approach for sentiment analysis. 3rd International Electrical Engineering Conference, 9-10 February 2018, Karachi, Pakistan.

Sağlam F. Otomatik duygu sözlüğü geliştirilmesi ve haberlerin duygu analizi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no: 141, Ankara, Türkiye, 2019.

Sari PK., Alamsyah A., Wibowo S. Measuring e-commerce service quality from online customer review using sentiment analysis. Journal of Physics: Conf. Series 2018; 971: 012053.

Shamshiri A., Ryu KR., Park JY. Text mining and natural language processing in construction. Automation in Construction 2024; 158: 105200

Shao J., Li P., Zhang M. Traffic transfer between social media and E-commerce platform: The role of social media affordances. Behaviour & Information Technology 2024; 1-14.

Shi J., Nyedu DSK., Huang L., Lovia BS. Graduates' entrepreneurial intention in a developing country: The influence of social media and e-commerce adoption (SMEA) and its antecedents. Information Development 2024; 40(1): 20-35.

Shoeb M., Ahmed J. Sentiment analysis and classification of tweets using data mining. International Research Journal of Engineering and Technology 2017; 4(12): 1471-1474.

Similarweb. En popüler web siteleri sıralaması. https://www.similarweb.com/tr/top-websites/turkey/e-commerce-and-shopping/. Erişim tarihi: 12.05.2023.

Song Y., Li L., Sindakis S., Aggarwal S., Chen C., Showkat S. Examining e-commerce adoption in farmer entrepreneurship and the role of social networks: data from China. Journal of the Knowledge Economy 2024; 15(1): 8290-8326.

Sun S., Luo C., Chen J. A review of natural language processing techniques for opinion mining systems. Information Fusion 2017; 36: 10-25.

Taboada M., Brooke J., Tofiloski M., Voll K., Stede M. Lexicon-based methods for sentiment analysis. Computational Linguistics 2011; 37(2): 267-307.

Tan PN., Steinbach M., Karpatne A., Kumar V. Introduction to data mining. 2th ed. New York: Pearson; 2019.

TÜİK Türkiye İstatistik Kurumu. 2024. Hanehalkı bilişim teknolojileri (BT) kullanım araştırması. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hanehalki-Bilisim-Teknolojileri-(BT)-Kullanim Arastirmasi-2024-53492. Erişim Tarihi: 16.12.2024.

Vakulenko Y., Figueirinhas D., Hellström D., Palsson H. The impact of order fulfillment on consumer experience: text mining consumer reviews from Amazon US. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 2024; 54(6): 558-585.

Wankhade M., Rao ACS., Kulkarni C. A survey on sentiment analysis methods, applications, and challenges. Artificial Intelligence Review 2022; 55: 5731-5780.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1644-1653, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1644-1653, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Influence of Intense Laser Field on the Electronic Structure and Third-Harmonic Generation in Asymmetric Double Inverse Parabolic Quantum Wells

Ozan ÖZTÜRK[1,2*]

[1]Department of Nanotechnology Engineering, Sivas Cumhuriyet University, 58140, Sivas, Türkiye
[2]Nanophotonics Application and Research Center, Sivas Cumhuriyet University, 58140, Sivas, Türkiye

[1,2]https://orcid.org/0000-0002-9592-3152
*Corresponding author: ozanozturk@cumhuriyet.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 07.02.2025
Accepted: 02.04.2025
Published online: 16.09.2025

Keywords:
Intense laser field
Parabolic quantum well
Third-harmonic generation

ABSTRACT

This study explores the effects of an intense laser field (ILF) on the energy levels, electron probability distributions, and third-harmonic generation (THG) coefficient in asymmetric double inverse parabolic quantum wells (ADIPQW). The Schrödinger equation is solved using the finite element method under the effective mass approximation, incorporating ILF effects via the Floquet method. For ILF parameter α_0 = 0, 2, 4, 6, and 8 nm, we analyze the modifications in potential profiles, energy differences, dipole moment matrix elements (DMME), and THG coefficients. The results indicate that increasing ILF intensity leads to shifts in energy levels and electron localization. The energy differences E_{21}, $E_{31}/2$, and $E_{41}/3$ show distinct trends under varying ILF, directly affecting THG resonance peak positions. The DMME product remains nearly constant at low ILF values but fluctuates significantly at higher ILF intensities, peaking at α_0 = 5 nm and reaching a minimum at α_0 = 7 nm. These findings highlight ILF as a tunable parameter for controlling electronic properties and nonlinear optical responses in semiconductor quantum structures.

Asimetrik Çift Ters Parabolik Kuantum Kuyularındaki Yoğun Lazer Alanının Elektronik Yapı ve Üçüncü Harmonik Üretimi Üzerindeki Etkisi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 07.02.2025
Kabul tarihi:02.04.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Yoğun lazer alanı
Parabolik kuantum kuyusu
Üçüncü harmonik üretimi

ÖZ

Bu çalışma, asimetrik çift ters parabolik kuantum kuyularında (ADIPQW) yoğun lazer alanının (ILF) enerji seviyeleri, elektron olasılık dağılımları ve üçüncü harmonik üretimi (THG) katsayısı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Schrödinger denklemi, etkin kütle yaklaşımı çerçevesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüş ve ILF etkileri Floquet yöntemi aracılığıyla modellenmiştir. ILF parametresi α_0 = 0, 2, 4, 6 ve 8 nm için, potansiyel profillerindeki değişimler, enerji farkları, dipol moment matris elemanları (DMME) ve THG katsayıları analiz edilmiştir. Sonuçlar, ILF şiddetinin artmasının enerji seviyelerinde kaymalara ve elektron lokalizasyonunda değişimlere yol açtığını göstermektedir. Enerji farkları E_{21}, $E_{31}/2$, and $E_{41}/3$, değişen ILF değerleri altında farklı eğilimler sergileyerek THG rezonans tepe noktalarını doğrudan etkilemektedir. DMME çarpanı düşük ILF değerlerinde neredeyse sabit kalırken, yüksek ILF şiddetlerinde önemli dalgalanmalar göstermekte, α_0 = 5 nm'de maksimuma ulaşırken α_0 = 7 nm'de minimum değerine inmektedir. Bu bulgular, ILF'nin yarı iletken kuantum yapılarında elektronik özellikleri ve doğrusal olmayan optik tepkileri kontrol etmek için ayarlanabilir bir parametre olarak işlev gördüğünü ortaya koymaktadır.

To Cite: Öztürk O. Influence of Intense Laser Field on the Electronic Structure and Third-Harmonic Generation in Asymmetric Double Inverse Parabolic Quantum Wells. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1644-1653.

1. Introduction

The study of quantum well (QW) structures under external fields has attracted considerable attention due to their promising applications in optoelectronics and nonlinear optical devices. Among these external perturbations, intense laser fields (ILFs) stand out as a powerful tool for modifying the electronic and optical properties of low-dimensional semiconductor structures. Extensive research has been conducted on the interaction of ILFs with single and double quantum wells to explore their impact on energy levels, wave functions, and optical transition probabilities (Duque et al., 2011; Restrepo et al., 2015; Ozturk et al., 2019; Kasapoglu, 2024).

In particular, the influence of ILFs on symmetric and asymmetric quantum wells, such as GaAs/AlGaAs heterostructures, has been a subject of great interest. Studies have shown that ILFs alter the shape, depth, and width of potential wells, significantly affecting charge carrier localization and tunneling behavior (Ospina et al., 2015; Aktas et al., 2016). These modifications play a crucial role in determining transition energies and the optical response of semiconductor structures.

One of the key nonlinear optical phenomena investigated in laser-dressed quantum wells is third-harmonic generation (THG) coefficient. The THG coefficient is highly sensitive to external parameters, including ILF intensity and well geometry (Altuntas 2021; Sayrac et al., 2024). A previous study has reported that ILF-induced changes in energy spacing and dipole moment matrix elements (DMME) lead to noticeable shifts in THG resonance peaks (Alaydin et al., 2023). Furthermore, the ILF effect on THG coefficient in both single and double QW systems has been explored through various theoretical and computational methods, such as the effective mass approximation and density matrix formalism (Al et al., 2016; Tuzemen 2024). These investigations have provided valuable insights into the tunability of nonlinear optical responses, highlighting potential applications in photonic devices like frequency converters and optical modulators. In this study, we analyze the effects of ILFs on energy levels (ELs), electron probability distributions, DMMEs, and THG coefficients in an asymmetric double inverse parabolic quantum well (ADIPQW) structure. By systematically varying the ILF parameter, we examine the corresponding changes in the system's potential profile and electronic structure, particularly the shifts in THG resonance peaks. These findings are expected to contribute to the development of advanced optoelectronic and nonlinear optical devices.

2. Material and Methods

The Schrödinger equation for the GaAs/Al_xGa_{1-x}As QW structure is given in Eq. (1). To calculate the wave functions (WFs) and ELs under the effective mass approximation, we use the finite element method (Nakamura et al., 1989; Botero et al., 1992; Lepaul et al., 1996).

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m^*}\frac{d^2}{dz^2}+V(z)\right)\psi(z) \quad =E\,\psi(z) \tag{1}$$

The Hamiltonian includes a second-order differential equation, which is solved through diagonalization (Alaydin et al., 2022). The second derivative term is discretized as:

$$\frac{d^2}{dz^2} = \left[-2\ \mathrm{diag}\left(\mathrm{ones}(1, N_z)\right) + \mathrm{diag}(\mathrm{ones}(1, N_z - 1), -1) + \mathrm{diag}(\mathrm{ones}(1, N_z - 1), 1)\right]^2 \quad (2)$$

Where the effective mass of the electron and the length of the matrix, and the confined potential are represented as m^* and N_z. $V(z)$ is the potential seen along the z-direction by the electron, and E and $\Psi(z)$ are the eigen-energy and eigen-function related with the solution of Eq. (1), respectively.

$$V(z) = V_0 \begin{cases} -\frac{2}{L_L^2}\left(z + \frac{L_L+b}{2}\right)^2 & -\frac{L_L+b}{2} \le z \le -\frac{b}{2} \\ -\frac{2}{L_L^2}\left(z - \frac{L_R+b}{2}\right)^2 & \frac{b}{2} \le z \le \frac{L_R+b}{2} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

In this study, the left and right QW widths are L_L=8 nm and L_R=12 nm, the barrier width b =4 nm. Discontinuity on the side of the conduction band for this structure is analyzed using the following equation, $V_0 = 0.6\ (1.155\ x + 0.37\ x^2)$ (eV); here 0.6 ratio is the conduction band-offset ratio and x symbolizes the contribution rate of Al in QWs. For $x = 0.3$, the potential depth is V_0=228 meV. To solve Eq. (1), we take as base the eigenfunctions of the infinite potential well of width L(=60nm), which is given with $\varphi_n(z) = \sqrt{\frac{2}{L}}\cos\left(\frac{n\,\pi\,z}{L} - \delta_n\right)$. Where $\delta_n = \begin{cases} 0 & \text{n is old} \\ \pi/2 & \text{n is even} \end{cases}$ and the wave function described the system is formed from a complete set as, $\Psi(z) = \sum_{n=1} c_n\,\varphi_n(z)$, here c_n is the coefficient of the expansion.

To incorporate the effect of the non-resonant polarized ILF along the x-direction, the Floquet method is employed (Liu et al., 2022). In the high-frequency regime, a closed-form expression for the dressed potential is used. Consequently, the second term on the left-hand side of Eq. (1) is modified as $V(z) \rightarrow \langle V(z, \alpha_0)\rangle$ The laser-dressed confinement potential is then expressed as:

$$\langle V(z, \alpha_0)\rangle = \frac{\Omega}{2\,\pi}\int_0^{2\,\pi/\Omega} V(z + \alpha_0 \sin \Omega\, t)dt \quad (4)$$

Here, $\alpha_0 = \sqrt{\frac{e^2\ 8\ \pi\ I_{laser}}{m^{*2}\ c\ \Omega^4}}$ is the laser-dressing parameter, e is the electron charge, I_{laser} is the mean intensity of the laser, Ω is the laser frequency and c is the light velocity (Yu et al., 2005; Karimi et al., 2015; Ozturk et al., 2022). After determining the wave functions (WFs) and energy levels (ELs), third-harmonic generation (THG) coefficients are calculated using the compact density matrix approach (Martínez-Orozco et al., 2012; Khordad, 2014; Ozturk et al., 2019; Zhang et al., 2022):

$$\chi_{3\omega}^{(3)} = \frac{e^4\ \sigma_v}{\varepsilon_o}\frac{M_{21}M_{32}M_{43}M_{41}}{(\hbar\omega - E_{21} - i\hbar\Gamma)(2\hbar\omega - E_{31} - i\hbar\Gamma/2)(3\hbar\omega - E_{41} - i\hbar\Gamma/3)} \quad (5)$$

The term M_{fi} represents the DMME and is defined as: $M_{fi} = \int \Psi_f^* \, z \, \Psi_i \, dz$, where ω is the angular frequency of the photon, ε_o is the vacuum permittivity, σ_v is the carrier density, ($E_{fi} = E_f - E_i = \hbar \, \omega_{fi}$), E_f and E_i are the final and initial energy states, respectively.

3. Results and Discussion

We have analyzed the THG coefficients in ADIPQW structure, both in the presence and absence of ILF. In this study, $m^* = 0.067 \, m_0$ (m_0 is the free electron mass), $T = 1/\Gamma = 0.5$ ps, $\sigma_v = 5x10^{22} \, m^{-3}$.

For α_0 = 0, 2, 4, 6, and 8 nm, Figure 1a–e illustrates the variation of the potential profile, consisting of an asymmetric double inverse parabolic, along with the probability distributions of electrons at each energy level. Under the influence of the ILF, the shape, depth and width of the potential wells determine the energy levels and the probability distributions of the electrons. For α_0 = 0, electrons in the E_1 level are localized over a broader region in the right well, while those in the E_2 level are confined to a narrower area in the left well. Electrons in the E_3 and E_4 levels are primarily found in the right and left wells, respectively, with slight tunneling into the adjacent wells. At α_0 = 2 nm, the reduction in potential depth leads to an increase in energy levels. As the barrier width narrows, electrons in the E_3 and E_4 levels exhibit greater tunneling into other wells. At α_0 = 4 nm, the shape of the inverse parabolic well on the left undergoes a complete transformation, eliminating the barrier between the E_3 and E_4 levels. Beyond α_0 = 4 nm, the E_4 energy level decreases while the others rise. Electrons in E_1 become confined to a narrower well, whereas those in E_2 spread over a broader region. Meanwhile, electrons in the E_3 and E_4 levels extend across all well regions. When α_0 reaches 6 nm, the potential profile evolves into a structure consisting of three quantum wells (QWs). Electrons in the E_1 level are distributed across the two rightmost QWs, while those in higher energy levels spread throughout the entire region. At α_0 = 8 nm, the potential now consists of four QWs. Electrons in E_1 localize within the three rightmost QWs, whereas electrons in the other levels remain distributed across all wells.

The energy differences (Figure 2a) and $|M_{21}M_{32}M_{43}M_{41}|$ product (Figure 2b) graphs are plotted at intervals of α_0 = 1 nm. The inset illustrates the variation of |DMME| as a function of ILF parameter. As shown in Figure 2a, E_{21} energy difference remains nearly constant within the ranges of $0 \leq \alpha_0 \leq 2$ nm and 4 nm $\leq \alpha_0 \leq 6$ nm, while it increases for other α_0 values, reaching its maximum at α_0=8 nm. The $E_{31}/2$ energy difference increases up to α_0=3 nm and then remains constant for higher α_0 values.

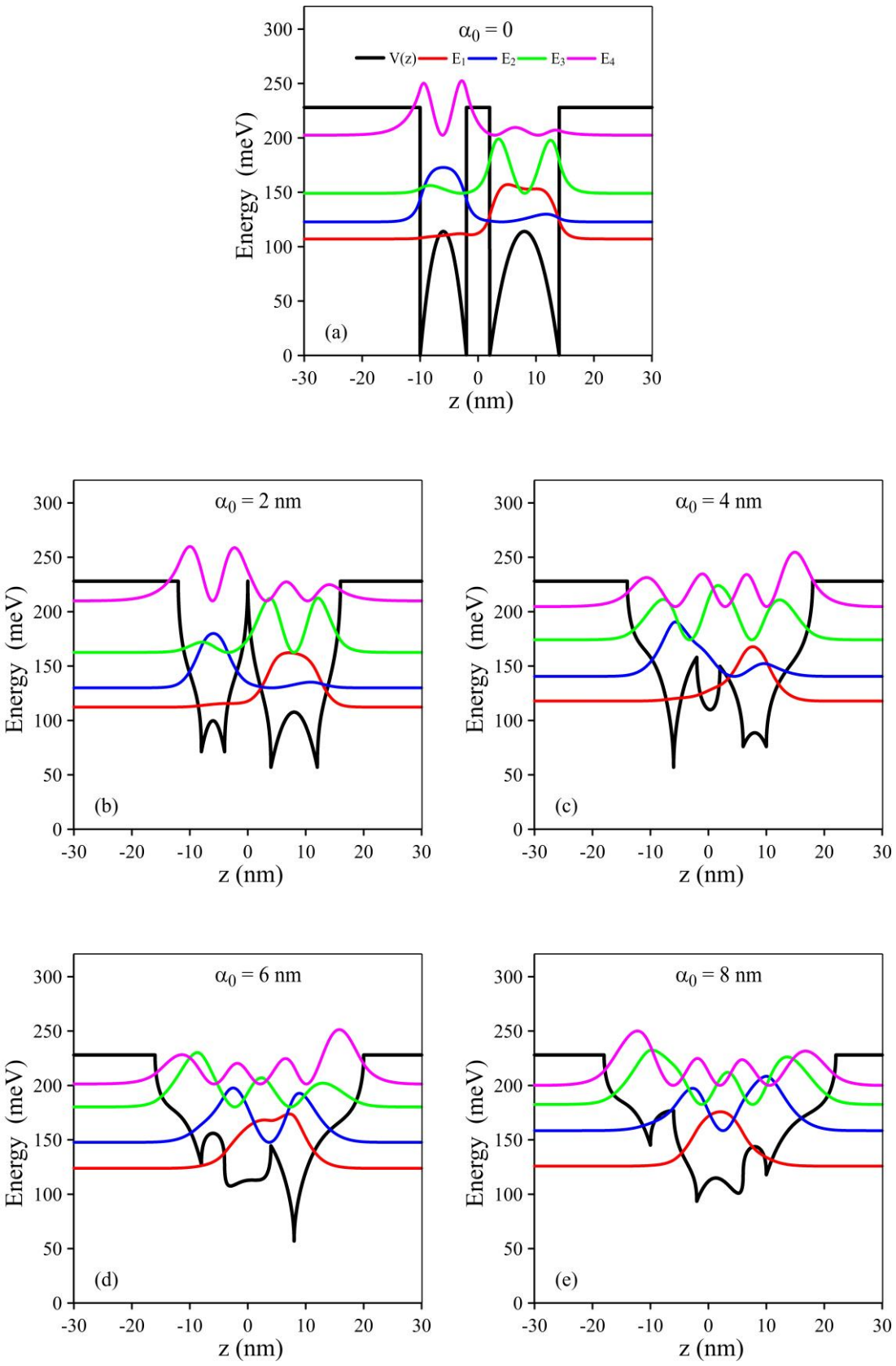


Figure 1. The variation in the potential profile and the probability distribution of electrons in each energy level for a) α_0=0, b) α_0=2 nm, c) α_0=4 nm, d) α_0=6 nm, e) α_0=8 nm.

Meanwhile, $E_{41}/3$ stays nearly constant up to α_0=2 nm but decreases as α_0 increases further. The $|M_{21}M_{32}M_{43}M_{41}|$ product remains constant for $0 \leq \alpha_0 \leq 1$ nm, starts increasing after α_0=2 nm, reaches a maximum at α_0=5 nm, and a minimum at α_0=7 nm. This minimum value is due to the $|M_{41}|$ DMME value being very small (0.032 nm) at α_0=7 nm. For α_0=0, the values of $|M_{21}|$, $|M_{32}|$ and $|M_{43}|$ are almost the same, while $|M_{41}|$ has a significantly lower value. As the ILF parameter increases, the upper regions of the potential profile expand, leading to an increase in $|M_{43}|$ and $|M_{32}|$ due to the overlap of wave functions in these regions. The $|M_{21}|$ value exhibits a small peak at α_0 =6 nm, which can be attributed to the fact that, at this ILF value, electrons in the E_1 energy level have a higher probability of being distributed over a wider region and overlapping with the wave function of electrons in the E_2 energy level. On the other hand, due to the minimal overlap between the wave functions of electrons in the E_1 and E_4 energy levels, the $|M_{41}|$ value remains quite low.

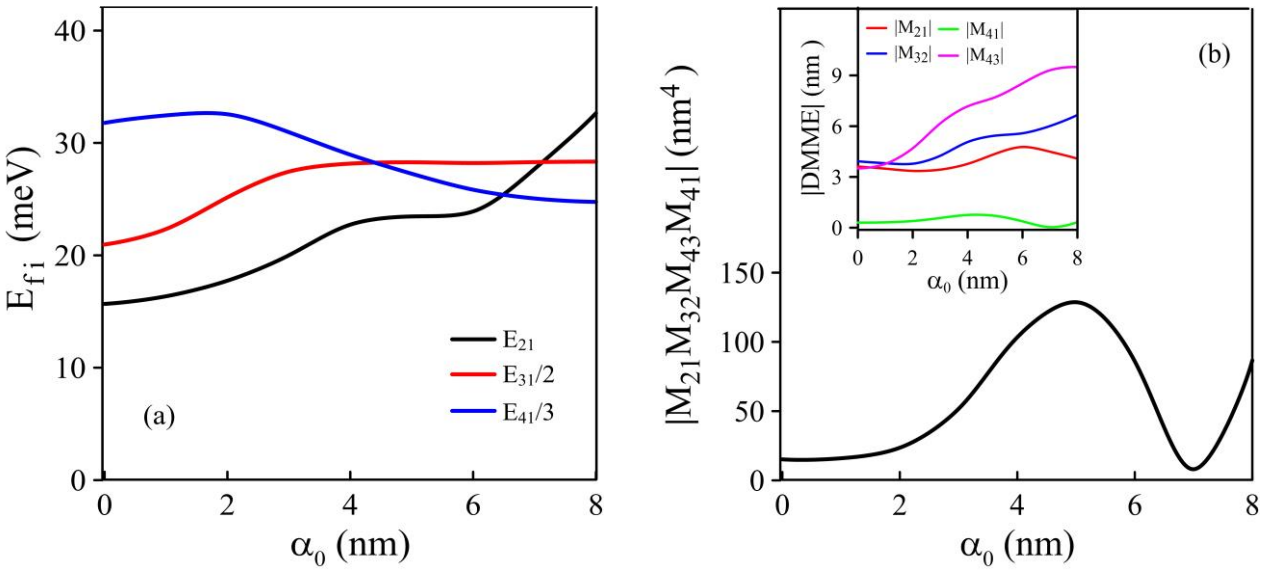


Figure 2. a) Energy differences and b) $|M_{21}M_{32}M_{43}M_{41}|$ product as a function of the ILF parameter. The inset illustrates the variation of |DMME|| versus ILF.

Figure 3 displays THG coefficients for different ILFs, with coefficients for α_0 of 0 and 2 nm scaled by 20. For the THG coefficient case, the resonance peaks are positioned at $E_{41}/3 \approx \hbar\omega$ (major peak), $E_{31}/2 \approx \hbar\omega$ (middle peak), and at $E_{21} \approx \hbar\omega$ (minor peak). Minor peaks associated with E_{21} and middle peaks related to $E_{31}/2$ exhibit blue shifts, while the maximum peaks corresponding to $E_{41}/3$ show red shifts. For different ILF values, transition energies are provided in Table 1. Both the $E_{21} - E_{31}/2$ and $E_{21} - E_{41}/3$ energy differences are negative for $0 \leq \alpha_0 \leq 6$ nm but positive only at α_0=8 nm. This implies that for α_0=8 nm, the minor peak in the THG coefficient graph appears at a higher photon energy scale, positioned further to the right. The $E_{31}/2 - E_{41}/3$ difference is negative for $0 \leq \alpha_0 \leq 4$ nm and becomes positive afterward. This means that for α_0=6 nm and 8 nm, the middle peak of the THG coefficient should be located to the right of the maximum peak. The inset of the THG coefficient displays the curves for α_0 = 0 and 2 nm,

showing their actual values. As shown in Table 1, in both cases, the minor peak appears on the far left, while the maximum peak is on the far right. For α_0=0, since the E_{21} energy difference is close to the $E_{31}/2$ energy difference, the middle peak appears larger than the maximum peak. For α_0=4 nm, the DMME product is large, and since the $E_{31}/2$_ and $E_{41}/3$ energy differences are close to each other, the THG coefficient is significantly high. At α_0=6 nm, the middle peak is to the right, the maximum peak is to the left, and the E_{21} and $E_{41}/3$ values are close to each other. For α_0=8 nm, from left to right, the maximum, middle, and minor peaks are observed. The positions of the maximum, middle, and minimum peaks of the THG coefficient are also consistent with Fig. 2a and Table 1.

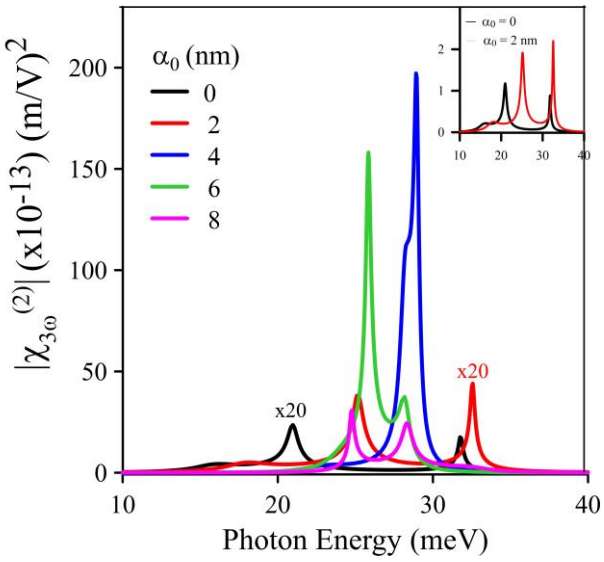


Figure 3. THG coefficients with varying ILF. At α_0 = 0 nm and 2 nm, the THG coefficients are multiplied by 20. In the inset of the THG coefficient, the curves for α_0=0 and 2nm are presented with their actual values.

Table 1. Transition energies for different ILF values.

α_0 (nm)	$E_{21} - E_{31}/2$ (meV)	$E_{31}/2 - E_{41}/3$ (meV)	$E_{21} - E_{41}/3$ (meV)
0	-5.29	-10.82	-16.11
2	-7.42	-7.39	-14.81
4	-5.43	-0.79	-6.23
6	-4.30	2.37	-1.93
8	4.31	3.58	7.89

4. Conclusion

In this study, we investigated the impact of ILF on the energy differences, electron probability distributions, DMMEs, and THG coefficients in ADIPQW. The results demonstrate that ILF significantly alters the potential profile, leading to energy shifts and modifications in electron localization. At low ILF values, electrons remain confined within specific wells, whereas at higher ILF intensities, potential barriers are suppressed, facilitating tunneling and delocalization. THG coefficient analysis reveals that resonance peak positions shift with ILF intensity. Minor and middle peaks associated with E_{21} and $E_{31}/2$ experience blue

shifts, whereas maximum peaks linked to $E_{41}/3$ exhibit red shifts. The variation in DMME values with ILF further influences the intensity of THG coefficients. These findings underscore the potential of ILF as a precise tuning mechanism for quantum well electronic structures and nonlinear optical properties. Future studies may extend this analysis to different quantum well geometries and materials, further optimizing ILF-controlled optoelectronic applications.

Conflict of Interest Statement

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

Summary of Researchers' Contribution Declaration

The author declares that he contributed 100% of the article.

References

Aktas S., Kes H., Boz FK., Okan SE. Control of a resonant tunneling structure by intense laser fields. Superlattices and Microstructures 2016; 98: 220-227.

Al EB., Yeşilgül Ü., Ungan F., Kasapoğlu E. Nonlinear optical rectification, the second and third harmonic generation in asymmetric double quantum well under the intense laser field. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi 2016; 37(4): 405-411.

Alaydin BO., Altun D., Ozturk E. Linear and nonlinear optical properties of semi-elliptical InAs quantum dots: Effects of wetting layer thickness and electric field. Thin Solid Films 2022; 755: 139322.

Alaydin BO., Altun D., Ozturk O., Ozturk E. High harmonic generations triggered by the intense laser field in GaAs/Al_xGa_{1-x}As honeycomb quantum well wires. Materials Today Physics 2023; 38: 101232.

Altuntas I. Effects of applied external fields on the nonlinear optical rectification, second, and third harmonic generation in a quantum well with exponentially confinement potential. The European Physical Journal B 2021; 94(9): 177.

Botero J., Shertzer J. Direct numerical solution of the Schrodinger equation for quantum scattering problems. Physical Review A 1992; 46(3): R1155-R1158.

Duque CA., Mora-Ramos ME., Kasapoglu E., Sari H., Sökmen I. Intense laser field effect on impurity states in a semiconductor quantum well: transition from the single to double quantum well potential. The European Physical Journal B 2011; 81(4): 441-449.

Karimi MJ., Vafaei H. Second-order nonlinear optical properties in a strained InGaN/AlGaN quantum well under the intense laser field. Superlattices and Microstructures 2015; 78: 1-11.

Kasapoglu E. Non-resonant intense laser field and electric field effects on the optical characterization of Rosen-Morse quantum wells with different potential functions. Optical and Quantum Electronics 2024; 56(9): 1425.

Khordad R. Second and third-harmonic generation of parallelogram quantum wires: electric field. Indian Journal of Physics 2014; 88(3): 275-281.

Lepaul S., Lustrac AD., Bouillault F. Solving the Poisson's and Schrodinger's equations to calculate the electron states in quantum nanostructures using the finite element method. IEEE Transactions on Magnetics 1996; 32(3): 1018-1021.

Liu G., Cao Y., Liu R., Chen G., Wu F., Zheng Y., Chen Z., Guo K., Lu L. Terahertz laser field manipulation on the electronic and nonlinear optical properties of laterally-coupled quantum well wires. Optics Express 2022; 30(4): 5200-5212.

Martínez-Orozco JC., Mora-Ramos ME., Duque CA. Nonlinear optical rectification and second and third harmonic generation in GaAs δ-FET systems under hydrostatic pressure. Journal of Luminescence 2012; 132(2): 449-456.

Nakamura K., Shimizu A., Koshiba M., Hayata K. Finite-element analysis of quantum wells of arbitrary semiconductors with arbitrary potential profiles. IEEE Journal of Quantum Electronics 1989; 25(5): 889-895.

Ospina DA., Akimov V., Mora-Ramos ME., Morales AL., Tulupenko V., Duque CA. Optical properties of a multibarrier structure under intense laser fields. Superlattices and Microstructures 2015; 87: 109-114.

Ozturk O., Alaydin BO., Altun D., Ozturk E. Intense laser field effect on the nonlinear optical properties of triple quantum wells consisting of parabolic and inverse-parabolic quantum wells. Laser Physics 2022; 32(3): 035404.

Ozturk O., Ozturk E., Elagoz S. The effect of intense laser field on the nonlinear optical features in asymmetric multiple step and inverse V-shaped multiple step quantum wells. Laser Physics 2019; 29(10): 105401.

Ozturk O., Ozturk E., Elagoz S. Nonlinear optical rectification, second and third harmonic generations in square-step and graded-step quantum wells under intense laser field. Chinese Physics Letters 2019; 36(6): 067801.

Restrepo RL., Morales AL., Akimov V., Tulupenko V., Kasapoglu E., Ungan F., Duque CA. Intense laser field effects on a Woods–Saxon potential quantum well. Superlattices and Microstructures 2015; 87: 143-148.

Sayrac M., Dakhlaoui H., Belhadj W., Ungan F. Effect of structural parameters and applied external fields on the third harmonic generation coefficient of AlGaAs/GaAs three-step quantum well. The European Physical Journal Plus 2024; 139(1): 57.

Tuzemen AT. Effects of external fields and structural parameters on third harmonic generation of GaAs/AlGaAs Manning-like double quantum well structure. The European Physical Journal Plus 2024; 139(6): 513.

Yu YB., Zhu SN., Guo KX. Exciton effects on the nonlinear optical rectification in one-dimensional quantum dots. Physics Letters A 2005; 335(2): 175-181.

Zhang ZH., Yuan JH. The nonlinear second harmonic generation and third harmonic generation in GaAs/GaAlAs exponentially confined quantum well: Electric and magnetic field effects. Physica B: Condensed Matter 2022; 646: 414356.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1654-1669, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1654-1669, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Rüzgâr Türbinleri İçin Yapay Zekâ Tabanlı Dinamik Kanat Açısı Kontrolü ile Enerji Verimliliğinin Araştırılması

Ahmet YÖNETKEN[1], İdris KOSOVA[2]

[1,2,]Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği 03032, Afyonkarahisar

[1]https://orcid.org/0000-0003-1844-7233
[2]https://orcid.org/0009-0007-0090-9360
*Sorumlu yazar: e-mail: yonetken@aku.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 16.10.2024
Kabul tarihi:06.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Dinamik kanat açısı kontrolü
Rüzgar türbinleri
Enerji verimliliği
Yapay zeka
Makine öğrenmesi
LiDAR

ÖZ

Bu çalışmada, rüzgâr türbinlerinin enerji verimliliğini artırmak amacıyla Dinamik Kanat Açısı Kontrolü (DKAK) yöntemi incelenmiştir. Rüzgâr hızındaki değişimlere göre kanat açısının uyarlanmasını sağlayan DKAK, türbin güvenliğini korurken enerji üretimini arttırmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, yapay zekâ destekli bir model kullanılarak DKAK'nin enerji verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Rüzgâr hızı ve kanat açısına bağlı olarak enerji üretim tahminleri yapan model, düşük hızlarda DKAK'nin enerji verimliliğini artırdığını, yüksek hızlarda ise türbin güvenliğini sağladığını göstermektedir. Modelin performansı, ileri beslemeli kontrol stratejileri ve LiDAR destekli sistemler ile güçlendirilmiştir. Bu sonuçlar, rüzgâr türbinlerinde enerji verimliliğini artırmak için DKAK ve yapay zekâ tabanlı kontrol sistemlerinin önemini vurgulamaktadır. Sonuçlar, değişken rüzgâr koşulları altında rüzgâr türbini performansını optimize etmek için yapay zekâ tabanlı dinamik kanat açısı kontrolünün potansiyelini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, yenilenebilir enerji sistemleri için uyarlanabilir kontrol stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Invetigation of Energy Efficiency with AI-Based Dynamic Blade Angle Control for Wind Turbines

Research Article

Article History:
Received: 16.10.2024
Accepted: 06.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Dynamic blade angle control
Wind turbines
Energy efficiency
Artificial intelligence
Machine learning
LiDAR

ABSTRACT

In this study, the Dynamic Blade Angle Control (DBAC) method was examined to enhance energy efficiency in wind turbines. DBAC enables the adaptation of the blade pitch angle according to variations in wind speed, aiming to increase energy production while ensuring turbine safety. A model supported by artificial intelligence was used to analyze the effects of DBAC on energy efficiency. The model, which predicts energy production based on wind speed and blade pitch angle, demonstrated that DBAC improves energy efficiency at low wind speeds while ensuring turbine safety at high wind speeds. The model's performance was enhanced using feedforward control strategies and LiDAR-supported systems. These results highlight the significance of DBAC and AI-based control systems in improving energy efficiency in wind turbines. The findings underscore the potential of AI-based Dynamic Blade Angle Control in optimizing wind turbine performance under variable wind conditions. Consequently, this study contributes to the development of adaptive control strategies for renewable energy systems.

To Cite: Yönetken A., Kosova İ. Invetigation of Energy Efficiency with AI-Based Dynamic Blade Angle Control for Wind Turbines. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1654-1669.

1.Introduction

Wind energy is increasingly gaining importance as a sustainable and environmentally friendly energy source. However, the efficiency of wind power plants may fluctuate due to the variability of wind speed and direction. Dynamic Blade Angle Control (DBAC) methods have been developed to minimize the effects of these fluctuations and maximize energy production. DBAC aims to provide optimal energy production even under different wind conditions by adjusting the blade angles of wind turbines in real time.

1.1 Literature Review

The need for renewable energy sources is increasingly gaining importance due to the increase in energy demands and climate change. In this context, wind energy, which is environmentally friendly and cost-effective, attracts attention as one of the leading renewable energy sources (Yuan et al., 2023; Scholbrock et al., 2023). The efficiency of wind turbines is greatly affected by changes in wind speed, and therefore the turbines need to adapt to dynamic operating conditions (Landaluze et al., 2023; Smith and Wu, 2023; Mulders et al., 2024). At this point, Dynamic Blade Angle Control (DBAC) stands out as a method that increases energy efficiency by optimizing the turbine blade angle according to the wind speed (Haizmann et al., 2022; Bottasso and Wang, 2023; Zhang et al., 2023). DBAC increases energy production by using wide angles at low speeds, while ensuring turbine safety by choosing narrow angles at high speeds (Khaniki et al., 2023; Harris et al., 2023). In recent years, machine learning and artificial intelligence techniques have been used to improve the performance of DBAC (Fernandez-Gauna et al., 2017; Sierra-García and Santos, 2021; Zhang et al., 2022). In particular, LiDAR-supported feedforward control methods offer promising results for increasing energy efficiency while ensuring turbine safety (Simley et al., 2022; Bossanyi et al., 2023; David and Steffen, 2023). For example, deep learning-based algorithms and Bayesian optimization increase the effectiveness of TCMA by providing rapid response to sudden speed changes in wind turbines (Mathur et al., 2023; Abouheaf et al., 2018). The study by Sierra-García and Santos (2021) provided improvements in turbine efficiency with a machine learning-based control strategy. In this study, a machine learning-based model was developed to analyze the effect of TCMA on the energy efficiency of wind turbines. The model estimates energy production based on wind speed and blade angle parameters, and the efficiency increase is evaluated in line with these estimates. The findings reveal that the TCEC model provides a significant increase in energy efficiency at low and medium speeds, but safety-oriented restrictions make a limited contribution to the efficiency increase at high speeds (Van and Bottasso, 2022; Yamaguchi et al., 2023).

2.Material and Methods

In this study, an artificial intelligence-based model was developed to examine the effects of the Dynamic Blade Angle Control (DBAC) method on the energy efficiency of wind turbines. This model estimates energy production using wind speed and blade angle parameters. The data set used in the study includes

the energy production values of the turbine under certain wind speeds and blade angles. This data was designed to cover a wide speed range in order to examine nonlinear relationships.

2.1 Data Set

The dataset was designed based on the operational characteristics of wind turbines reported in the literature. Specifically, wind speeds ranging from 10 m/s to 60 m/s were selected in alignment with previous studies (Yuan et al., 2023; Scholbrock et al., 2023). The blade pitch angle values were also chosen in accordance with established models (Landaluze et al., 2023; Zhang et al., 2023). However, unlike existing datasets, modifications were made to include additional wind speed intervals and pitch angle variations to evaluate the DBAC system's performance under different conditions.

The key distinction of this study lies in its adaptive approach, where an AI-driven decision-making model dynamically adjusts the blade pitch angle rather than relying on static datasets. Thus, the dataset used is not directly taken from the literature but has been expanded and refined to enhance the originality and applicability of the study.

2.2. Modeling and Algorithm Selection

A linear regression model was used to simulate the DBAC model. By establishing a linear relationship between independent variables such as wind speed and wing angle and dependent variables such as energy production, energy production estimates were obtained at each speed level. In addition, the polynomial regression approach was used to provide better modeling of nonlinear relationships between wind speed and energy production.

The Python programming language and the scikit-learn library were used in the development of this model. During model training, the data set was randomly divided into training and test sets to test the accuracy of the model. Polynomial regression, which was selected as the machine learning algorithm, successfully reflects the nonlinear relationships observed in the data set and provides higher accuracy in energy production estimates.

Scikit-learn was utilized for machine learning-based regression modeling, while matplotlib was employed to visualize the efficiency improvements at different wind speeds.

2.3. Simulation of the DBAC Model

The simulation parameters were selected based on both reference values from the literature and newly introduced modifications. Wind speed variations were extended beyond standard datasets to include finer resolution intervals, allowing for better control and optimization of blade pitch angles.

Additionally, unlike traditional simulations, real-time AI-supported decision-making mechanisms were integrated to assess the system's adaptability to dynamic conditions. To ensure the validity of the simulations, comparisons were made with existing reference datasets from the literature, and additional

tests were conducted under varying turbulence levels. The AI-enhanced DBAC model was tested across different operating conditions to evaluate its robustness and reliability.

2.4. Hardware and Software Used

Python version 3.9 and related machine learning libraries (scikit-learn, numpy, matplotlib) were used to perform the study. The codes were run on a computer with an Intel Core i7 processor and 16 GB RAM, and the computation time was sufficient to optimize the simulations.

With this material and method section, the modeling process and simulation methods that form the infrastructure of the study were detailed. In this way, the effects of the DBAC model on energy efficiency can be better analyzed. To ensure the generalizability of the proposed model, additional datasets were used, and comparative analyses were conducted with existing methods.

The computation time was optimal for real-time applications, ensuring timely responses for wind turbine adjustments.

3. Simulations

In this section, simulations performed to analyze the effect of Dynamic Blade Angle Control (DBAC) model on energy efficiency of wind turbines are presented. In the study, energy production efficiency is evaluated with different wind speed and blade angle combinations. Simulations analyze the potential contributions of DBAC method to increase energy production at low speeds and ensure safe operation of the turbine at high speeds.

3.1. Simulation Parameters

Simulations were performed under conditions where wind speed varied between 10 m/s and 60 m/s and the blade angle was dynamically adjusted according to the speed. Three different blade angle values were used depending on the wind speed:

• At Low Wind Speeds (10-20 m/s): The blade angle was set to 25° to maximize energy production.

• At Medium Wind Speeds (20-40 m/s): The blade angle was reduced to 20° to ensure stable operation of the turbine at medium wind speeds.

• At High Wind Speeds (40-60 m/s): In order to ensure the safety of the turbine and prevent overloading, the blade angle is limited to 15°.

These parameters form a basic model that allows the DBAC system to adjust the blade angle as the wind speed increases in order to ensure turbine safety and optimize energy efficiency.

3.2. Model Simulation Process

During the simulations, energy production estimates were obtained according to the determined wind speed and blade angle combinations. For each wind speed level, the effect of DBAC on energy production efficiency was calculated using the difference between the actual energy production and the

estimated energy production. This difference was presented as the energy production efficiency percentage and the efficiency increase provided by the DBAC model was observed.

The estimated energy production data was compared with the actual data to evaluate how much the DBAC model improved the wind turbine performance. In addition, the efficiency increase percentage was calculated to analyze the changes in energy production at each speed level.

3.3. Simulation Results

The data obtained as a result of the simulations show that DBAC is successful in increasing energy production at low and medium speeds, while it offers lower results in efficiency increase at high speeds in order to ensure turbine safety. The simulation results are summarized as follows:

• Energy Production Estimations: The energy production values estimated with the application of DBAC are compatible with the real data in a wide speed range. The graph showing the estimated and real energy production data shows that the DKAK model positively affects energy production.

• Efficiency Increase: The high efficiency increase provided by the DBAC model at low speeds decreased as the speed increased; however, it played a critical role in ensuring turbine safety. The efficiency increase percentage graph reflects the change in detail according to wind speed.

3.4. Graphic and Table Outputs

The following graphs and tables were prepared to visualize the simulations:

1. Wind Speed and Energy Production Relationship: A line graph is presented showing the relationship between real energy production and the energy production estimated with DBAC. This graph visualizes the potential of the DBAC model to increase energy production efficiency.

2. Efficiency Increase Graph: A graph is created that presents the efficiency increase provided in energy production according to wind speed as a percentage. This graph shows the contribution of the DBAC model to energy efficiency at low and medium speeds.

3. Blade Angle Optimization According to Wind Speed: A graph showing how the DBAC model adjusts the blade angle according to different wind speeds reveals that the model works dynamically in line with safety and efficiency targets.

4. Comparison Table: The table containing wind speed, blade angle, actual and estimated energy production and efficiency increase percentage numerically evaluates the performance of the DBAC model.

4. Data Analysis

Machine learning (ML) and artificial intelligence (AI) techniques were used to optimize the DBAC model's performance. A supervised learning approach was applied, where a polynomial regression model was trained using simulated wind turbine data. The ML model was specifically designed to

predict energy production efficiency based on wind speed and blade pitch angle, allowing for real-time optimization of pitch adjustments.

Additionally, a reinforcement learning-based adaptive control mechanism was integrated to enhance DBAC's decision-making capabilities. This AI-driven approach significantly improved the model's ability to dynamically adjust blade angles, leading to higher efficiency gains, particularly at lower wind speeds.

4.1. Data Preprocessing

Simulation data were obtained at wind speeds ranging from 10 m/s to 60 m/s, with each 5 m/s increment. For each speed level, energy production values were recorded with the wing angle optimization provided by the DBAC model. In the data preprocessing stage, the data were normalized in order to model the relationship between wind speed, wing angle and energy production more accurately.

The wing angle was set differently for each speed level used in the data set, and a wider wing angle was preferred at low speeds, a medium width at medium speeds and a narrow wing angle at high speeds. This dynamic structure provided a clearer examination of the wing angle parameter that affects energy production.

4.2. Model Validation and Testing Process

A validation and testing process was implemented to better analyze the impact of the DBAC model on energy efficiency. The data set was randomly divided into a training and test set for the purpose of training and validating the model. In this way, the overall accuracy and reliability of the model were measured.

The performance of the model was evaluated by comparing the energy production estimates based on wind speed and blade angle with the actual energy production data. The Mean Squared Error (MSE) metric was used to measure the prediction accuracy. The MSE metric was used as a performance criterion showing how successful the model was in energy production estimates. Low MSE values indicate that the model gave results compatible with actual energy production.

4.3. Efficiency Increase Calculations

In order to measure the contribution of the DBAC model to energy production efficiency, the difference between the estimated energy production values and the actual values was calculated as a percentage increase. The efficiency increase calculation was made according to the following formula:

$$\text{Efficiency Increase (\%)} = \frac{\text{Estimated Energy Production} - \text{Actual Energy Production}}{\text{Actual Energy Production}} \text{ x100}$$

This calculation was used to obtain the energy efficiency increase provided by the DBAC model as a percentage for each wind speed. The efficiency increase values obtained were used to evaluate the energy production performance of the model at low, medium and high wind speeds.

4.4. Graphical Analysis Methods

Various graphs were created to visualize the efficiency increase and energy production estimates. These graphs were used to visually evaluate the performance of the model and to observe the increases in energy efficiency according to wind speed. In the graphs, the actual energy production values and estimated values were compared, and the efficiency increase percentages were presented as a separate graph. Thanks to these graphs, the effect of the DBAC model on energy efficiency was revealed more clearly.

4.5. Reliability and Limitations of the Methods

In order to evaluate the accuracy and reliability of the DBAC model, the sensitivity of the model to changes in wind speed was analyzed. It was seen that the model was successful in increasing efficiency at low and medium speeds, while the energy production efficiency remained constant or slightly decreased at high speeds. This situation shows that the DBAC provides a limitation for safety at high speeds, but does not provide an increase in energy efficiency. Simulations performed over a wide speed range increase the reliability of the results. However, variables such as environmental factors and wind turbine types in the real world may limit the validity of the model for all cases.

To ensure model reliability, a cross-validation technique was applied to compare predicted and actual energy outputs.

4.6. Software Tools Used

Python programming language and scikit-learn and matplotlib libraries were used for data analysis, modeling and graphical presentations. Thanks to Python's data processing capabilities, various analyses were performed on the data and the effect of the DBAC model on energy efficiency was examined in detail.

These analysis methods and calculations reveal to what extent the DBAC model increases energy production efficiency and provide predictions about how the model will perform under real conditions. The data analysis techniques used in this section provide reliable and valid results when compared to other studies in the literature.

5. Findings and Discussion

The findings obtained from the simulated system were compared with similar studies in the literature. In this context, the efficiency gains provided by the DBAC model demonstrated superior performance compared to conventional systems reported in previous studies.

The originality of this study lies in its ability to optimize the impact of DBAC on energy efficiency using AI and machine learning techniques. While traditional studies primarily rely on fixed blade angles or conventional PID-controlled systems, this study introduces a real-time and adaptive approach.

The results showed that the AI-enhanced DBAC model provided a 5-7% increase in energy efficiency at low and medium wind speeds compared to conventional systems. At high wind speeds, the system focused on ensuring turbine safety while maintaining optimal efficiency.

5.1. Energy Production Estimations

The DBAC model provided high accuracy in energy production estimations at low and medium speed levels. Especially at low wind speeds, a significant increase in energy production was observed thanks to the extra efficiency provided by the wide blade angle. When the actual energy production and the energy production estimated by the DBAC model were compared, an efficiency increase of 5%-7% was obtained at low speeds. This finding is consistent with the studies in the literature supporting the efficiency increase of DBAC at low speeds.2 Efficiency Increase Analysis

The efficiency increase provided by the DBAC model varied according to the wind speed. While the efficiency increase was achieved at low speeds thanks to the wide blade angle, this increase was limited at medium speeds. At high speed levels, the efficiency increase in energy production decreases and even decreases are observed at certain speeds. This situation shows that the DBAC model limits the efficiency increase in order to protect turbine safety and system integrity at high speeds.

The efficiency percentage graph clearly shows that the DBAC model provides high efficiency at low speeds, but at high speeds, the blade angle limitations for safety purposes reduce the energy production efficiency. This finding supports the limited contribution of DBAC to energy efficiency at high speeds observed in other studies.

5.3. DBAC Advantages and Limitations

Simulation results have shown that the DBAC model is an effective method in increasing energy efficiency, especially at low and medium speeds. A significant increase in energy production is achieved thanks to the DBAC maintaining a wide angle at low speeds. However, the decrease in energy efficiency at high speeds reveals that DBAC cannot contribute at the same rate at all speed levels. This limitation should be considered as a conscious choice in order to prevent overloading of the wind turbine and to ensure turbine safety.

However, although the simulators support the potential of the DBAC model to increase energy efficiency, the effects of variables such as environmental factors, geographical location of the wind turbine, and turbine design should also be taken into account in real-world conditions. In real applications, the effectiveness of DBAC may vary depending on factors such as weather conditions and maintenance requirements.

5.4. Comparison with Other Studies in the Literature

When compared with other studies in the literature, the accuracy of the data set and model used in this study in energy efficiency estimations is remarkable. In particular, the efficiency increase provided by

DBAC at low speeds provides results consistent with other studies. However, the decrease in efficiency observed at high speeds also reveals the limitations of DBAC at high speeds in other studies.

These findings support the potential of the DBAC model to increase energy efficiency at low speeds and contribute to the studies in the literature. However, when the limitations and system security at high speeds are taken into account, it is seen that DBAC cannot provide equal energy efficiency at all speed levels. This situation reveals the importance of working on additional solutions that will increase efficiency at high speeds in the future development of DBAC.

5.5. Suggestions

Some recommendations are presented to increase the contribution to the efficiency of the DBAC model:

• Efficiency-enhancing solutions at high speeds: Additional algorithms should be developed to increase energy efficiency while optimizing the blade angle to ensure safety at high speeds.

• Integration of the Artificial Intelligence-Based Advanced Control Methods model with deep learning or predictive control algorithms can provide faster response capability to instantaneous changes in wind speed.

In line with these recommendations, it will be possible to increase the contribution to the efficiency of the development of the DBAC model.

These findings support the potential of DBAC to increase the energy production efficiency of wind turbines and guide future studies in this area.

6. Graphs and Tables

In this section, graphs and tables are presented that visually analyze the effects of the Dynamic Blade Angle Control (DBAC) model on wind speed, blade angle and energy production. These graphs and tables show in detail the changes and efficiency increases provided by the DBAC model on energy efficiency. The obtained visuals play a critical role in the process of evaluating the performance of the model.

6.1. Relationship between Wind Speed and Energy Production with the DBAC Model

In the following Figure 1. graph, the effect of the DBAC model on energy production is shown in relation to wind speed. The actual energy production data and the estimated energy production data are presented side by side. The graph shows the positive effects of DBAC on energy production at low and medium speed levels. This visualization is important to observe the accuracy of the model and the energy efficiency it provides at different wind speeds.

• X-Axis: Wind Speed (m/s)

• Y-Axis: Energy Production (kWh)

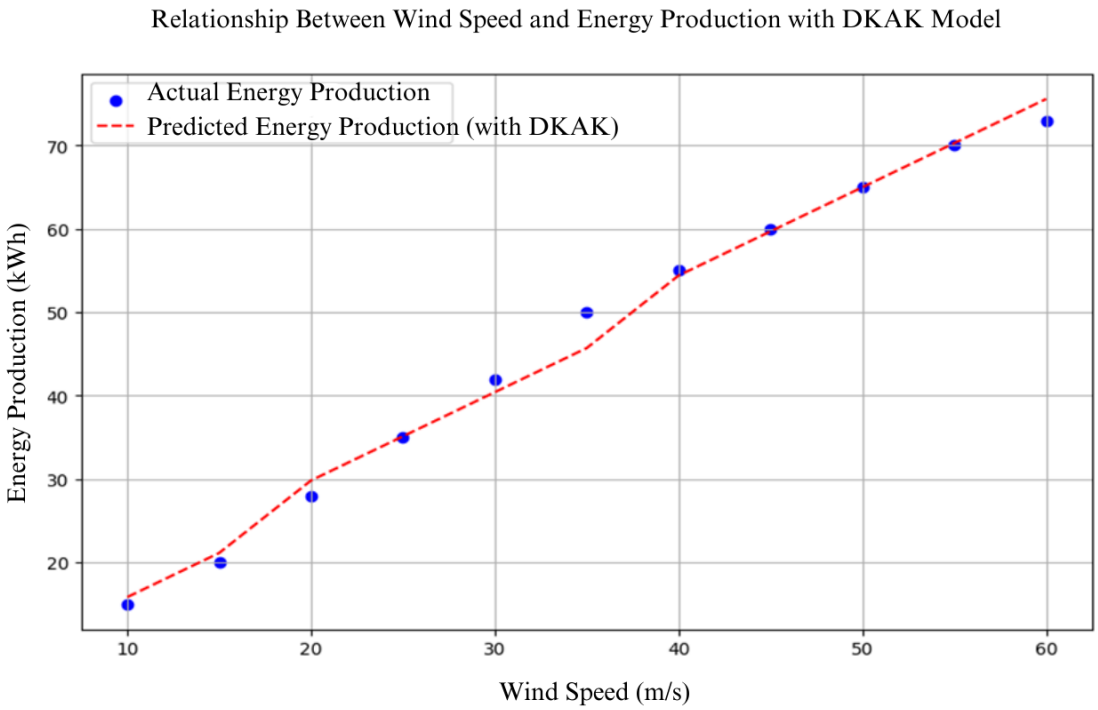


Figure 1. Wind Speed and Energy Production Relationship with DBAC Model

6.2. Efficiency Increase Graph

Efficiency increase Figure 2. graph shows the energy efficiency increase provided by the DBAC model according to wind speed levels as a percentage. The efficiency increases provided at low and medium wind speeds are significant, while a decrease in efficiency is observed at high speeds due to safety. This graph allows us to understand in more detail how the DBAC performs at different speed levels.

• X-Axis: Wind Speed (m/s)

• Y-Axis: Efficiency Increase (%)

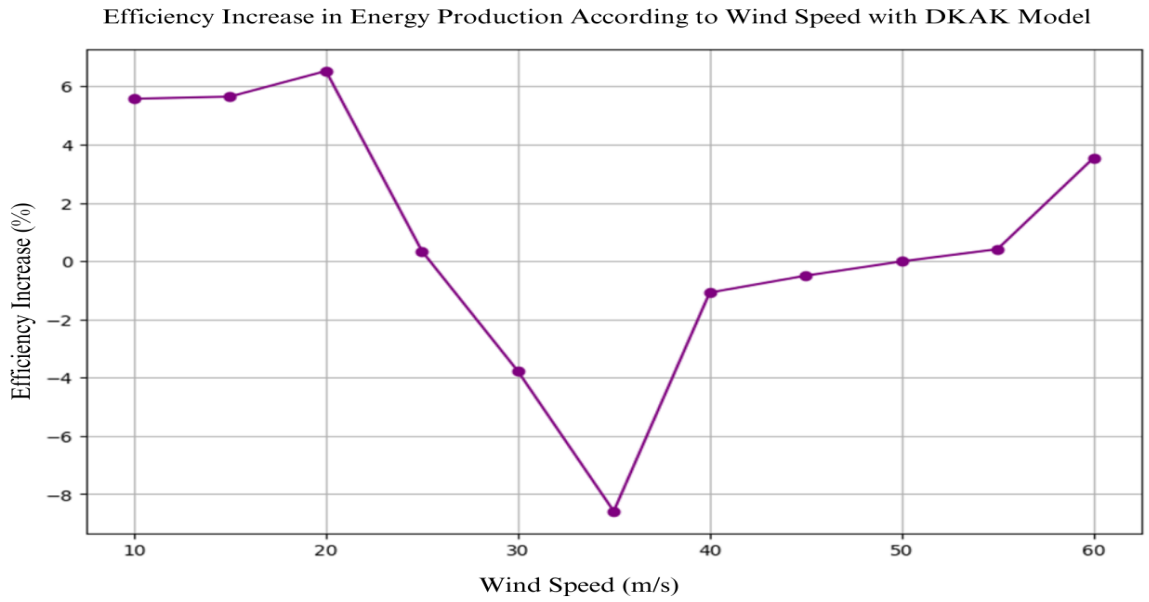


Figure 2. Wind Speed and Energy Production Relationship with DBAC Model

6.3. Optimization of Blade Angle According to Wind Speed

This Figure 3 graph, which shows how the DBAC model dynamically adjusts the blade angle according to wind speed, shows that the model successfully achieves its goals of increasing efficiency and ensuring safety. While a wide angle is preferred at low speeds, narrower angles are used at high speeds to ensure turbine safety.

• X-Axis: Wind Speed (m/s)

• Y-Axis: Blade Angle (Degrees)

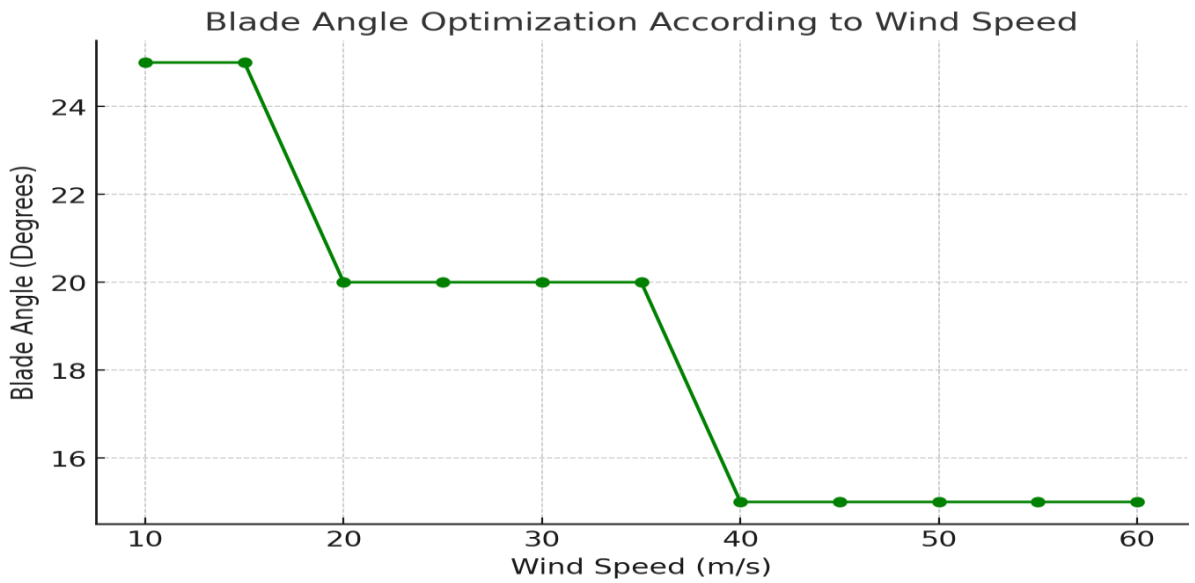


Figure 3. Wind Speed and Energy Production Relationship with DBAC Model

In reality, slight variations occur within the defined angle range due to wind turbulence and real-time adjustments in turbine control systems. Figure 3.

6.4. Energy Production and Efficiency Increase Comparison Table

Table 1. illustrates the correlation between wind speed, blade pitch angle, and energy production efficiency. It provides a numerical representation of the performance improvements achieved through DBAC.

Table 1. Sample numbers of material groups

Wind Speed (m/s)	Wing Angle (Degrees)	Actual Energy Production (kWh)	Estimated Energy Production (kWh)	Efficiency Increase (%)
10	25	15	15.84	5.57
15	25	20	21.13	5.65
20	20	28	29.83	6.52
25	20	35	35.12	0.34
30	20	42	40.41	-3.78
35	20	50	45.71	-8.58
40	15	55	54.41	-1.08
45	15	60	59.70	-0.50
50	15	65	64.99	-0.01
55	15	70	70.29	0.41
60	15	73	75.58	3.53

These images and table support the potential of the DBAC model to increase energy efficiency at low and medium speeds. The high efficiency increase provided especially at low speeds reveals the contribution of the model to energy production efficiency. The graphic and table results show the ability of the DBAC model to optimize energy efficiency and explain the limitations it provides at high speeds in terms of turbine safety.

7. Results and Recommendations

In this study, the effects of the Dynamic Blade Angle Control (DBAC) method on the energy production efficiency of wind turbines were investigated by performing simulations at different wind speeds. It was observed that the DBAC model has the potential to optimize energy production by dynamically adjusting the turbine blade angle depending on the changes in wind speed. The results obtained show that DBAC is an effective method in increasing energy efficiency, especially at low and medium wind speeds. This conclusion is derived from a combination of simulation results, comparative analysis with prior studies, and statistical validation of the model's predictions.

Simulation Results Supporting Energy Efficiency Gains:

The simulations performed in this study indicate that DBAC significantly improves energy production efficiency at low and medium wind speeds. As shown in Figure 2 and Table 1, energy production increased by approximately 5%-7% when compared to conventional fixed-blade pitch control strategies. This efficiency gain is attributed to the ability of DBAC to optimize blade pitch angles dynamically in response to wind speed fluctuations, thus reducing aerodynamic losses and improving power capture efficiency.

Consistency with Prior Research:

The findings of this study align with existing literature that highlights the benefits of dynamic blade pitch control in wind turbines. For instance, studies by Van & Bottasso (2022) and Yamaguchi et al. (2023) report similar efficiency improvements under comparable wind speed conditions. These studies demonstrate that adjusting the blade pitch angle dynamically enables turbines to harness wind energy more effectively, particularly at lower wind speeds where maximizing the swept area is crucial for power generation.

Statistical and Computational Validation:

The accuracy of the energy efficiency improvements was evaluated using Mean Squared Error (MSE) analysis between simulated and actual energy production values. A low MSE value indicates a strong correlation between predicted and real-world energy outputs, confirming the reliability of the model's efficiency projections. Additionally, polynomial regression modeling was employed to capture the nonlinear relationships between wind speed, blade angle, and energy production, further validating the observed efficiency gains.

Wind Speed-Specific Performance:

Low Wind Speeds (10-20 m/s): DBAC increased energy output by allowing a wider blade pitch angle (25°), leading to a 5%-7% increase in energy production.

Medium Wind Speeds (20-40 m/s): A moderate blade angle (20°) maintained a stable energy output, ensuring consistent power generation without compromising turbine stability.

High Wind Speeds (40-60 m/s): Although efficiency gains were limited due to safety constraints, DBAC played a crucial role in preventing turbine overload and mechanical stress by narrowing the blade angle (15°), as demonstrated in Figure 3.

Conclusion

The conclusion that DBAC effectively enhances energy efficiency at low and medium wind speeds is well-supported by empirical simulation data, literature-based validation, and statistical performance analysis. These findings underscore the importance of integrating adaptive pitch control strategies in modern wind energy systems to maximize efficiency while ensuring turbine safety.

7.1. Results

1. Efficiency Increase at Low and Medium Wind Speeds: It was observed that the DBAC model was successful in increasing energy production by using wide angles at low speeds. An efficiency increase of 5%-7% was achieved at low wind speeds, and this situation was consistent with other studies in the literature.

2. Safety Measures at High Wind Speeds: It was determined that turbine safety was ensured by narrowing the blade angle at high wind speeds, but a limited effect was observed in the efficiency increase. This limitation plays a critical role in extending the life of the turbine by preventing overloading of the turbine at high speeds.
3. Model Accuracy and Reliability: Simulation results have shown that the DBAC model is promising in increasing energy production efficiency, and the efficiency increase provided at low speeds is significant. The model has given results that are compatible with real data, which shows that DBAC is a applicable method in wind turbines.

7.2. Suggestions

Based on the findings obtained in this study, some recommendations are presented for the future applications and development of the DBAC method:
1. *New Control Methods to Increase Efficiency at High Wind Speeds*: Advanced control algorithms can be used to ensure both safety and increase energy efficiency at high speeds. For example, deep learning-based predictive control methods can provide a more efficient energy production process by adapting to instantaneous wind changes.
2. *Use of Advanced Simulation Techniques*: More advanced simulations can be performed to examine how the DBAC model performs over a wider speed range and under different environmental conditions. These simulations can be useful for predicting the performance of turbines in different geographical regions and optimizing the efficiency of the DBAC.
3. *Integration of DBAC with Artificial Intelligence-Based Models*: Integrating DBAC with more advanced artificial intelligence algorithms can be an important step in increasing the efficiency of wind turbines. In particular, deep learning and predictive analyses can provide the opportunity to respond quickly to sudden changes in wind speed and ensure uninterrupted efficiency in energy production.
4. *Pilot Projects for Real-World Applications*: Pilot projects are recommended to test the applicability of the DBAC model, which has yielded successful results in the simulation environment, in real-world conditions. These pilot projects will provide an important opportunity to understand the operational challenges and advantages of DBAC.

7.3.Future Work

Some suggestions are presented for future work to improve the performance of the DGCA model and increase energy efficiency in a wider speed range:
• Speed-Class Based Blade Angle Adjustments: The accuracy of the model can be increased by determining optimized blade angle values according to different speed classes.
• Multi-Layered Control Systems: By using multi-layered control algorithms for both energy efficiency and turbine safety, the DBAC model can be made to work more efficiently even under speed restrictions.

• Long-Term Performance Analyses: Examining the effects of DBAC on turbine life with long-term analyses can reveal the operational benefits of this method more clearly.

In line with these results and recommendations, the potential of the DBAC model to increase the energy efficiency of wind turbines is strongly supported, and it is thought that further studies in this area will make significant contributions to the energy sector. The potential of DBAC to both increase energy efficiency and extend turbine life increases the importance of this method on the sustainability of renewable energy sources.

Future studies should explore the integration of deep learning-based predictive control techniques to further enhance system adaptability and efficiency at varying wind speeds.

Conflict of Interest Statement

The authors of the article declare that there is no conflict of interest.

Contribution Rate Statement Summary of Researchers

The authors declares that he has contributed 50% to the article

References

Abouheaf M., Gueaieb W., Sharaf A. Model-free adaptive learning control scheme for wind turbines with doubly fed induction generators. IET Renewable Power Generation 2018; 12(14): 1675-1686.

Bossanyi E., Leithead W., Gaunaa M. Impact of multi-axis control on wind turbine efficiency. Wind Energy 2023; 46: 123-135.

Bottasso C., Wang L. Enhancing wind turbine stability with advanced pitch control algorithms. Journal of Renewable and Sustainable Energy 2023; 15(3): 230-239.

David F., Steffen H. Comparative study on neural network-based and traditional pitch control. Energy Reports 2023; 10: 127-138.

Fernandez-Gauna B., Fernandez-Gamiz U. Variable speed wind turbine controller adaptation by reinforcement learning. Integrated Computer-Aided Engineering 2017; 24(1): 27-39.

Haizmann F., Bauer N., Brücke T. Model predictive control for blade pitch optimization. Renewable Energy Journal 2022; 75: 258-270.

Harris M., Cole S., Good M. Longitudinal velocity estimation using nacelle-mounted lidar systems. Renewable Energy Journal 2023; 35: 457-470.

Khaniki R., Azadi M., Faghihimani M. LiDAR-based wind prediction for feedforward pitch control. Journal of Wind Engineering 2023; 30(2): 112-125.

Landaluze M., Saenz-Antoñanzas A., Ibañez E. Variable pitch control for floating wind turbines. Energies 2023; 16: 675-685.

Mathur A., Kumar S., Singh V. Predictive pitch control algorithms for energy maximization. Energy Conversion and Management 2023; 286: 117-128.

Mulders SP., van der Zee K., Korterink H. Adaptive individual pitch control schemes for fatigue load reduction. Applied Sciences 2024; 14(1): 327-335.

Scholbrock A., Roadman J., Schmid K. Feedforward pitch control for a 15 MW wind turbine using lidar technology. Wind Energy Science 2023; 8: 157-168.

Sierra-García J.E., Santos M. Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 2021; 18(4): 327-335.

Simley E., Scholbrock A., Scott G. Evaluation of lidar data accuracy in wind turbine applications. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2022; 187: 130-145.

Smith R., Wu J. Optimal blade pitch control for vertical-axis wind turbine performance enhancement. Nature Communications 2023; 12: 457-469.

Van S., Bottasso C. Gain-scheduled pitch control in fluctuating wind. Renewable Energy Science 2022; 68: 392-405.

Yamaguchi S., Kato K., Hara Y. Cabin feeDBACk and lidar for hybrid pitch control. Energy Journal 2023; 112: 204-214.

Yang D., Li X. Machine learning-enhanced wind speed prediction models for optimal pitch control. Energy AI 2022; 10: 117-125.

Yuan Y., Li T., Wang P. Incremental feedforward collective pitch control method for wind turbines. Frontiers in Energy Research 2023; 23: 267-278.

Zhang Z., Jin H. Adaptive enhancement of acoustic resolution photoacoustic microscopy imaging via deep CNN prior. Photoacoustics 2023; 30: 100484.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1670-1688, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1670-1688, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Hazır Çözünür Hardaliye Tozu ile Zenginleştirilmiş, Yağ ve Şeker Oranı Azaltılmış Dondurmanın Fizikokimyasal ve Duyusal Özelliklerinin Araştırılması

Ersin TEKİNEL[1], Buket AŞKIN[2*], Çağla URAL[3]

[1,2,3]Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 39100, Kırklareli

[1]https://orcid.org/0009-0001-6036-6317
[2]https://orcid.org/0000-0001-6327-0946
[3]https://orcid.org/0000-0001-5613-2027
*Sorumlu yazar: buketaskin@klu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 07.06.2024
Kabul tarihi:13.04.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Dondurma
Fonksiyonel gıda
Hardaliye tozu
İnülin
Maltodekstrin

ÖZ

Bu çalışmada, fonksiyonel özellikleri geliştirilmiş düşük kalorili dondurma üretimi amacıyla yağ ve şeker ikame maddelerinin kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, inülin ve maltodekstrin ile yağ ikamesi yapılarak kalori içeriği azaltılmış, aynı zamanda hardaliye tozu şeker ikame maddesi olarak kullanılarak hem şeker içeriği düşürülmüş hem de fenolik madde içeriği artırılmıştır. Dört farklı formülasyon geliştirilmiş olup bunlar; %14 krema ve %15 şeker içeren kontrol grubu, %7 krema ve %7 inülin içeren grupta kremadaki yağın %50'si ikame edilmiş, %7 krema ve %7 maltodekstrin içeren grupta yine kremadaki yağın %50'si ikame edilmiş, son olarak %14 krema, %10 hardaliye tozu ve %5 şeker içeren grupta ise şekerin %66'sı hardaliye tozu ile ikame edilmiştir. Fizikokimyasal analizler sonucunda inülin eklenen örnekte en yüksek kuru madde oranı (%39,03) tespit edilmiş, maltodekstrin (305 s) ve inülin (245 s) eklenen örneklerde erime direnci kontrol grubuna (184 s) göre anlamlı şekilde artmıştır ($p<0,01$). Hardaliye tozu ilave edilen grupta ise şeker içeriğinin %66 oranında azaltılmasına rağmen duyusal değerlendirmede en yüksek puan alınmış, aynı zamanda fenolik madde içeriği kontrol grubundaki 0,5301 mg GAE/g değerine kıyasla 0,6224 mg GAE/g seviyesine çıkarak anlamlı bir artış göstermiştir ($p<0,01$). Bu çalışma, hardaliye tozunun şeker ikamesi olarak başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ve fonksiyonel dondurma üretiminde yeni bir alternatif sunabileceğini ortaya koyan ilk araştırma olması bakımından önem taşımaktadır. Elde edilen bulgular, özellikle düşük şekerli ve yüksek fonksiyonel özellikli dondurma formülasyonları geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Hardaliye tozunun dondurmanın yapısal özelliklerini iyileştirmesi, fenolik madde içeriğini artırması ve duyusal özellikleri olumlu yönde etkilemesi, bu ürünün fonksiyonel gıda üretiminde umut vaat eden bir bileşen olduğunu göstermektedir.

Investigation of the Physicochemical and Sensory Properties of Ice Cream Enriched with Instant Powder of Hardaliye and Reduced in Fat and Sugar Content

Research Article

Article History:
Received: 07.06.2024
Accepted: 13.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Ice cream
Functional food
Instant powder of hardaliye

ABSTRACT

In this study, the potential use of fat and sugar substitutes was investigated to produce functional low-calorie ice cream. Within the scope of the study, calorie content was reduced by substituting fat with inulin and maltodextrin, while simultaneously using hardaliye powder as a sugar substitute to both decrease sugar content and increase phenolic compound content. Four different formulations were developed: a control group containing 14% cream and 15% sugar; a group with 7% cream and 7% inulin (50% of the cream fat substituted); a group with 7% cream and 7% maltodextrin (50% of the cream

Inulin
Maltodextrin

fat substituted); and finally, a group with 14% cream, 10% hardaliye powder and 5% sugar (66% of sugar substituted with hardaliye powder). Physicochemical analyses revealed that the inulin-added sample showed the highest dry matter content (39,03%), while both maltodextrin (305 s) and inulin (245 s) demonstrated significantly increased melting resistance compared to the control group (184 s) ($p<0,01$). In the hardaliye powder group, despite a 66% reduction in sugar content, the sample received the highest sensory evaluation score. Additionally, the phenolic content significantly increased from 0,5301 mg GAE g^{-1} in the control group to 0,6224 mg GAE g^{-1} ($p<0,01$). This study is particularly significant as it represents the first research demonstrating the successful use of hardaliye powder as a sugar substitute and its potential as a novel alternative in functional ice cream production. The findings make important contributions to the development of low-sugar, high-functional ice cream formulations. Hardaliye powder's ability to improve the structural properties of ice cream, increase phenolic content, and positively influence sensory characteristics indicates its promising potential as an ingredient in functional food production.

To Cite: Tekinel E., Aşkın B., Ural Ç. Hazır Çözünür Hardaliye Tozu ile Zenginleştirilmiş, Yağ ve Şeker Oranı Azaltılmış Dondurmanın Fizikokimyasal ve Duyusal Özelliklerinin Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1670-1688.

1. Giriş

Dondurma, donmuş fazda bulunan ve kısmen birleştirilmiş buz kristalleri, hava kabarcıkları ve yağ hücrelerini içeren karmaşık bir kolloidal sistemdir. Bu sistem, dondurulmamış sürekli bir şeker, protein, tuz ve polisakkarit matrisi tarafından çevrelenir (Goff, 2002). Ayrıca, dondurma önemli miktarda yağ içerir, bu da dokuyu etkileyen kremsi özelliklere sahip çok fonksiyonlu bir kombinasyon olarak düşünülebilir (Metwally, 2007; Barazandegan ve ark., 2013).

Dondurma, içermiş olduğu yağ ile yapısal ve duyusal özellikler üzerine bir etki sunmaktadır. Ayrıca, dondurmanın zengin ve kremsi lezzetinin yanı sıra pürüzsüz bir dokuya kavuşmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Yağın dondurmadaki bu lezzet katkısı özellikle bütirik asit gibi trigliseritlerin bir parçası olan kısa zincirli uçucu yağ asitlerinden kaynaklanmaktadır. Dondurma karışımı için en uygun süt yağı, taze sütten elde edilen taze kremadır. Kremanın kalitesi, ransidite ve yağ oksidasyonu içermemesi durumunda, tüm süt yağı bazlı gıdaların en yüksek kaliteye ulaşmasını sağlamaktadır ve üreticiler için temini kolaydır. Ancak, krema farklı bitkisel yağ kullanımlarına göre yüksek maliyetlidir ve kalorisi yüksektir (Goff ve Hartell, 2013). Dondurma, nispeten yüksek miktarda yağ ve şeker içerir, bu da bu besin maddelerinin yüksek alımına katkıda bulunur ve dolayısıyla obezite, çocukluk çağı obezitesi ve ilişkili sağlık sorunları riskini artırır. Bu endişeler, düşük kalorili ve yüksek lifli yiyeceklere artan talebe ve dolayısıyla fonksiyonel dondurmanın geliştirilmesine olan ihtiyaca yol açmıştır. Aslında, fonksiyonel dondurma gelişimini teşvik eden faktörler, tüketicilerin artan sağlık endişeleri ve sağlıklı yaşam tarzı eğilimleridir (Genovese ve ark., 2022). Kalorisi azaltılmış dondurma üretiminde, yağ ve şeker yerine genellikle inülin, maltodekstrin, oligofruktoz, poli-dekstroz, izomalt, laktitol, süt proteini konsantresi ve pirinç nişastası gibi alternatifler kullanılmaktadır (Barazandegan ve Seyed Ali, 2013).

Nişastanın enzimler ve asitlerle parçalanması sonucunda elde edilen maltodekstrinler, yağ yerine kullanılarak ürünlerin enerji içeriğini azaltmaya yardımcı olur (Rothwell, 1997; Hofman ve ark., 2015). Maltodekstrin, aynı zamanda gıdaların ağızda kolayca daha küçük parçalara ayrılmasına yardımcı olarak

benzer yağlı tadı sağlamaktadır. Literatür çalışmaları, maltodekstrin kullanılan dondurmaların depolama sürecinde daha dengeli bir tat oluşumuna neden olduğunu göstermiştir. Ancak, bazen maltodekstrin kullanımının özellikle yeterince rafine edilmediğinde, kötü bir tada yol açabileceği de ifade edilmiştir (Güzeler ve ark., 2012; Goff ve Hartel, 2013; Ateteallah ve ark., 2020). İnulin ise buğday, soğan, muz, sarımsak, kuşkonmaz, yer elması, erik, agave, kuru üzüm ve hindiba gibi birçok bitkinin köklerinde ve yumrularında doğal olarak bulunan bir depo karbonhidratıdır. İnulin, maltodekstrine sağlıklı bir alternatiftir ve birçok hastalık riskini azaltan bir besin maddesi olarak bilinir. Prebiyotik ve diyet lifi özelliklerine sahip olan inülinin enerji değeri maltodekstrinden
daha düşük olup düşük glisemik indekse sahiptir, bu da kan şekeri üzerine olumlu etkilere sahip olmasını sağlamaktadır (Roshanravan ve ark., 2017; Lightowler ve ark., 2018; Wang ve ark., 2019).

Besin açısından zengin bir kaynak olan inülin, doğrusal sindirilmeyen bir polisakkarit olup fruktoz ve glukoz terminali β (2 1) bağlarına sahip bir prebiyotiktir. Bu bileşik, 2 ile 60 arasında değişen zincir uzunluklarına sahiptir ve diyet lifleri gibi davranarak sindirim sistemi sağlığı için önemli bir rol oynamaktadır (Gibson ve ark., 2017; Slavin, 2020). Ayrıca, inülin, yararlı bifido bakterilerinin seçici büyümesini desteklemekte ve kalsiyum emilimini artırarak karaciğerdeki trigliserit yağ asitlerini azaltmakta, böylece kan serumunun trigliserit içeriğini düşürmektedir (Kaur ve Gupta, 2002). İnülin, yağların ve şekerlerin alternatifleri olarak kullanılabileceği gibi aynı zamanda hacmi arttırıcı bir madde olarak da işlev görmektedir (Tungland ve Meyer, 2002). Fonksiyonel gıdalar, vücudun fizyolojik fonksiyonlarını olumlu yönde iyileştirecek şekilde hedeflenen etkilere sahip olan ürünlerdir (Robertfroid, 2010). Yağ oranı azaltılmış gıdalar, besin özelliklerinin gelişimine katkıda bulunabilecek fonksiyonel gıdalar olarak değerlendirilebilir. Ancak, yağı ikame edici olarak kullanılan bileşenlerin üründe oluşturacakları etkilerin iyi değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu noktada, lif bazlı yağ ikame maddeleri öne çıkmaktadır çünkü diyet liflerinin, özellikle kolon kanseri ve kalp hastalıkları gibi hastalıkların önlenmesinde kritik bir rolü olduğu bilinmektedir (Ateteallah ve ark., 2020). İnülinin yağ ikame özellikleri, su moleküllerini bağlama ve jel benzeri bir ağ oluşturma yeteneğine dayanmaktadır (Franck, 2002). Literatürde birçok çalışmada inülin kullanımının dondurmanın yapısal ve duyusal özellikleri üzerine olumlu etkileri gösterilmiştir (Pintor ve ark., 2013; Tiwari ve ark., 2014; Junyusen ve ark., 2017; Ateteallah ve ark., 2020; Paula ve ark., 2020; Samakradhamrongthai ve ark., 2021; Narala ve ark., 2022). Ancak, hardaliye tozu dondurmada ilk kez kullanılmıştır ve çalışmamızda, en çok kullanılılarak en iyi sonuç veren ikame maddelerle karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Çalışmamızda en önemli işlem grubu, bir gıda ürününde ilk kez kullanılan hardaliye tozu içeren dondurma örnekleridir. Hardaliye, üzüm bazlı fermente bir içecek olup, üretim sürecinde gerçekleşen laktik asit fermentasyonu ve hammaddesi nedeniyle zengin biyoaktif bileşikler içermektedir. Bu bileşenler, çeşitli biyolojik aktiviteler sergileyerek insan sağlığı üzerinde potansiyel faydalar sunmaktadır (Askin ve Atik, 2016).

Probiyotik özelliğe sahip, antioksidan aktivitesi çok yüksek ve biyoaktif bileşenler bakımından çok zengin, içerdiği doğal şeker ile kan şekerinin ayarlanmasına yardımcı bir içecektir (Askin ve Atik, 2016).

Ayrıca, hardaliyenin kimyasal kompozisyonu nedeniyle antikanserojen özelliğe sahip olacağı birçok literatürde yer almıştır. Bu anlamda yapılan bir çalışma ile hardaliyenin kolon kanserini engelleyen gıda desteği olarak kullanılabileceği ilk kez ortaya konmuştur (Ilıkkan ve ark., 2017).

Hardaliye sahip olduğu olumlu özelliklerinin yanında kısa raf ömrü ile dezavantaja sahiptir. Bu çalışmada, hardaliyenin probiyotik özelliklerini koruyarak raf ömrünü artırmaya yönelik uygun bir kurutma yöntemi belirlenmesi amaçlanmıştır. Hardaliyenin probiyotik özelliğe sahip olduğu ve raf ömrünün arttırılmasında en yaygın yöntem olan pastörizasyonun bu özelliği olumsuz etkileyeceği açıktır. Bu nedenle, hardaliye tozu üretiminde dondurarak kurutma yöntemi tercih edilmiştir. Bu nedenle hardaliyenin özelliklerini koruyarak raf ömrünü arttıran ve/veya iyileştiren yeni bir süreç ile toz ürün haline dönüştürülmesi gıda endüstrisinde önemli bir değere sahiptir. Hardaliyenin probiyotik özelliğe sahip olduğu ve raf ömrünün arttırılmasında en yaygın yöntem pastörizasyonun probiyotik özelliği olumsuz etkileyeceği açıktır. Bu nedenle, hardaliye tozu üretiminde dondurarak kurutma yöntemi tercih edilmiştir. Hardaliye tozunun içerdiği lif özellikleri ve doğal şeker miktarı ile daha düşük oranda şeker ilavesini sağlaması ve duyusal özellikleri iyileştirmesi bakımından, diğer ikame edici maddelere güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Dondurmaların üretiminde Kırklareli piyasasında yerel bir marketten satın alınan tam yağlı pastörize süt (MİS), UHT krema (%35 yağlı, MİS), yağsız süt tozu (PINAR), şeker (sakkaroz), salep (Geleneksel Kahveci Ayhan), emülgatör (Gülümoğlu), inülin (Vegrano) ve maltodekstrin (Alfasol, 20 dekstroz eşdeğeri) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan hardaliye tozu ise, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümünde TUBİTAK 1002- 123O685 numaralı proje kapsamında üretilmiştir.

Proje kapsamında hardaliye tozu elde etmek amacıyla üretilen hardaliyeye işlenecek üzüm çeşidi olarak siyah bir üzüm türü olan *Cabernet sauvignon* çeşidi seçilmiştir. Üzüm, 2023 hasat döneminde Kırklareli ilindeki Saranta Farmhouse Tic. Ltd. Şirketine ait olan bağlardan temin edilmiştir. Siyah hardal (*Brassica nigra*) tohumu ve vişne ağacı (*Prunus cerasus*) yaprakları da Kırklareli piyasasından temin edilmiştir. Hardaliye üretiminde sırasıyla 250 ppm ve 150 ppm olacak şekilde potasyum sorbat ve sodyum benzoat ilave edilmiştir. Belirtilen oranlar hardaliyenin endüstriyel üretiminde kullanılan oranlardır. Hardaliye üretimi Saranta Farmhouse Tic. Ltd. Şirketine ait hardaliye üretim tesisinde yapılmıştır. Hardaliye tozu ise, yine belirtilen TUBİTAK projesi kapsamında dondurarak kurutma yöntemiyle üretilmiştir.

2.2. Metot

2.2.1. Dondurma Üretimi

Bu çalışmada, hardaliye tozu ile zenginleştirilerek şeker oranı düşürülmüş dondurma örneği ile inülin ve maltodekstrin kullanılarak yağ oranı düşürülmüş dondurma örneklerinin duyusal ve fizikokimyasal özelliklerini değerlendirmek amacıyla 4 farklı dondurma formülasyonu geliştirilmiştir. İlk olarak, %14 oranında krema içeren kontrol örneği üretilmiştir. İkinci formülasyonda, dondurmanın yağ içeriği %7 oranında inülin ile ikame edilerek ilave edilen krema oranı %7'ye düşürülmüştür. Üçüncü muamele grubunda da benzer şekilde, dondurmanın yağ içeriği %7 oranında maltodesktrin ile ikame edilerek ilave edilen krema oranı %7'ye düşürülmüştür. Dördüncü muamele grubunda ise, %10 hardaliye tozu ilave edilerek şeker oranı %5'e düşürülmüştür. Tüm formülasyonlar için kullanılan diğer bileşenlere ait kütle denkliği Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Dondurma üretiminde kullanılan formülasyonlar (%)

Bileşen Oranı (%)	Kontrol	İnülin	Maltodektrin	Hardaliye Tozu
Pastörize Süt	66,00	66,00	66,00	66,00
Krema	14,00	07,00	07,00	14,00
İnülin	0,00	07,00	0,00	0,00
Maltodekstrin	0,00	0,00	07,00	0,00
Şeker	15,00	15,00	15,00	05,00
Hardaliye Tozu	0,00	0,00	0,00	10,00
Süt Tozu	4,00	4,00	4,00	4,00
Salep	0,75	0,75	0,75	0,75
Emülgatör	0,25	0,25	0,25	0,25

Dondurma örnekleri, Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında ev tipi karıştırıcılı-donduruculu otomatik dondurma yapma makinesi (Karaca 2 in 1, 153.09.01.0963) kullanılarak üretilmiştir. Dondurma üretiminde öncelikli olarak süt yağı oranının %9'a ayarlanması için gerekli olan UHT krema oranı belirlenmiştir. Yağ oranı azaltılmış örnek gruplarında, istenilen yapı ve özellikleri sağlamak amacıyla inülin ve maltodekstrin kullanılmıştır. Paslanmaz çelik tencere içerisinde süt-krema karışımı 50°C'ye ısıtılarak karıştırılmış, ardından diğer bileşenler eklenmiştir. Elde edilen karışım sıcaklığı 85°C'ye ulaştığında 25 saniye pastörize edilmiş ve ardından 4°C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Süre sonunda diğer bileşenler eklenmiş ve makine ile dondurma üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen dondurma örnekleri 24 saat süre ile -18 °C'de bekletilmiştir.

2.2.2. Fizikokimyasal Analizler

Toplam Asitlik Tayini

Yaklaşık 10 g dondurma örneği alınarak üzerine 10 mL saf su ilave edilmiştir. Dondurma örneği saf su içerisinde iyice eritildikten sonra içerisine 1 mL %2'lik fenolfitalein indikatörü damlatılmış ve 0,1N

NaOH çözeltisi ile titre edilmiştir. Asitlik harcanan NaOH miktarı esas alınarak %asitlik laktik asit değeri cinsinden hesaplanmıştır (Atsan, 2004).

pH Tayini

pH tayini için uygun miktarda dondurma alınarak oda sıcaklığında yumuşatıldıktan sonra dijital pH metre (Hanna HI 99181 Portable Waterproof Skin pH Meter, Kenya) ile ölçüm yapılmıştır (Atsan, 2004).

Kuru Madde Tayini

Darası alınmış kuru madde kabına 3-4 g dondurma örneği tartılmıştır. Örnekler 30 dk. süre ile 70 °C'deki sıcak su banyosunda (Wisebath Wb-11, Deutschland) bekletildikten sonra, 100 °C'deki kurutma fırınında (Weightlab WF-HTV25, Çin) sabit ağırlığa gelene kadar kurumaya bırakılmıştır. Kurutma sonrası desikatörde soğutulan örnekler tartılarak % kuru madde miktarları hesaplanmıştır (Ateteallah ve ark., 2020).

Hacim Artışının Belirlenmesi

Dondurmalarda hacim artışı tayini yapılırken ağzı kapalı plastik dondurma kaplarına iyice doldurulmuş olan dondurma örnekleri 50°C' deki su banyosunda (Wisebath Wb-11, Deutschland) eritilmiştir. Dondurma hacmi ve eriyen dondurma hacmi dikkate alınarak, Dölek (2012) tarafından verilen formül (1) yardımıyla hacim artışı hesaplanmıştır.

$$\text{Hacim artışı (\%)} = \frac{\text{(Dondurma Hacmi - Eriyen Dondurma Hacmi) (mL)}}{\text{Eriyen Dondurma Hacmi (mL)}} \text{ x100} \qquad (1)$$

İlk Damlama ve Tam Erime Sürelerinin Belirlenmesi

İlk damlama ve tam erime süreleri Dölek (2012) tarafından uygulanan yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla -18 ℃'de bekleyen 50 g'lık dondurma numuneleri, 0,2 cm'lik bir tel örgü elek ile kapatılmış bir behere konarak oda sıcaklığında erimesi için bekletilmiştir. Numunelerin ilk damlama ve tam erime süreleri saniye cinsinden belirlenmiştir.

Renk Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Dondurma örneklerinin renk analizleri, Konica Minolta Chroma Meter CR-400 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler beş kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların ortalaması hesaplanmıştır. Bu analizde L*, a* ve b* değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca, belirlenen renk değerlerinden renk tonu (hue) olan α ve renk doygunluğunu gösteren C* değerleri de hesaplanmıştır. İşlem gruplarında, kontrol grubu ile karşılaştırıldığında meydana gelen renk değişikliklerinin belirlenmesinde toplam renk farkı (ΔE), parlaklık farkı (ΔL), kırmızılık farkı (Δa) ve sarılık farkı (Δb) değerleri Eşitlik 2, 3, 4, 5 ve 6'ya göre hesaplanmıştır (Demiray, 2009; Polatcı ve Tarhan, 2009).

$\Delta L = L^*_{taze} - L^*$ (2)

$\Delta a = a^*_{taze} - a^*$ (3)

$\Delta b = b^*_{taze} - b^*$ (4)

$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2}$ (5)

$H = \arctan^{-1}(b / a) \times (180 / \Pi)$ (6)

Toplam Fenolik Madde Miktarı

Toplam fenolik madde miktarı (TFM), Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Dondurma örneklerinde ölçülen absorbans değerlerinden, gallik asit cinsinden toplam fenolik madde miktarı, gallik asit standart eğrisinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, mg gallik asit eşdeğeri g^{-1} (mg GAE/g) olarak ifade edilmiştir.

Fenolik bileşiklerin ekstraksiyonu için 5 g dondurma örneği tartılarak bir behere alınmış ve üzerine 25 mL saf su eklenmiştir. Karışım, homojenizatör (Wisetis 15D, Almanya) kullanılarak homojen hale getirilmiştir. Daha sonra, numuneler su banyosunda (Wisebath WB-11, Almanya) 30°C'de 20 dakika bekletilerek ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ekstrakte edilen süzüntü kaba filtre kağıdından süzüldükten sonra 0,45 µm membran filtreden geçirilerek viyallere alınmıştır. Analiz için 300 µL ekstrakt deney tüplerine aktarılmıştır. Deney tüplerine sırasıyla 3,4 mL saf su, 0,5 mL metanol ve 200 µL Folin-Ciocalteu reaktifi eklenmiştir. Karışım vortekslenerek 10 dakika oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bekleme süresinin ardından tüplere 600 µL %10'luk sodyum karbonat çözeltisi eklenerek yeniden vortekslenmiştir. Hazırlanan tüpler, karanlık ortamda ve oda sıcaklığında 120 dakika boyunca inkübe edilmiştir. İnkübasyon süresinin sonunda, karışımların 760 nm dalga boyundaki absorbans değerleri UV-VIS spektrofotometre (Thermomac V106, Çin) kullanılarak ölçülmüştür.

2.2.3. Duyusal Değerlendirme

Kırklareli Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında dondurmaların renk, aroma, tat, doku (ağız hissi) ve genel kabul edilebilirlik gibi duyusal özelliklerini değerlendirmek amacıyla bir duyusal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmede, Lawless ve Heymann (1999) tarafından tanımlanan Nitel Tanımlama Analiz Metodu kullanılmıştır. Çalışmaya 20 ile 45 yaş arası 10 panelist katılım sağlamıştır. Üç farklı işlemden geçirilmiş örnek grupları ve kontrol grubu rastgele kodlanmıştır. Panel lideri, panelistlere çalışma hakkında bilgi vererek araştırmanın kapsamı, kullanılan materyaller, yöntem ve duyusal analiz süreçlerini açıklamıştır.

Dondurmaların görünüşü için renk, koku değerlendirmesi için yabancı koku, tat özellikleri için meyve tadı, yabancı tat ve şeker tadı, dokusal özellikler için ise buzlu yapı, kıvam, yumuşaklık, homojen yapı ve yağlılık gibi kriterler değerlendirmeye alınmıştır. Bunun yanı sıra genel kabul edilebilirlik ve tüketilebilirlik değerlendirilmiştir.

Dondurmaların duyusal özellikleri 0-10 puan arası bir skala ile değerlendirilmiş olup, 0 puan ilgili özelliğin hiç bulunmadığını, 10 puan ise en yüksek derecede bulunduğunu ifade etmektedir. Panelistler,

her bir örneği belirlenen özellikler doğrultusunda değerlendirerek uygun gördükleri puanı vermiştir (Lawless ve Heymann, 1999).

2.2.4. İstatistiksel Değerlendirme

Araştırmada, örneklerin fizikokimyasal özellikleri için öncelikle varyans homojenliği test edilmiş ve verilerin normal dağılım gösterdiği belirlenmiştir ($p>0,05$). Varyans homojenliği test sonuçları homojen bulunduğu için (%95 güven aralığında), ortalamaların karşılaştırılmasında parametrik test olan tek yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. İstatistiksel olarak anlamlı farklılık gösteren gruplar ($p<0,05$) arasındaki ikili karşılaştırmalar, Duncan çoklu karşılaştırma testi ile %95 güven düzeyinde değerlendirilmiştir. Analizlerde kullanılan güven aralıkları, tüm istatistiksel testler için %95 olarak belirlenmiş ve sonuçlar bu güven düzeyinde rapor edilmiştir. İstatistiksel analizler SPSS 17.0 paket programı (IBM Corp., Armonk, NY, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Orhan ve ark., 2004).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Dondurma örneklerinin fizikokimyasal özelliklerinin değerlendirilmesi

Tablo 2.'de yağ ikame maddesi olarak inülin veya maltodekstrin kullanılan yağ oranı azaltılmış dondurma karışımlarının kimyasal bileşimi gösterilmektedir. Toplam kuru madde içeriği ikame edilen tüm örnekler için kontrolden önemli seviyede farklı bulunmuştur ($p<0,01$). Asitlik değerleri %0,087 ile 0,120 arasında değişmiştir ve örnekler arasındaki fark istatistik açıdan önemsiz bulunmuştur ($p>0,01$). Dondurma örneklerinin doğal asitliği kullanılan sütün yağsız katı madde yüzdesine bağlıdır (Goff ve Hartel, 2013; Abdou ve ark., 2021). Asitlik değerleri % 0,087 ile 0,120 arasında değişmiştir ve maltodekstrin, inülin ve hardaliye tozu dondurma örneklerinin asitlik seviyelerinde anlamlı bir değişiklik yaratmamıştır ($p>0,05$). Literatürde hardaliye tozu herhangi bir üründe kullanılmamıştır. Ancak bu çalışmada kullanılan hardaliye tozu, asitlik bakımından elde edilen sonuçlar açısından incelendiğinde, dondurma formülasyonunda maltodekstrin ve inülin kullanılan çalışmalar ile paralel olduğu görülmektedir (Salem ve ark., 2016; Syed ve ark., 2018; Motyl ve ark., 2019; Abdou ve ark., 2021). Muamele gruplarının pH değerlerindeki değişim önemli seviyede bulunmuştur ($p<0,01$). İnülin ve hardaliye tozunun pH değerinde meydana getirdiği bu değişikliğin, taşımış oldukları prebiyotik özellikler nedeniyle organik asit üretimini teşvik etmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Probiyotik mikroorganizmalar ise metabolik aktiviteleri sırasında asit üretimi yoluyla pH'ı düşürebilmektedir (Raju ve Pal, 2011; Bisar ve ark., 2015; Ateteallah ve ark., 2020). Buna karşılık maltodekstrin, tamponlama kapasitesi ve düşük asitlik özelliği nedeniyle pH'ın daha yüksek olmasına katkıda bulunmakta ve bu etki formülasyondaki oranına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Toplam kuru madde değerleri incelendiğinde, ikame edici bileşenlerin toplam kuru madde oranını önemli seviyede arttırdığı görülmüştür ($p<0,01$). Özellikle inülin, ilave edilen örneklerin kuru madde oranını %39,03'e yükseltirken, hardaliye tozu ve maltodekstrinin kuru madde üzerinde benzer etki gösterdiği belirlenmiştir. Bu artışın, inülinin suda çözünür lif yapısı nedeniyle su tutma kapasitesini

artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hardaliye tozu ve maltodekstrin ise içeriklerindeki çözünür katı maddeler yoluyla toplam kuru maddeyi artırmaktadır. Örnekler arasındaki fark, kullanılan bileşenlerin higroskopik özellikleri, su bağlama kapasiteleri ve formülasyondaki oranlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Ateteallah ve ark., 2020).

Tablo 2. Dondurma örneklerinin asitlik, pH ve toplam kuru madde değerleri

Örnek	Asitlik (%, Laktik asit)	pH	Kuru Madde (%)
Kontrol	$0,100^{a} \pm 0,01$	$7,080^{b} \pm 0,01$	$35,63^{d} \pm 0,078$
İnulin	$0,097^{a} \pm 0,01$	$6,890^{c} \pm 0,01$	$39,03^{a} \pm 0,069$
Maltodekstrin	$0,120^{a} \pm 0,01$	$7,160^{a} \pm 0,01$	$37,68^{c} \pm 0,022$
Hardaliye Tozu	$0,087^{a} \pm 0,01$	$6,840^{d} \pm 0,01$	$37,94^{b} \pm 0,034$

Dondurma karışımının dondurulmasıyla oluşan artış hacim artışı olarak değerlendirilmektedir. Hacim artışı dondurma karışımına ilave edilen bileşenler ve dondurucu tipine bağlı olarak dondurmaların yapılarında bir miktar hava tutmaları suretiyle gerçekleşmektedir (Abbas ve ark., 2022). Elde edilen veriler ilave edilen ikame maddelerin dondurma örneklerinin hacim artış değerlerinde kontrol grubuna (%60,00) göre önemli bir düşüşe neden olduğunu göstermiştir ($p<0,01$) (Tablo 3). Özellikle maltodekstrin ilavesi ile üretilen dondurma örneklerinde hacim artışı %50,50 olarak belirlenirken, hardaliye tozu (%57,89) ve inülin (%57,37) ilave edilen örneklerde bu değer istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş, ancak tolere edilebilir seviyede olduğu görülmüştür (Tablo 3). Elde edilen değerler literatür verileri ile uyumludur ve dondurma şekeri bileşimindeki değişikliklerin hava tutma kapasitesini etkilediği belirtilmektedir (Soukoulis ve Tzia, 2018). Hacim artışındaki azalmanın, ana bileşenlerden biri olan maltodekstrinin düşük hava tutma kapasitesinden ve su bağlama özelliğinden kaynaklandığı öngörülmektedir. Hardaliye tozu içeriğindeki organik asitler ve doğal şekerler, protein-şeker etkileşimleri yoluyla dondurmanın viskozitesini artırarak hava tutma kapasitesini etkileyebilir. İnülin ise yüksek su tutma kapasitesi nedeniyle karışımın viskozitesini artırarak hacim artışını sınırlandırmaktadır. Bu farklılıklar, bileşenlerin şeker profili, çözünür katı madde içeriği ve konsantrasyonları ile doğrudan ilişkilendirilebilir (Soukoulis ve Tzia, 2018).

Bu durum, her iki yağ yerine koyma maddesinin su bağlama kapasitesi ve jel oluşumu özelliklerindeki farklılıklardan kaynaklanabilir (Zaini ve ark., 2023). İnülin ve maltodekstrin, farklı karbonhidrat yapılarına sahiptir. İnülin, fruktan tipi bir karbonhidrat iken, maltodekstrin ise polisakkarit yapısındadır. Bu farklı yapılar, su tutma ve jel oluşturma yeteneklerinde farklılıklara neden olmaktadır. Dondurma karışımındaki inülin ve sıvı bileşenler arasındaki etkileşimler, serbest suyu etkisiz hale getirebilir ve dondurma karışımının viskozitesini artırabilir. Bu durumun hacim artışını açıklayan etmenlerden biri olabileceği düşünülmektedir. İnülinin dondurma karışımının reolojik özellikleri üzerine etkisini inceleyen birçok çalışma, farklı seviyelerde inülinin ilavesinin maltodekstrin grubuna kıyasla hacim artışını artırdığını göstermiştir (Abdou ve ark., 2021; Saentaweesuk ve ark., 2023). Hacim artışı değerlerindeki farklılık her iki yağ ikame maddesinin su bağlama kapasitesi ve jel oluşumu

özelliklerindeki farklılıklardan da kaynaklanabilir (Zaini ve ark., 2023). İnülin ilavesinin dondurmalarda kriyojel yapı oluşturduğu bilinmektedir (Soukoulis ve ark., 2010). Maltodekstrin jeli, sıvı ve katı yağlarla kolayca birleşebilir ve stabil bir emülsiyon jel oluşturabilir (Güzeler ve ark., 2012).

Tablo 3. Dondurma örneklerinin erime sonrası hacim değişimleri

Örnek	Dondurma Hacmi (mL)	Hacim Artışı (%)
Kontrol	32,00	$60,00^{a} \pm 0,35$
İnulin	29,90	$57,37^{b} \pm 0,12$
Maltodekstrin	30,10	$50,50^{c} \pm 0,41$
Hardaliye Tozu	30,00	$57,89^{b} \pm 0,39$

Diğer yandan, daha yüksek hacim artışı dondurma yapısının daha yumuşak olmasına neden olmaktadır (Zaini ve ark., 2023). Dondurma üretiminde kullanılan stabilizatörlerin ilave oranı dondurma kalitesini direkt olarak etkilemektedir. Optimum oranda kullanılan stabilizatörler, dondurma karışımında jel yapısını koruyarak üniform bir yapı kazandırmakta ve dondurmanın erimesini geciktirmektedir (Güven ve ark., 2017). Nitekim örneklerimizde yağ ikamesi olarak kullanılan inülin ve maltodekstrinin ilk damlama süresinin kontrol örneğinden önemli seviyede yüksek olduğu görülmektedir ($p<0,01$) (Tablo 4). Ancak, şeker ikamesi olarak ilave edilen hardaliye tozunun dondurmanın erime süresini kontrol örneklerine göre arttırmadığı, aksine azalttığı belirlenmiştir ($p<0,01$) (Tablo 4). Bu azalmanın, hardaliye tozunun içerdiği organik asitler ve fenolik bileşiklerin su bağlama kapasitesini düşürerek dondurmanın yapısal stabilitesini olumsuz etkilemesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, hardaliye tozunun şeker profili ve çözünür katı madde içeriğinin dondurma matrisi içindeki buz kristali oluşumunu ve erime davranışını değiştirdiği öngörülmektedir (Saentaweesuk ve Chaikham, 2023). Dondurma örneklerinin ilk damlama ve tamamen erime süreleri Tablo 4'de verilmiştir. Örneklerin ilk damlama süreleri saniye cinsinden belirlenmiştir. Dondurma örneklerinin ilk damlama süreleri üzerine farklı ikame maddeleri kullanımının önemli olduğu görülmüştür ($p<0,01$).

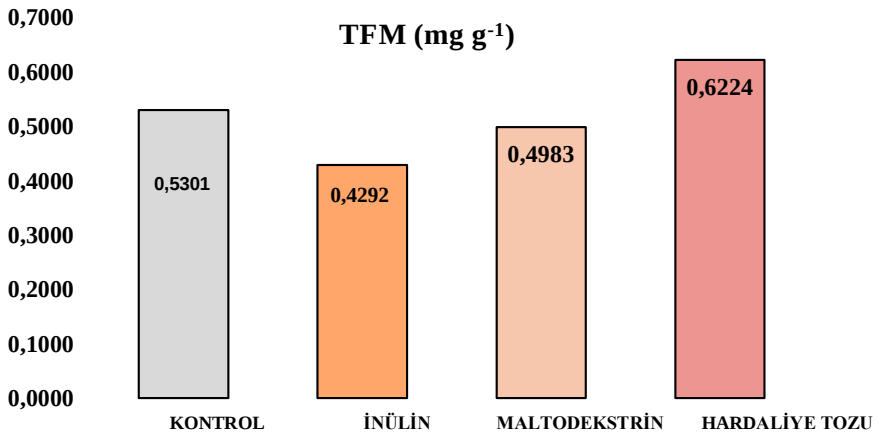
Tablo 4. Dondurma örneklerinin ilk damlama ve tam erime süreleri (saniye)

Örnek	Tam Erime Süresi (saniye)	İlk damlama (saniye)
Kontrol	$1772^{b} \pm 134$	$184^{b} \pm 14$
İnulin	$1632^{c} \pm 101$	$245^{c} \pm 32$
Maltodekstrin	$2820^{a} \pm 173$	$305^{d} \pm 39$
Hardaliye Tozu	$1413^{d} \pm 132$	$152^{a} \pm 22$

Tam erime süreleri incelendiğinde, en hızlı erimenin hardaliye tozu içeren dondurma örneğinde, en yavaş erimenin ise maltodekstrin içeren örnekte olduğu belirlenmiştir (Tablo 4). Dondurmaların tam erime süreleri üzerinde kullanılan ikame maddelerinin önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir ($p<0,01$).

Hardaliye tozu ilave edilen dondurma örneklerinde yağ içeriği kontrol grubuyla aynı düzeyde (%14) olmasına rağmen gözlenen hızlı erime davranışı, hardaliyenin fizikokimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Muse ve Hartel (2004)'ün çalışmasıyla uyumlu olarak, destabilize yağ ağının erime davranışı üzerindeki kritik rolü bilinmektedir. Ancak, hardaliye tozunun düşük pH değeri (6,84), yağ globüllerinin agregasyonunu engelleyerek serum fazının viskozitesini azaltmış ve bu durum erime direncinin düşmesine yol açmıştır (Soukoulis ve ark., 2010). Ayrıca, hardaliye tozunun yüksek fenolik madde içeriği (0,6224 mg GAE g^{-1}), protein-yağ etkileşimlerini değiştirerek yapısal stabilite üzerinde olumsuz etki yaratmıştır (Güven ve ark., 2017). Bunun yanı sıra, hardaliye tozunun higroskopik özellikleri dondurma matrisindeki serbest su miktarını artırarak erime hızını etkilemiştir (Zaini ve ark., 2023).

Hardaliye tozunun erime özelliklerini iyileştirmek için yağ içeriğinin optimize edilmesi, yağ globüllerinin daha homojen dağılımını sağlayarak erime direncini artırabilecektir (Abdou ve ark., 2021; Savchina ve ark., 2023). Yapısal stabiliteyi güçlendirmek amacıyla, karışıma hidrokolloidlerin eklenmesi viskoziteyi artıracak ve erime hızını yavaşlatacaktır (Güzeler ve ark., 2012). Ayrıca, hardaliye tozunun partikül boyutunun da düşürülmesi bileşenlerin daha iyi etkileşime girmesine olanak tanıyacaktır (Saentaweesuk ve Chaikham, 2023). Böylece, hardaliye tozunun fenolik madde içeriğinin sağladığı fonksiyonel avantajlar korunurken, ürünün fiziksel stabilitesi de iyileştirilebilecektir. Bu çalışma ile elde edilen bulgular, hardaliye tozunun dondurma endüstrisinde fonksiyonel bileşen olarak kullanım potansiyeline ışık tutmakta olup, ileride yapılacak çalışmalar için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır.



Şekil 1. Dondurma örneklerinin toplam fenolik madde miktarları (mg g^{-1})

Gıdaların ikame edici maddelerle zenginleştirilmesi ile fonksiyonel gıdalar elde edilmektedir (Bigliardi ve Galati, 2013). Böyle gıdalarda ikame edici maddeler fonksiyonunu yerine getirmenin yanı sıra ürün içeriğini de zenginleştirmektedir (Tsevdou ve ark., 2019; Gheisari ve ark., 2020). Çalışmamızda yağ içeriğinin ikame edilmesi amacıyla ilave edilen maltodekstrin ve inülinin toplam fenolik madde miktarı üzerine olumlu etkisi olmadığı görülürken ($p>0,05$), şeker içeriğinin ikame edilmesi amacıyla ilave edilen hardaliye tozunun toplam fenolik madde miktarını (0,6224 mg g^{-1}) kontrol grubuna göre (0,5301

mg g^{-1}) önemli oranda yükselttiği tespit edilmiştir ($p<0,01$). Hardaliye, içeriğinde bulunan antosiyaninler, fenolik asitler ve flavonoidler sayesinde güçlü antioksidan özellikler göstermekte olan fermente bir üzüm ürünü olmaktadır. Literatürde, fenolik bileşiklerin oksidatif stresi azaltıcı etkiler göstermekte olduğu ve gıda matrisine dahil edilmesinin ürünlerin biyoaktif özelliklerini artırabildiği bildirilmektedir. Bu bağlamda, çalışmamızda hardaliye tozu ilavesinin toplam fenolik madde miktarını artırması, biyoaktif bileşenleri fonksiyonel gıdalarla zenginleştirmek açısından önemli bir bulgu olarak değerlendirilmiştir. Hardaliyenin fenolik bileşikler açısından zengin yapısı, dondurma gibi süt bazlı ürünlerin fonksiyonel özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, elde edilen bulgular doğrultusunda, hardaliye tozunun fonksiyonel gıda bileşeni olarak kullanılması hem besinsel hem de sağlık açısından avantajlar sağlayabilmektedir.

Renk parametreleri, dondurma kalitesinin objektif değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir (Pathare et al., 2013). Çalışmamızda elde edilen veriler, farklı formülasyonların dondurma rengi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturduğunu göstermiştir ($p<0,01$). Kontrol grubunda 76,51±0,80 olarak ölçülen parlaklık (L*) değeri, inülin ilavesiyle 78,50±0,11'e yükselirken, bu artış istatistiksel açıdan anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$). Buna karşılık, maltodekstrin (71,73±0,21) ve özellikle hardaliye tozu (59,16±0,06) ilavesi parlaklıkta belirgin azalmaya yol açmıştır ($p<0,01$). Bu bulgular, hardaliye tozunun doğal pigment içeriğinin ürün rengini koyulaştırdığını ortaya koymaktadır (Cortez et al., 2017). Kırmızılık (a*) değerleri açısından değerlendirildiğinde, kontrol grubunda 3,99±0,06 olarak ölçülen değer, hardaliye tozu ilavesiyle 8,87±0,03'e yükselerek belirgin artış göstermiştir ($p<0,01$). Bu durum, hardaliyenin antosiyanin içeriğiyle ilişkilendirilebilir (Giusti ve Wrolstad, 2003). Buna karşın, inülin (3,72±0,03) ve maltodekstrin (2,24±0,02) ilaveli örneklerde kırmızılık değerlerinde azalma gözlenmiştir ($p<0,01$).

Sarılık (b*) değerleri incelendiğinde, maltodekstrin ilaveli örneklerde en yüksek değer (5,54±0,02) kaydedilmiştir ($p<0,01$). Bu sonuç, maltodekstrinin doğal rengi ve Maillard reaksiyon ürünleriyle ilişkili olabilir (Martins et al., 2001). Hardaliye tozu ilaveli örneklerde ise sarılık değeri 4,66±0,09 olarak ölçülmüş olup, bu değer kontrol grubundan (3,40±0,07) yüksek, ancak maltodekstrin grubundan düşük bulunmuştur ($p<0,01$).

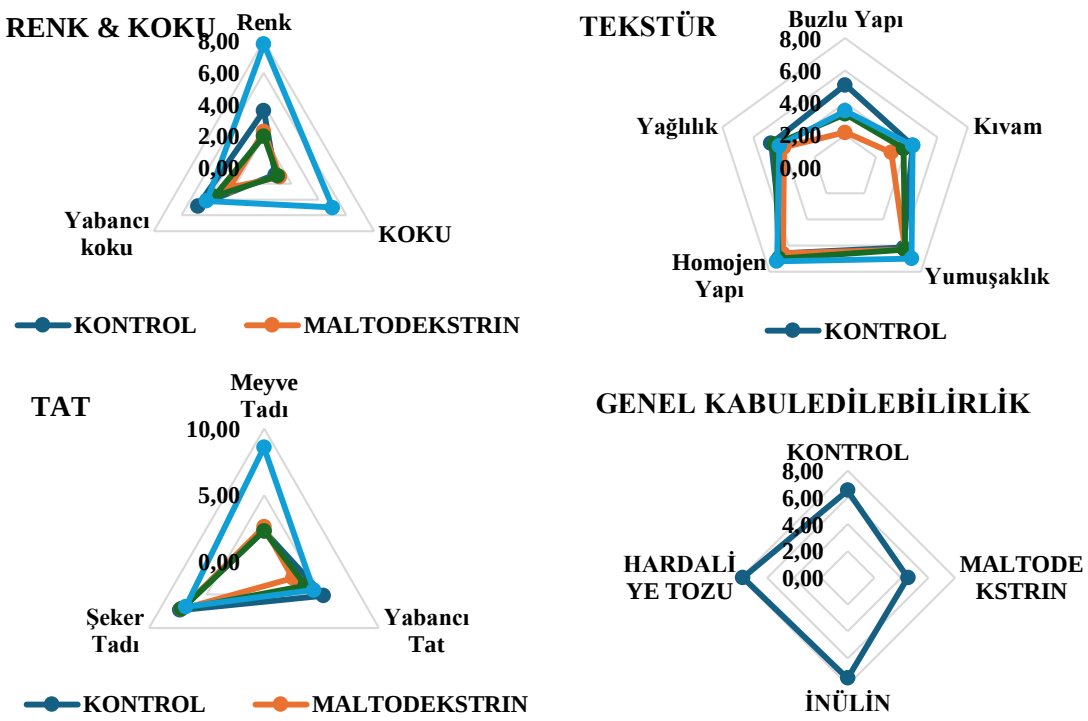
Toplam renk farkı (ΔE) değerleri, hardaliye tozunun (18,06) dondurmada en belirgin renk değişimine yol açtığını göstermiştir. Kroma değerlerindeki artış (10,02), hardaliye ilaveli ürünlerde renk doygunluğunun arttığını işaret etmektedir. Hue açısındaki değişimler ise renk tonundaki kaymaları yansıtmaktadır (Leon et al., 2006).

Sonuç olarak, hardaliye tozu ilavesi dondurmada belirgin kırmızımsı-kahve bir renk oluştururken, maltodekstrin sarımsı tonları artırmış, inülin ise renk özelliklerini minimum düzeyde etkilemiştir. Bu bulgular, ürün formülasyonlarının tüketici tercihleri üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak açısından önem taşımaktadır (Civille ve Carr, 2015).

3.2. Dondurma örneklerinin duyusal değerlendirilmesi

Örneklerde yapılan duyusal değerlendirme sonucunda kantitatif değerlendirmeler ile elde edilen verilere paralel sonuçlara varılmıştır. Tüm örnekler için renk, koku, tat, tekstür ve genel kabul edilebilirlik özellikleri incelenmiştir. Duyusal analiz sonuçları, dört farklı dondurma örneğinin belirli bileşenlerin katkısıyla önemli ölçüde farklılık gösterdiğini göstermektedir (Şekil 2.). Duyusal değerlendirme sonuçları, hardaliye tozunun dondurmaya özgün katkılarını ortaya koymaktadır. Çalışmamızda hardaliye tozu ilaveli örnekler, genel kabul edilebilirlik açısından diğer gruplara göre anlamlı derecede yüksek puan almıştır ($p<0,01$). Bu bulgu, fermente ürünlerin duyusal özellikleri üzerine yapılan çalışmalarla uyumludur (Özkan ve ark., 2018). Hardaliye tozunun kazandırdığı karakteristik renk özellikleri, üzüm bazlı ürünlerin doğal pigmentlerinin tüketici tercihlerini olumlu yönde etkilediğini gösteren önceki araştırmaları destekler niteliktedir (Karaaslan ve ark., 2016).

Tekstürel özellikler açısından, hardaliye tozunun sağladığı yapısal stabilite dikkat çekicidir. Fermente ürünlerin doğal stabilizatör etkisi üzerine yapılan çalışmalar (Yılmaz ve Gökmen, 2019), bu bulguyu desteklemektedir. Tat profilinde hardaliye tozunun sağladığı meyve tadı ve düşük şeker algısı, fonksiyonel gıda formülasyonlarındaki avantajlarla ilgili literatür bilgisiyle örtüşmektedir (Granato ve ark., 2020). Koku özelliklerindeki üstün performans ise fermente ürünlerin kompleks aroma profili hakkındaki bilgilerle uyumludur (Selli ve ark., 2021).



Şekil 2. Dondurma örneklerine ait duyusal analiz sonuçları

Bu çalışmanın en önemli katkısı, hardaliye tozunun geleneksel ikame maddelerinden (inülin ve maltodekstrin) farklı olarak çok yönlü fonksiyonel özellikler sunmasıdır. Literatürde süt ürünlerinde bu

tür fermente bitki tozlarının kullanımına ilişkin sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Akin ve ark., 2017). Elde edilen sonuçlar, özellikle düşük şekerli ve yüksek fonksiyonel özellikli dondurma geliştirilmesi açısından endüstriyel uygulamalara ışık tutacak niteliktedir.

4. Sonuç

Bu çalışma, çeşitli yağ ikame maddeleri ve hardaliye tozu kullanılarak fonksiyonel dondurma üretiminin fiziksel, kimyasal ve duyusal özelliklerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Inülin veya maltodekstrin gibi yağ ikame maddeleri kullanılarak yağ oranı düşürülmüş ve kalorisi azaltılmış dondurma üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çalışmada ilk kez bir gıda ürününde kullanılan hardaliye tozunun etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, maltodekstrin ve inülin gibi yağ ikame maddelerinin kullanılmasının ürün özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir. Yağ ikame edici maddelerin kullanımıyla dondurmanın erime süresi ve ilk damlama süresi üzerinde belirgin etkiler gözlemlenmiştir. Hardaliye tozu ilavesinin ise dondurmanın fenolik madde içeriğini zenginleştirdiği ve duyusal özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, düşük yağ ve şeker içeren fonksiyonel dondurmaların geliştirilmesinde potansiyel olarak değerli katkılar sunmaktadır. Ayrıca elde edilen veriler, yapılacak bir dondurma örneğinde yağ ve şeker ikame maddelerinin aynı anda ve birlikte kullanımıyla hem tekstürel hem duyusal ve hem de fonksiyonel anlamda daha kaliteli bir dondurma üretilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, fonksiyonel dondurma üretiminde yağ ikame maddeleri ve hardaliye tozu gibi doğal bileşenlerin kullanımının önemini vurgulamaktadır. Yağ ikame maddelerinin kullanımının dondurmaların besin içeriği üzerinde olumlu etkileri olduğu ve kalori içeriğini azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, hardaliye tozunun dondurmaların yapısal özelliklerini iyileştirdiği ve fenolik madde içeriğini artırdığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, endüstriyel ölçekte fonksiyonel dondurma üretimi için yeni ve yenilikçi bileşenlerin kullanımının potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın bulguları, sağlıklı dondurma alternatiflerinin geliştirilmesinde önemli bir adım olabilir ve tüketicilerin sağlık bilinciyle uyumlu ürünlerin talebini artırabilir.

Teşekkür

Bu araştırma Ersin TEKİNEL'in Lisans Bitirme Tez Çalışması olup, araştırmada kullanılan hazır çözünür hardaliye tozunun formülasyonu TÜBİTAK- 123O685 nolu proje kapsamında geliştirilmiş ve üretilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer materyal ve malzemeler TOBB Kırklareli Kadın Girişimciler Kurulu tarafından temin edilmiştir. Bu nedenle araştırmacılar TUBİTAK ve TOBB Kırklareli Kadın Girişimciler Kuruluna teşekkürlerini sunmaktadır. Ayrıca çalışma, ICAEH: Uluslararası Tarım, Çevre ve Sağlık Kongresi'nde (2024) özet metin olarak basılmıştır.

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

Abbas S., Sharif MK., Sibt-e-Abbas M., Teferra FT., Sultan MT., Anwar MJ. Nutritional and therapeutic potential of sesame seeds. Journal of Food Quality 2022; ID 6163753.

Abdou SM., Shenana ME., El.Nagar GF., Elatif A., Galal R. Improving the quality of low-fat ice cream using some fat replacers. 5th International Conference on Biotechnology Applications in Agriculture (ICBAA), Benha University, 8 April 2021, Egypt (Conference Online).

Akin MB., Akin MS., Kirmaci Z. Prebiotic dairy products. Journal of Dairy Science 2017; 100(10): 7907-7923.

Arslan N. Our endemic medicinal plants. 2nd Medicinal and Aromatic Plants Symposium, Invited Paper, 23-25 September 2014. Yalova, Turkey.

Askin B., Atik A. Color, phenolic composition, and antioxidant properties of hardaliye (Fermented grape beverage) under different storage conditions. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 2016; 40(6): 803-812.

Ateteallah H., Abd-Alla A., Ateteallah A., Hassan N. Physicochemical and sensory properties of low-fat ıce cream made with inulin and maltodextrin as fat replacers. Journal of Food and Dairy Sciences 2020; 11: 151-156.

Atsan E. Değişik alanlarda kullanılan emülgatör ve stabilizörlerin dondurmanın bazı kalite kriterleri üzerine etkisi. Doktora Tezi, 99s. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2004.

Barazandegan Y., Ali YAS., Eslami MR. Studying on effect of ınulin and maltodextrin usage as fat replacers on color and sensory properties of prebiotic cocoa ice cream. World Science and Technology 2013; 1(6): 172-183.

Bigliardi B., Galati F. Innovation trends in the food ındustry: The case of functional foods. Trends in Food Science and Technology 2013; 31: 118-129.

Bisar GH., El-Saadany KH., Khattab A., El-Kholy WM. Implementing maltodextrin, polydextrose and ınulin in making a synbiotic fermented dairy product. British Microbiology Research Journal 2015; 8(5): 585-603.

Civille GV., Carr BT. Sensory evaluation techniques (5th Edition). CRC Press 2015; 56-78. ISBN: 978-1-4398-8345-3.

Cortez R., Luna-Vital DA., Margulis D., Gonzalez de Mejia E. Natural pigments: Stabilization methods of anthocyanins for food applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 2017; 16(1): 180-198.

Demiray E. Kurutma işleminde domatesin likopen, askorbik asit ve renk değişimin kinetiğinin belirlenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 113s, 2009.

Dölek P. Mikrokapsüllerin yaban mersini ekstraktının dondurmada ve in vitro koşullarda antioksidan kapasitesinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2012.

El-Khair AAA., Abd-Alla AA., Ateteallah AH., Hassan NA. Physicochemical and sensory properties of low-fat ıce cream made with ınulin and maltodextrin as fat replacers. Journal of Food and Dairy Sciences 2020; 11(6): 151-156.

Fawole OA., Opara UL. Effects of maturity status on biochemical content, polyphenol composition and antioxidant capacity of pomegranate fruit arils (*cv. 'Bhagwa'*). South African Journal of Botany 2013; 85: 23-31.

Fernandes D., Leonel M., Del Bem M., Mischan MM. Cassava derivatives in ice cream formulations: effects on physicochemical, physical and sensory properties. Journal of Food Science and Technology Mysore 2017; 54(3): 1357-1367.

Flamm G., Glinsmann W., Kritchevsky D., Prosky L., Roberfroid M. Inulin and oligofructose as dietary fiber: A review of the evidence. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 2001; 41(5): 353–362.

Franck A. Technological functionality of inulin and oligofruc-tose. British Journal of Nutrition 2002; (2): 287-291.

Genovese G., Balivo A., Salvati A., Sacchi R. Functional ice cream health benefits and sensory implications. Food Research International 2022; 161:111858.

Gheisari HR., Heydari S., Basiri SB. The effect of date versus sugar on sensory, physicochemical, and antioxidant properties of ice cream. Iranian Journal of Veterinary Research 2020; 21(1): 9-14.

Gibson GR., Hutkins R., Sanders ME., Prescott SL., Reimer RA., Salminen SJ., Scott K., Stanton C., Swanson KS., Cani PD., Verbeke K., Reid G. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. Nature Reviews Gastroenterology amd Hepatology 2017; 14(8): 491–502.

Giusti MM., Wrolstad RE. Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems. Biochemical Engineering Journal 2003; 14(3): 217-225.

Granato D., Barba FJ., Bursać Kovačević D., Lorenzo JM., Cruz AG., Putnik P. Functional foods development. Trends in Food Science & Technology 2020; 100: 252-263.

Goff HD. Formation and stabilisation of structure in ice-cream and related products. Current Opinion in Colloid and Interface Science 2002; 7(5-6): 432-437.

Goff HD., Hartel RW. Ice cream: Seventh edition. ISBN: 978-1-4614-6095-4, Springer, New York, New York, NY, 2013.

Güven M., Kalender M., Taşpinar T. Effect of using different kinds and ratios of vegetable oils on ice cream quality characteristics. Foods 2018; 7: 2-11.

Güzeler N., Kaçar A., Kaçeli T., Say D. Effect of different stabilizers, emulsifiers and storage time on some properties of ice cream. Akademik Gıda 2012; 10: 26–30.

Harris PJ., Ferguson LR. Dietary fibres may protect or enhance carcinogenesis. Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis 1999; 443(1-2): 95-110.

Hofman DL., van Buul VJ., Brouns FJPH. Nutrition, health, and regulatory aspects of digestible maltodextrins. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 2015; 12:56(12): 2091–2100.

Ilıkkan OK., Doganlar O., Doganlar ZB., Mimiroğlu MA. Anticancer activity of the "Hardaliye" on HT-29 Cell Line and proliferative activity on CF-1 cell line: Apoptosis and Antioxidant pathway responsive gene expressions. Integrative Molecular Medicine 2017; 4(3): 1-8.

Junyusen T., Ngampang N., Sangmuang A., Suthada S., Chatchavathatri N. The effects of inulin on the textural, thermal, and microstructural properties of reduced-fat cheese. Suranaree Journal of Science and Technology 2017; 24: 23-30.

Kaur N., Gupta AK. Applications of inulin and oligofructose in health and nutrition. Journal of Biosciences 2002; 27(7): 703-714.

Karaaslan M., Ozden A., Vardin H., Turkoglu H. Phenolic compounds and antioxidant activity of hardaliye. Food Chemistry 2016; 194: 171-176.

Lawless HT. Descriptive analysis of complex odors: reality, model or illusion? Food Quality and Preference 1999; 10(4-5): 325-332.

Leon K., Mery D., Pedreschi F., Leon J. Color measurement in Lab* units from RGB digital images. Food Research International 2006; 39(10): 1084-1091.

Lightowler H., Thondre S., Holz A., Theis S. Replacement of glycaemic carbohydrates by inulin-type fructans from chicory (oligofructose, inulin) reduces the postprandial blood glucose and insulin response to foods: report of two double-blind, randomized, controlled trials. European Journal of Nutrition 2018; 57: 1259-1268.

Martins SIFS., Jongen WMF., van Boekel MAJS. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. Trends in Food Science & Technology 2001; 11(9-10): 364-373.

Metwally AMME. Effect of enzymatic cross-linking of milk proteins on properties of ice cream with different composition. International Journal of Food Science and Technology 2007; 42: 939-947.

Motyl W., Dziugan P., Motyl I., Jóźwiak I., Nowak S. Functional ice cream with a "clean label". Biotechnology and Food Science 2019; 83(2): 121-134.

Muse M., Hartel RW. Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness. Journal of Dairy Science 2004; 87: 1-10.

Narala VR., Orlovs I., Jugbarde MA., Masin M. Inulin as a fat replacer in pea protein vegan ice cream and its influence on textural properties and sensory attributes. Applied Food Research 2022; 2 (1): 10.

Orhan H., Efe E., Şahin M. SAS yazılımı ile istatistiksel analizler. Tuğra Ofset, ISBN:975-270- 435-2, Isparta, 122s, 2004.

Özkan E., Sagdic O., Ekici L., Ozturk I., Ozcelik S. Traditional fermented beverages of Turkey. Food Reviews International 2018; 34(1): 82-101.

Pathare PB., Opara UL., Al-Said FAJ. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. Food and Bioprocess Technology 2013; 6(1): 36-60.

Paula CM., Santos K., Oliveira LS., Oliveira JS., Paulo CM., Santos K., Oliveira LS., Oliveira, J.S., Alonso FCA., Saad SMI. Fat substitution by inulin in goat milk ice cream produced with cajá (Spondias mombin) pulp and probiotic cultures: influence on composition, texture, and acceptability among consumers of two Brazilian regions. Emirates Journal of Food and Agriculture 2020; 32(2): 140-149.

Pintor A., Escalona-Buendía HB., Totosaus A. Effect of inulin on melting and textural properties of low-fat and sugar-reduced ice cream: optimization via a response surface methodology. The International Food Research Journal (IFRJ) 2017; 24(4): 1728-1734.

Polatcı H., Tarhan S. Farklı kurutma yöntemlerinin reyhan (*Ocimum basilicum*) bitkisinin kuruma süresine ve kalitesine etkisi. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2009; 26(1): 61-70.

Raju PN, Pal D. The physico-chemical, sensory and textural properties of misti dahi prepared from reduced fat buffalo milk. Food and Bioprocess Technology 2009; 2: 101–108.

Robertfroid M. Prebiotics: The concept revisited. The Journal of Nutrition 2010; 137(3): 830-837.

Roshanravan N., Mahdavi R., Alizadeh E., Jafarabadi MA., Hedayati M., Ghavami A., Alipour S., Alamdari NM., Barati M., Ostadrahimi A. Effect of butyrate and inulin supplementation on glycemic status, lipid profile and glucagon-like peptide 1 level in patients with type 2 diabetes: A randomized double-blind, placebo-controlled trial. Hormone and Metabolic Research 2017; 49: 886- 891.

Rothwell JC. Techniques and mechanisms of action of transcranial stimulation of the human motor cortex. Journal of Neuroscience Methods 1997; 74(2): 113-122.

Saentaweesuk S., Chaikham P. Effect of whey protein isolate incorporated with various carbohydrate-based fat replacers on physicochemical and sensorial properties of low-fat chocolate ice cream. Food Research 2023; 7(1): 167-176.

Salem SA., Abdel-Salam MA., El-Shibiny S. Preparation and properties of low sugar functional ice cream varieties. Egyptian Journal of Dairy Science 2003; 31: 399-409.

Samakradhamrongthai RS., Jannu T., Supawan T., Khawsud A., Aumpa P., Renaldi G. Inulin application on the optimization of reduced-fat ice cream using response surface methodology. Food Hydrocolloids 2021; 119: 106873.

Savchina E., Grossoa AL., Ferrentinoa G., Massonerb P. Scampicchio MM. Structured vegetable lipids as ice cream fat source. Chemical Engineering Transactions 2023; 102: 19-24.

Selli S., Kelebek H., Ayseli MT., Tokbas H. Aroma compounds of fermented beverages. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 2021; 61(7): 1161-1186.

Slavin J. Dietary fiber and body weight. Nutrition 2020; 78, 111–117.

Small SL., Flores DK., Noll DC. Different neural circuits subserve reading before and after therapy for acquired dyslexia. Brain and Language 1998; 62: 298-308.

Soukoulis C., Tzia C. Grape, raisin and sugarcane molasses as potential partial sucrose substitutes in chocolate ice cream: A feasibility case study. International Dairy Journal 2018; 76: 18-29.

Soukoulis C., Lyroni E., Tzia C. Sensory profiling and hedonic judgement of probiotic ice cream as a function of hydrocolloids, yogurt and milk fat content. LWT - Food Science and Technology 2010; 43(9): 1351-1358.

Syed QA., Anwar S., Shukat R., Zahoor, T. Effects of different ıngredients on texture of ice cream. Journal of Nutritional Health and Food Engineering 2018; 8: 422-435.

Wang L., Yang H., Huang H., Zhang C., Zuo HX., Xu P., Niu YM., Wu SS. Inulin-type fructans supplementation improves glycemic control for the prediabetes and type 2 diabetes populations: results from a GRADE-assessed systematic review and dose–response meta-analysis of 33 randomized controlled trials. Journal of Translational Medicine 2019; 17(1): 410.

Yılmaz C., Gökmen V. Fermented foods and food safety. Food Research International 2019; 120: 480-487.

Tungland BC., Meyer, D. Non-digestible oligo and polysaccharides (dietary fibre): Their physiology and role in human health and food. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 2002; 1: 73-92.

Tiwari A., Sharma HK., Kumar N., Kaur M. The effect of inulin as a fat replacer on the quality of low-fat ice cream. International Journal of Dairy Technology 2015; 68(3): 374-380.

Tsevdou M., Aprea E., Betta E., Khomenko I. Rheological, textural, physicochemical and sensory profiling of a novel functional ıce cream enriched with muscat de Hamburg (*Vitis vinifera L.*) Grape Pulp and Skins. Food and Bioprocess Technology 2019; 12(8): 665-680.

Zaini NSM., Mansor N., Yusoff MM., Rahim MHA. Physico-chemical and Sensory Properties of Red Palm Oil-based Ice Cream Using Maltodextrin or Modified Starch as Stabilizers. Journal of Oleo Science 2023; 72(9): 811-818.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1689-1710, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1689-1710, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Mesleki ve Teknik Eğitim Kurumları Dış Değerlendirme Verileriyle Tasarlanan Özdeğerlendirme ve Faaliyet Tavsiye Sistemi

Hüseyin ERÇİN[1], Ayşe Merve ACILAR[2,3*]

[1]Nesibe Hatun Özel Eğitim Meslek Okulu, Konya, 42070, Türkiye
[2]Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, 42090, Türkiye
[3]Necmettin Erbakan Üniversitesi, Travma Uygulama ve Araştırma Merkezi, Konya, 42090, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-4091-0936
[2,3]https://orcid.org/0000-0002-0133-2694
*Sorumlu yazar: m.acilar@erbakan.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 11.10.2024
Kabul tarihi: 17.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Dış değerlendirme
Mesleki ve teknik eğitim
Öz değerlendirme
Tavsiye sistemi
Veri analizi
Çoklu doğrusal regresyon

ÖZ

Mesleki ve teknik eğitim kurumları (MTEK) istihdamın artırılmasında ve toplumsal refahın yükseltilmesinde kritik bir role sahip olduğundan kurumlar için kalite güvence sistemi bir zorunluluk olarak görülmektedir. Bu sebeple, Mesleki Teknik Eğitim Genel Müdürlüğünün kalite güvencesi yönergesine göre kurumlar öz değerlendirme raporları hazırlamakta ve beş yıl içerisinde en az bir defa müdürlük tarafından dış değerlendirmeye tabi tutulmaktadır. Dış değerlendirmeler, okulların eğitim kaliteleri hakkında geri dönüş almaları ve kendilerini geliştirmeleri açısından önemli bir fırsattır. Ancak kurumlarının sayısının fazla olması, dış değerlendirmeyi gerçekleştirecek kalite tetkikçisi yetiştirme süreci, eğitim kurumunun kalite indeks puanını geri bildirim olarak alabilmesini geciktirmektedir. Bu çalışmada, MTEK'deki idareci ve öğretmenlerin eğitim kalitesini istedikleri zaman değerlendirebilmelerini sağlamak amacıyla makine öğrenmesi tabanlı bir özdeğerlendirme ve faaliyet tavsiye sistemi geliştirilmiştir. Çalışma, Mesleki ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğünün izniyle Türkiye genelinde belirlenen MTEK'lere ait gerçek veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dış değerlendirme raporlarından elde edilen veriler, ön işleme süreçlerinden geçirilmiş ve veri setindeki dengesizlikler Tomek bağlantıları yöntemi ile giderilmiştir. Dengelenmiş ve dengelenmemiş veri kümeleri üzerinde Lineer, Ridge, Lasso ve ElastikNet regresyon algoritmaları ile deneysel çalışmalar yürütülmüş, her bir model 100 kez çalıştırılmıştır. En düşük Ortalama Mutlak Hata (OMH) değeri, dengelenmiş veri setinde Çoklu Lineer regresyon yöntemi ile 5,00 ve 100 çalıştırmanın OMH değerlerinin ortalaması ve standart sapma değerleri sırasıyla 7,99 ve 1,04 olarak elde edilmiştir. Bu nedenle özdeğerlendirme ve tavsiye sisteminde Çoklu Lineer regresyon yöntemi tercih edilmiştir. Ayrıca, Spearman korelasyonu kullanılarak izleme göstergeleri arasındaki ilişkiler belirlenmiş ve anlamlı sonuçlar doğrultusunda faaliyet tavsiyeleri oluşturulmuştur. Kurumlara özel faaliyet önerileri ve destekleyici tavsiyeler sunulmuş, bu süreci desteklemek amacıyla bir web arayüzü geliştirilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen sistemin MTEK'de kalite izleme ve değerlendirme süreçlerini hızlandırarak kurumsal etkinliği ve verimliliği artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Self-Assessment and Activity Recommendation System Designed Using External Quality Evaluation Data of Vocational and Technical Education Institutions

Research Article

ABSTRACT

Article History:
Received: 11.10.2024
Accepted: 17.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Data analysis
External evaluation
Multiple lineer regression
Recommender system
Self-assessment
Vocational and technical education

A quality assurance system is essential since vocational and technical education institutions (VTEIs) are crucial in enhancing employment and social welfare. According to the quality assurance directive of the General Directorate of Vocational and Technical Education, institutions must prepare self-assessment reports and undergo external evaluations at least once every five years. While these evaluations provide valuable feedback for institutional improvement, the high number of institutions and the lengthy process of training quality auditors often delay the delivery of quality index scores. This study proposes a machine learning-based self-assessment and activity recommendation system to enable administrators and teachers in VTEIs to assess educational quality at their convenience. Accurate world data from selected institutions across Türkiye were obtained with official authorization, external evaluation reports were preprocessed, and dataset imbalances were addressed using the Tomek links method. Experimental analyses were conducted on balanced and unbalanced datasets using Linear, Ridge, Lasso, and ElasticNet regression algorithms, with each model executed 100 times. The lowest Mean Absolute Error (MAE) was achieved with the Multiple Linear Regression method on the balanced dataset, yielding a value of 5.00, while the mean and standard deviation of MAE across 100 runs were 7.99 and 1.04, respectively. Consequently, the Multiple Linear Regression method was selected for the self-assessment and recommendation system. Additionally, Spearman correlation analysis was applied to identify significant relationships among monitoring indicators, forming the basis for institution-specific activity recommendations. These recommendations and supporting suggestions are accessible through a web-based interface to facilitate decision-making. The findings demonstrate that the proposed system has the potential to enhance institutional effectiveness and efficiency by streamlining quality monitoring and evaluation processes in VTEIs.

To Cite: Erçin H., Acılar AM. Mesleki ve Teknik Eğitim Kurumları Dış Değerlendirme Verileriyle Tasarlanan Özdeğerlendirme ve Faaliyet Tavsiye Sistemi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1689-1710.

1. Giriş

Günümüzün karmaşık ve hızla değişen ekonomik ortamında, hem teorik bilgiyi hem de pratik becerileri öğrencilere veren, iş dünyasında talep gören nitelikli işgücünün yetiştirilmesine, istihdamın artırılmasına ve sektörel gelişimin desteklenmesine önemli katkılarda bulunan Mesleki ve Teknik Eğitim Kurumlarının (MTEK) önemi giderek artmaktadır. Teknolojik gelişmelerin hız kazandığı bu dönemde, yenilikçi düşünme ve problem çözme becerilerini öğrencilerine kazandırmayı hedefleyen bu kurumların güçlendirilmesi, ülkenin rekabet gücünü artırarak ekonomik büyümeyi sürdürülebilir şekilde desteklemektedir (Ye ve ark., 2024). MTEK'nin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi sadece işgücü piyasasını değil, aynı zamanda girişimcilik ve yenilikçilik alanlarını da kapsamakta ve gençleri kendi işlerini kurmaya teşvik etmektedir (UNESCO, 2022). Bu sebeple MTEK'nin kalitesinin değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi Millî Eğitim Bakanlığının (MEB) en önemli önceliklerinden birisi haline gelmiş ve MTEK'de, 2016 yılından itibaren Avrupa Mesleki Eğitim Kalite Göstergeleri (EC – EQAVET, 2020) ile uyumlu Kalite Güvence Sistemi uygulanmaya başlanmıştır (Mesleki ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğü, 2020).

MTEK'de Özdeğerlendirme ve Dış Değerlendirmeden oluşan Kalite Güvence Sistemi kullanılmaktadır. Dış değerlendirme raporu, Mesleki ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğü (MTEGM) tarafından görevlendirilen tetkikçiler tarafından kanıt dokümanları baz alınarak hazırlanmaktadır. Kalite güvencesi yönergesinde, dış değerlendirme faaliyetlerinin MTEGM'nin belirlediği takvim doğrultusunda beş yıl

içerisinde en az bir defa gerçekleştirilmesi ve raporların MTEK ile paylaşılması planlanmıştır (MTEGM, 2016). Raporda eğitim kurumuna ait izleme göstergeleri bir ile beş arasında puanlanmaktadır. Her okul için izleme göstergeleri verileri bu puanlamada dikkate alınmaktadır. Standart alan puan değerlerinin ortalamaları dış değerlendirme kalite indeks puanını oluşturmaktadır. Bu çalışmada makine öğrenmesi ile gerçek izleme göstergeleri verileri kullanılarak kalite puanı tahmin edilmekte ve kalite gelişimi için öneriler sunulmaktadır.

1.1 Çalışmanın Amacı, Kısıtı ve Araştırma Soruları

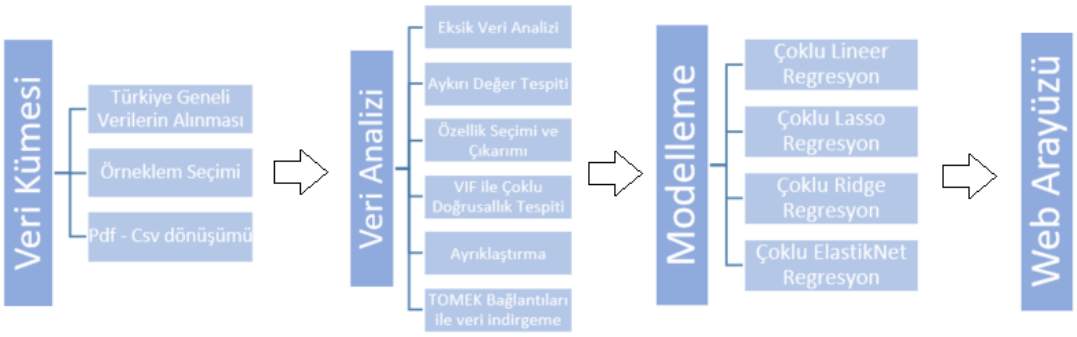
Bu çalışmanın amacı, mesleki ve teknik eğitim kurumlarında eğitim kalitesinin izlenmesi ve iyileştirilmesi sürecine katkı sağlayacak makine öğrenmesi tabanlı bir özdeğerlendirme ve faaliyet tavsiye sistemi geliştirmektir. Bu sistem, kurumların eğitim kalitesini zaman kaybı yaşamadan istedikleri an değerlendirebilmelerini sağlayarak, kalite değerlendirme süreçlerini hızlandırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, sistem, eğitim kurumlarının ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş faaliyet önerileri sunarak, verimliliklerini artırmayı amaçlamaktadır. Millî Eğitim Bakanlığı Kalite Güvence Sistemini sadece Mesleki ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğüne bağlı okullarda uygulamaktadır. İzleme göstergeleri verileri de mesleki ve teknik okullar ile uyumludur. Bu sebeple çalışma Mesleki ve Teknik Eğitim Kurumları verileri üzerinde gerçekleştirilmesi çalışmanın kısıtıdır.

Dış değerlendirmeler, okulların eğitim kaliteleri hakkında geri dönüş almaları ve kendilerini geliştirmeleri açısından önemli bir fırsattır. Ancak kurumlarının sayısının fazla olması, dış değerlendirmeyi gerçekleştirecek kalite tetkikçisi yetiştirme süreci, eğitim kurumunun kalite indeks puanını geri bildirim olarak alabilmesini geciktirmektedir. Bu sebeple çalışma aşağıda verilen araştırma sorularına odaklanmıştır.

- MTEK'lerin dış değerlendirme sürecinde yaşanan denetçi eksikliği ve gecikmeler, makine öğrenmesi tabanlı bir özdeğerlendirme sistemi ile azaltılabilir mi?
- Veri dengeleme teknikleri, özdeğerlendirme modelinin doğruluğunu etkiler mi?
- Farklı regresyon algoritmaları karşılaştırıldığında, en düşük Ortalama Mutlak Hata (OMH) değerini veren model hangisidir?
- Spearman korelasyonu kullanılarak, izleme göstergeleri arasındaki anlamlı ilişkiler belirlenebilir mi?
- MTEK'lerin özdeğerlendirme ve dış değerlendirme süreçlerine katkı sağlamak için web tabanlı bir faaliyet tavsiye sistemi gerçekleştirilebilir mi?

1.2. Çalışmanın Metodolojisi

Çalışmada, Türkiye genelinde zümrelere göre örnekleme yöntemi ile belirlenen Mesleki ve Teknik Eğitim Kurumlarına ait gerçek veriler kullanılarak bir özdeğerlendirme ve faaliyet tavsiye sistemi gerçekleştirilmiştir. Sistem geliştirilirken izlenen adımların blok diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın blok diyagramı

Şekil 1'de görüldüğü üzere çalışmanın ilk adımı olarak, MTEGM' nün dış değerlendirme portalından indirilen dış değerlendirme raporları kullanılarak veri kümesi hazırlanmış ve daha verimli bir tahminleme modeli oluşturmak için veri analizi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veri kümesine farklı çoklu regresyon algoritmaları tatbik edilerek, en uygun tahmin modeli araştırılmıştır. Elde edilen model için bir web arayüzü programı yazılmış ve mesleki ve teknik eğitim kurumları tarafından kullanılmasının alt yapısı oluşturulmuştur. Son olarak, yazılan web programı ile, eğitim kurumlarının kalite puanlarını yükseltebilmeleri için odaklanabilecekleri faaliyetler tavsiye olarak kuruma sunulmuştur. Böylece eğitim kurumları kalite indeks puanlarını, tetkikçi etkisinden bağımsız faaliyet göstergelerine göre öğrenilebilmesi hedeflenmiştir. Özdeğerlendirme sisteminde veri önişlem adımları ve çoklu lineer regresyon analizi, faaliyet tavsiye sisteminde spearman korelasyon katsayısı kullanılmıştır.

1.3. Organizasyon

Çalışmanın literatür araştırması ve literatüre katkısı ikinci bölümde, MTEGM tarafından uygulanan değerlendirme süreci ile ilgili temel bilgiler üçüncü bölümde verilmiştir. Dördüncü bölümde materyal ve metot başlığı altında, gerçekleştirilen çalışmada kullanılan veri kümesinin hazırlanması için örneklem seçimi, veri kümesine uygulanan ön işleme adımları ve kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde elde edilen bulgular sunulmuş ve geliştirilen özdeğerlendirme ve faaliyet tavsiye sistemi açıklanmıştır. Altıncı bölümde web arayüzü anlatılmış ve son bölümde ise sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Literatür Araştırması ve Çalışmanın Literatüre Katkısı

Literatür incelendiğinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmalarının mesleki eğitimde, kurumların performansını değerlendirmekten ziyade öğretmen veya öğrencilerin verdiği/aldığı eğitimin sonucundaki performanslarını ölçmeye ve tahmin etmeye odaklandığı görülmüştür (Ayazgök ve Yalçın, 2014; González-Calatayud ve ark., 2021; Namoun ve Alshanqiti, 2021; Houngue ve ark., 2022; Ma, 2022; Rodzalan ve ark., 2022; Smyshlyayeva ve ark., 2022; Nadzinski ve ark., 2023; Wang ve Li, 2024). Wang ve Li (Wang ve Li, 2024), yapay zekanın mesleki eğitimde öğretim kalitesini değerlendirmede etkili bir çözüm olarak öne çıktığını belirtmişler ve Çin mesleki beceri eğitimi kalite değerlendirmesi

için "Dikkatli Çift Kalıntılı Üretici Karşıt Ağ" (ADRGAN) ve "Ceylan Optimizasyon Algoritması" (GOA) ile optimize edilmiş bir yöntem önermişlerdir. Ma (Ma, 2022), öğrencilerin öğretmenlerin yetkinlik seviyelerinin değerlendirilmesi hakkında geri bildirimlerine dayalı olarak ders seçimlerini yapay zekâ ile optimize eden bir model geliştirmiştir. Smyshlyayeva ve ark. (Smyshlyayeva ve ark., 2022), öğretmenlerin mesleki yetkinlikleri ile öğrencilerin öğrenme sonuçları arasındaki ilişkileri incelemek için makine öğrenmesi algoritmalarının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında öğretmenlerin eksikliklerinin tespit edilmesi ve bu eksikliklerin öğrenci başarısı üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi konusunu ele almışlar ve eğitimde bütüncül bir kalite değerlendirme sistemi geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamışlardır. Namoun ve Alshanqiti (Namoun ve Alshanqiti, 2021), öğrenci performansını tahmin etmek için kullanılan yapay zeka tabanlı teknikler ile 2010 ile 2020 yılları arasında gerçekleştirilen araştırma çalışmalarını incelemiştir. ACM, IEEE Xplore, Google Scholar, Science Direct, Scopus, Springer ve Web of Science elektronik veri tabanları taramışlardır. Öğrenme çıktılarının hangi biçimlerde tahmin edildiği, öğrenci öğrenmesini tahmin etmek için geliştirilen analitik modeller ve öğrenci sonuçlarını etkileyen baskın faktörler olarak üç ana perspektiften odaklanılarak toplamda 62 ilgili çalışmayı sentezlemiş ve analiz etmişlerdir. Gonzalez ve ark. (González-Calatayud ve ark., 2021), öğrenci değerlendirmesinde yapay zeka kullanımını inceleyen sistematik bir derleme yapmışlardır. Araştırma kapsamında Scopus ve Web of Science veri tabanlarında tarama gerçekleştirilmiş ve toplamda 454 makale bulmuşlar ve PRISMA yöntemine göre bu çalışmaları analiz edip 22 adet makale seçerek incelemişler ve raporlamışlardır. Nadzinski ve ark. (Nadzinski ve ark., 2023), veri bilimi ve makine öğrenmesi yaklaşımlarının mesleki eğitimde öğretim süreçlerinin geliştirilmesindeki rolünü vurgulamışlardır. Houngue ve ark. (Houngue ve ark., 2022) Benin'de Teknik ve Mesleki Eğitim ve Öğretiminde doğru alanı seçebilmesine yardımcı olmak için, 325 öğrencinin notlarına dayanarak makine öğrenmesi algoritmalarından rastgele orman ve doğrusal destek vektör makinesi ile öğrencilerin yeteneklerini tahmin etmişlerdir. Rodzalan ve ark. (Rodzalan ve ark., 2022) Malezya'da elektrik ve elektronik alanında sektörde ve akademide bulunan 55 kişiye anket uygulamıştır. Anket sonuçlarına dayanarak, teknik ve mesleki eğitimde önemli olan mesleki becerileri tespit etmeyi hedeflemişlerdir. Özdeğerlendirmenin kalite gelişimine etkisi, Bütün ve ark. (Bütün ve Aslanargun, 2016) tarafından incelenmiş, MTEK'de öz değerlendirme aracı olarak toplam kalite yönetiminin kullanılmasını analiz etmiştir.

Literatürde özellikle makale derleme çalışmaları incelendiğinde, makine öğrenmesi algoritmalarını eğitmek için öğrencilerin derslerden aldıkları notlar, doldurdukları anketler vb. yöntemler ile öğrenciden elde edilen geri dönüş bilgilerinin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmaların çoğunda elde edilen çıktı özdeğerlendirme ile gelişimi beklenen bilgi ve beceriler, özdeğerlendirme alanları ve göstergelerinin tespit edilmesi, öğrenci/eğiticinin performansının tahmini iken az sayıda çalışmada kurumun hangi alanlarının geliştirilmesi gerektiğin tespiti üzerinedir. Diğer bir ifade ile kurumların kalite güvence sistemlerine makine öğrenmesi ile katkı sağlanırken özdeğerlendirme yoluyla elde edilen verilere

odaklanılmaktadır (Grech ve Camilleri, 2020; Waweru, 2021; Ahadi ve ark., 2022; Windelband, 2023; Yazgın, 2024). Yapılan literatür taraması sonucu, çalışmanın literatüre katkısı aşağıda listelenmiştir.

- Literatürde, bir uzman tarafından gerçekleştirilen kurum dış değerlendirme verilerine dayalı tasarlamış bir özdeğerlendirme sistemine rastlanmamıştır. Bu çalışmada kullanılan veri seti, Türkiye genelinde dış değerlendirme sonucu elde edilen verilerden oluşturulmuştur. Dış değerlendirme, değerlendirilmesi yapılacak eğitim kurumunda görev yapmayan ve Millî Eğitim Bakanlığı tarafından görevlendirilen, alanında uzman kalite tetkikçileri tarafından kanıtlara dayalı olarak gerçekleştirilmektedir.
- Denetlenecek kurum sayısının fazla oluşu, dış değerlendirmeyi gerçekleştirecek kalite tetkikçilerinin yetiştirilme süreci ve pandemi gibi zorunlu sebepler, kalitede sürekliliği engelleyebilmektedir. Bu sorunlara bir çözüm önerisi olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, öğretmen ve idarecilerin kurumun kalitesini sürekli takip edebilmesini sağlayacaktır. Kalite iyileştirmede rehber olabilecek gerçek dış değerlendirme verileri ile eğitilmiş makine öğrenmesi tabanlı bir özdeğerlendirme ve tavsiye sistemi geliştirilmiştir.

3. Özdeğerlendirme ve Dış Değerlendirme Süreci

Öz değerlendirme ve dış değerlendirme, MTEK'te kalite takibinin gerçekleştirilmesi açısından önem arz eden süreçlerdir. Bu sayede kalite seviyesinin yükseltilmesi ve kalite güvence sisteminin desteklenmesi hedeflenir. Özdeğerlendirme ve Dış Değerlendirme Şekil 2'de sunulan kalite standartlarını değerlendirmek ve standartları ne kadar sağlandığını tespit etmek için uygulanmaktadır. MTEK'da 2016 yılından itibaren Özdeğerlendirme raporları hazırlanmaktadır. Özdeğerlendirme, Şekil 2(a)'da verilen standartlar doğrultusunda kurumların kendilerini değerlendirmeleridir. MTEGM tarafından kurum dışından görevlendirilen tetkikçilerin bu raporları ve yapılan görüşmelerden elde edilen sözlü verileri kanıt evrakları ile teyit ederek değerlendirmesine dış değerlendirme süreci ismi verilmektedir (MTEGM, 2016). Dış değerlendirme sürecinde bulunan ve Şekil 2(b)'de verilen beş standart alan, Avrupa Mesleki Eğitim Kalite Göstergeleri ile uyumlu 30 gösterge içerir (EC - EQAVET, 2020). Bu göstergeler, eğitim kurumunun mevcut durumunu değerlendirmeye yardımcı olur iken geliştirilebilir alanları belirlemeye de katkı sağlar ve kurumların eylem planları oluşturmasında kullanılabilirler.



(a) (b)

Şekil 2. (a) Özdeğerlendirme (b) Dış Değerlendirme Kalite Standartları (MTEGM, 2016)

Dış değerlendirme sürecinin işleyişinde, MTEGM tarafından belirlenen dış değerlendirme ekipleri görevlendirilir. Sektör temsilcileri veya MEB personeli gerekli eğitimleri almışlar ise ekiplerde görevlendirilebilirler. Dış değerlendirme için istenilenler dış değerlendirme portalına (MTEGM, 2000) kaydedilir ve onaylanır. Dış Değerlendirme Portalından Okul Öz Değerlendirme Kapasitesi ve İzleme Göstergeleri ’ne ait örnek ekran görüntüleri sırası ile Şekil 3(a) ve (b)’de gösterilmiştir.

Görevlendirilen dış değerlendirme ekibi, değerlendirme aşamasından önce okula ait özdeğerlendirme rapor ve planları inceler. Okulu ziyaret ederek yürütülen çalışmaları yerinde gözlemler. Standart alanların puanlanmasına esas kanıt belgelerini inceler ve dış değerlendirme taslak raporunu dış değerlendirme portalı üzerinden hazırlar. Taslak rapor ilgili eğitim kurumu ile paylaşılır ve geri dönüşler alındıktan sonra portal üzerinden onaylanır.



OKUL/KURUM ÖZ DEĞERLENDİRME KAPASİTESİ

Öz Değerlendirme Hazırlık Süreci

Ölçüt	Yeterli	Yetersiz
Öz değerlendirmeye ilişkin görev dağılımının güncellenmesi ve duyurulması	◉	○
Öz değerlendirme süreci için okul/kurum yönetimi, alanlar ve genel bilgi dersi zümrelerince katılımcıların bilgilendirilmesi ve toplantıya çağrılması	◉	○
İlgili paydaşların öz değerlendirme toplantılarına yazı ile davet edilmesi	○	◉
Öz değerlendirmenin kurul toplantılarında gündeme alınması ve değerlendirilmesi	○	◉
Öz değerlendirme sürecinde kullanılacak veri, rapor ve tutanakların hazırlanması	○	◉

Öz Değerlendirme Uygulama Süreci

Ölçüt	Yeterli	Yetersiz
Öz değerlendirmede yer alan standartlara ait soruların kanıt temelli rasyonel olarak değerlendirilmesi ve buna ilişkin eylem planları ve faaliyetlerin oluşturulması	◉	○
Öz değerlendirmede kapsamlı bir analiz çalışması yapılarak veriler ile değerlendirmelerin uyumu *(Bu süreçte tutanaklar ve kullanılan kanıt dosyalardaki veriler incelenecek. Ayrıca web sayfasında yer alan öz değerlendirme raporları kullanılacak.)*	○	◉
Öz değerlendirme toplantı tutanaklarının hazırlanması ve dosyalanması	○	◉
Öz değerlendirme rapor ve eylem planlarının oluşturulması	◉	○

Öz Değerlendirme Sürecinde Planlanan Faaliyetlerin Amaca Uygunluğu ve Gerçekleşme Durumu

Ölçüt	Yeterli	Yetersiz
Öz değerlendirme raporunda yer alan faaliyetlerin okulun mevcut ve potansiyel kaynaklarının sevk ve idaresine uygunluğu	◉	○
Faaliyetlerin öğrencilerin nitelikli eğitim almasına katkılarının değerlendirilmesi *(Örneğin; öğrencilerin iş yeri tabanlı eğitime başlamadan önce işletmelerde ve okulda ilgili öğretmenlerin nezaretinde uyum programına dahil edilmesi, akademik başarısı düşük olan öğrenciler için zümrelerce zenginleştirilmiş öğretim tekniklerinin hazırlanması ve uygulanması vb.)*	○	◉
Öz değerlendirme faaliyet planında yer alan faaliyetlerin belirli aralıklarla gerçekleşme durumunun raporlanması	○	◉
Öz değerlendirme raporlarının incelenmesi ve eylem planlarının gerçekleşme durumlarının değerlendirilmesi	○	◉



OKUL/KURUM ÖZ DEĞERLENDİRME KAPASİTESİ

Öz Değerlendirme Hazırlık Süreci

Ölçüt	Yeterli	Yetersiz
Öz değerlendirmeye ilişkin görev dağılımının güncellenmesi ve duyurulması	◉	○
Öz değerlendirme süreci için okul/kurum yönetimi, alanlar ve genel bilgi dersi zümrelerince katılımcıların bilgilendirilmesi ve toplantıya çağrılması	◉	○
İlgili paydaşların öz değerlendirme toplantılarına yazı ile davet edilmesi	○	◉
Öz değerlendirmenin kurul toplantılarında gündeme alınması ve değerlendirilmesi	○	◉
Öz değerlendirme sürecinde kullanılacak veri, rapor ve tutanakların hazırlanması	○	◉

Öz Değerlendirme Uygulama Süreci

Ölçüt	Yeterli	Yetersiz
Öz değerlendirmede yer alan standartlara ait soruların kanıt temelli rasyonel olarak değerlendirilmesi ve buna ilişkin eylem planları ve faaliyetlerin oluşturulması	◉	○
Öz değerlendirmede kapsamlı bir analiz çalışması yapılarak veriler ile değerlendirmelerin uyumu *(Bu süreçte tutanaklar ve kullanılan kanıt dosyalardaki veriler incelenecek. Ayrıca web sayfasında yer alan öz değerlendirme raporları kullanılacak.)*	○	◉
Öz değerlendirme toplantı tutanaklarının hazırlanması ve dosyalanması	○	◉
Öz değerlendirme rapor ve eylem planlarının oluşturulması	◉	○

Öz Değerlendirme Sürecinde Planlanan Faaliyetlerin Amaca Uygunluğu ve Gerçekleşme Durumu

Ölçüt	Yeterli	Yetersiz
Öz değerlendirme raporunda yer alan faaliyetlerin okulun mevcut ve potansiyel kaynaklarının sevk ve idaresine uygunluğu	◉	○
Faaliyetlerin öğrencilerin nitelikli eğitim almasına katkılarının değerlendirilmesi *(Örneğin; öğrencilerin iş yeri tabanlı eğitime başlamadan önce işletmelerde ve okulda ilgili öğretmenlerin nezaretinde uyum programına dahil edilmesi, akademik başarısı düşük olan öğrenciler için zümrelerce zenginleştirilmiş öğretim tekniklerinin hazırlanması ve uygulanması vb.)*	○	◉
Öz değerlendirme faaliyet planında yer alan faaliyetlerin belirli aralıklarla gerçekleşme durumunun raporlanması	○	◉
Öz değerlendirme raporlarının incelenmesi ve eylem planlarının gerçekleşme durumlarının değerlendirilmesi	○	◉

Şekil 3. Dış değerlendirme portalı "Öz Değerlendirme Kapasitesi" ve "İzleme Göstergeleri" için örnek ekran görüntüleri (MTEGM, 2000)

Dış değerlendirme raporunda, muhtemel kanıt belgeleri ile uyumlu olan, eğitim öğretim faaliyetleri içerisinde gerçekleştirilen izleme gösterge verileri bulunur. Toplamda 94 adet "izleme gösterge verisi" raporda yer almaktadır. İzleme gösterge verilerine örnek olarak Toplam Öğrenci Sayısı, Disiplin Cezası Alan Öğrenci Sayısı, Paydaşların öğrenci ve öğretmenlere yönelik yapılan sosyal ve kültürel etkinliklere sponsor olma durumu, Öğrencilerin mesleki bilgi ve görgülerini artırmak için yapılan sektör ziyaretleri, Erasmus+ Mesleki Eğitim Hareketliliği Akreditasyon Belgesinin olması, Kütüphanede bulunan kitap sayısı, Kütüphaneden yararlanan öğrenci sayısı, Okulda eğitimi yapılan alanlarla ilgili kitap sayısı, Öğrenciye yönelik düzenlenen Kariyer günlerinin sayısı, Veliye yönelik düzenlenen Kariyer günlerinin sayısı, Öğrencilere yönelik aile Bilgilendirme Toplantı Sayısı, Velilere yönelik aile Bilgilendirme Toplantı Sayısı, İşveren ziyaretleri (Sadece Mesleki Eğitim Merkezleri) vb. alanlar sayılabilir. Göstergeler ile uyumlu muhtemel kanıt belgelerine örnek olarak; Misyon Bildirisi, Rehberlik Kayıtları, Sektörle İşbirliğine Dair Kanıtlar, Sektörle Yapılan İşbirliğine Dair Kayıtlar, İstihdam Göstergeleri, Personel Toplantı Kayıtları, Haberler/Duyurular, Müfredat ve Eğitim Programlarının Değerlendirilmesine İlişkin Kayıtlar, Belge Kontrol Sistemi, Kurumun Web Sitesi, Dilek ve Şikâyet Kutusu Kayıtları, Staj Kontrol Kayıtları, vb. verilebilir.

4. Materyal ve Metot

Bu bölümde öncelikle veri kümesini oluşturma ve veri ön işleme adımları anlatılmış, devamında çalışmada kullanılan metotlar açıklanmıştır. Çalışma, MTEGM'nin 06.11.2020 tarihli ve 20880154-605.01-E.16232263 Numaralı izni ile Türkiye genelinde zümrelere göre örnekleme yöntemi ile belirlenen MTEK'na ait gerçek veriler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Seçilen eğitim kurumlarına ait dış

değerlendirme raporları, kendisi de dış değerlendirici olan ilk yazar tarafından, dış değerlendirme portalından kendisine verilen izin ile .pdf formatında indirilmiştir. Her bir pdf dosyasında yer alan göstergeler, araştırmacı tarafından elektronik tablo uygulamasına geçirilmiştir. Her bir eğitim kurumu için, raporda bulunan Kurum Kalite indeks puanı da çıkış olarak eklenmiş ve .csv uzantılı olarak dosya kaydedilmiştir. Bu sayede çalışmada kullanılacak olan veri kümesinin oluşturulması sağlanmıştır.

4.1. Zümrelere göre Örnekleme Yöntemi ile Eğitim Kurumlarının Seçimi ve Veri Kümesinin Oluşturulması

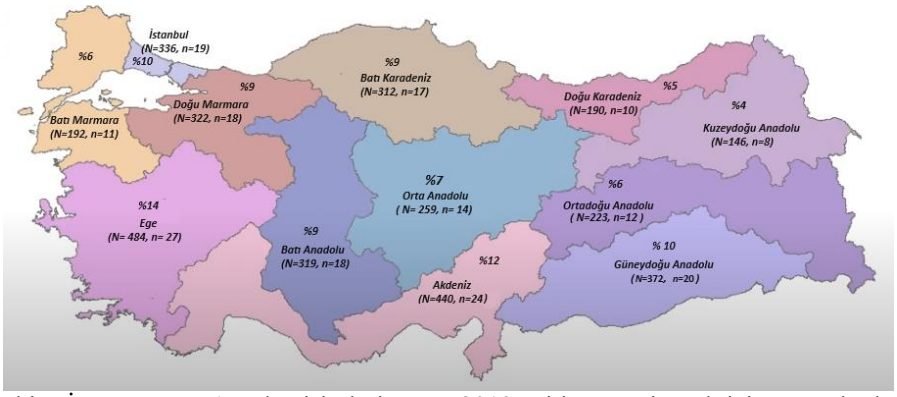
Evrenin geniş bir coğrafyaya yayılması ve hacminin büyük olması durumunda, rastgele örnekleme yöntemlerini kullanılması yerine zümre (tabaka) adı verilen ve evreni kendi içinde homojen alt gruplara ayırarak kullanmak daha pratik ve uygulanabilir bir yöntem olmaktadır (Tashakkori ve Teddlie, 2010). Bu alt gruplardan, örnek birimlerin seçilmesi ile oluşturulan örnekleme yöntemine zümrelere göre örnekleme denir. Ana kütle zümrelere ayrılırken, ele alınan sorun kriterlerine göre zümreler oluşturulur (İslamoğlu ve Alnıaçık, 2016).

Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) Müsteşarlığı ve Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından Türkiye'de İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflandırması (İBBS) tanımlanmıştır. Üç düzeyden oluşan bu sınıflandırma, 28 Ağustos 2002 tarihli Bakanlar Kurulu Kararı ile yürürlüğe girmiştir. Yapılan sınıflandırmada, iller düzey 3 seviyesi olarak kabul edilmiş, ekonomik, sosyal ve coğrafi yönden benzerlik gösteren komşu iller ise bölgesel kalkınma planları ve nüfus büyüklükleri dikkate alınarak "Düzey 1" ve "Düzey 2" olarak gruplandırılmıştır (TC Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023). Bu çalışmada zümre olarak, 12 farklı Türkiye istatistiki bölge birimini içeren Düzey 1 bölgelerinde yer alan mesleki eğitim kurumları (okulları) kullanılmıştır. Zümrelere göre örneklem boyutu Eş. 1'de verilen Orantılı Dağıtım Yöntemi ile belirlenmiştir.

$$n_h = n * \frac{N_h}{N} \tag{1}$$

Bu eşitlikte, n_h : h. no'lu zümreden çekilecek örnek sayısını, n: örneklem büyüklüğünü, N_h: h. zümredeki birim (bu çalışma için okul) sayısını, N: ana kitle büyüklüğünü, h: zümre numarasını *(*h=1, …, *H), H*: zümre sayısını göstermektedir. Bu çalışmada, zümrede yer alan birimler mesleki ve teknik eğitim okullarıdır. Toplam okul sayısı N=3595'tir. Örneklem büyüklüğü dış değerlendirme raporları bulunan eğitim kurumlarından en fazla sayıda okul dahil edilerek belirlenmiş ve n = 198 olarak seçilmiştir. Her bir zümreye düşen örnek sayısı n_h Eş. 1'e göre hesaplanmıştır (Er ve Keskintürk, 2006). Zümre olarak kullanılan İBBS Düzey-1 bölge isimleri, her bir bölgede yer alan okul sayısı (N), zümrelere göre hesaplanan örnek sayıları (n) ve her bir zümreden seçilen örnek sayısının örneklemin yüzde kaçına karşılık geldiği Şekil 4'te verilen harita üzerinde gösterilmiştir. Bu çalışmada 2018 ve 2019 yıllarına ait Dış değerlendirme verileri kullanıldığı için MEB 2018-2019 yılına ait okul sayıları gösterilmiştir. 2020 yılında pandemi nedeniyle dış değerlendirme faaliyetlerine ara verilmiş ve

sonrasında kalite tetkikçisi yetiştirme sürecinde oluşan sorunlar ve tasarruf tedbirleri nedeniyle o tarihten sonra dış değerlendirme yapılamamıştır. Çalışmamızda kullanılan veriler Milli Eğitim Bakanlığı'nın güncel verileridir.



Şekil 4. Türkiye İBBS Düzey-1 Bölge isimleri, 2018-2019 eğitim öğretim yılı için zümrelerde yer alan okul sayısı (N), zümrelere göre örnek sayıları (n), örneklem yüzdeleri

Seçilen 198 okulun dış değerlendirme raporunda yer alan 94 adet *izleme gösterge verisi*, veri kümesinin giriş niteliklerini oluştururken bu okullara ait *kalite indeks değeri* veri kümesinin çıkış değerini oluşturmaktadır. Bölüm 4.2'de açıklanan veri ön işleme adımları uygulandıktan sonra nihai veri seti 181 okula ait 62 öznitelik verisinden oluşur hale gelmiştir. Her bir özniteliğin ortalamasının sunulduğu Şekil 7'den öznitelik isimlerine ulaşılabilir.

4.2. Veri Ön İşleme Adımları

Makine öğrenmesi algoritmalarının, oluşturulan veri kümesine etkili bir şekilde uygulanabilmesi için uygulanan veri ön işleme adımları bu bölümde açıklanmıştır. Bu çalışmada veri önişlem adımları olarak, eksik verilerin bulunması ve işlenmesi, nitel (kategorik) verilerin nicelleştirilmesi, aykırı verilerin veri setinden çıkarılması ve belirlenen alanların oransal olarak dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Devamında çoklu doğrusal bağlantılar tespit edilmiş ve veri seti dengelenmiştir.

Eksik veri, ölçüm veya kayıt hataları, yanlı veya yanlış örnek kullanımı gibi çeşitli nedenlerle, veri setindeki özniteliklere ait bazı girdilerin bulunmaması durumudur (Aydın, 2021). Bir veri setinde eksik verilerin varlığı söz konusu olduğunda, bu eksikliklerin nedenlerini anlamak kritik öneme sahiptir. Eksikliğin sebebi anlaşıldığında, eksik verilere uygun değerler atamak için doğru bir yöntem seçilebilir veya geliştirilebilir (Doger, 2020). Raporlar incelendiğinde, okullarda yapılmayan ya da olmayan göstergelerin boş bırakıldığı görülmüştür. Örneğin boş bırakılan sportif faaliyetler ödül sayısı bilgi eksikliğinden değil, sportif bir faaliyette daha önce herhangi bir ödül alınmadığından dolayı boş bırakıldığı görülmüştür. Bu sebeple eksik bilgilere 0 (Sıfır) ataması yapılmıştır. Başka tür bir eksik bilgiye rastlanılmamıştır.

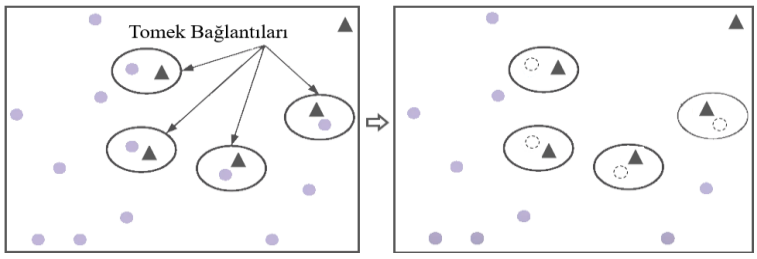
Bir veri kümesinde, diğer gözlemlerden önemli ölçüde farklı olan ve genellikle beklenmeyen veya nadir bir durumu temsil eden veri noktasına aykırı değer denir (Ovla ve Taşdelen, 2012). Aykırı veri tespiti için bu çalışmada kutu grafikleri (box plots) kullanılmıştır.

Kategorik türde olan değişkenlerin, çoklu regresyon yöntemlerinde kullanılabilmesi için kategorik kodlama (encoding) ön işlemi gerçekleştirilmiştir. Çoklu regresyon yönteminin uygulanabilmesi için, kategorik değişkenlere one hot kategorik dönüşümü uygulanmıştır. Dönüşüm sonucu oluşan kukla değişkenler veri setinden çıkarılmıştır.

Veri setinde bulunan disiplin cezası, paydaşların desteği ile burs alan öğrenci sayısı, sektör ziyaretlerine katılan öğrenci sayısı ve Ödül, Başarı ve üstün başarı belgesine sahip personel sayı değerleri eğitim kurumunun öğrenci ve personel sayılarından etkilenmektedir. Çok öğrenciye sahip olan okullar için yüksek değerler çıkarken, az öğrencili okullar için düşük değerler çıkabilmektedir. Çözüm olarak sayılar yerine, bu alanların öğrenci sayısı veya personel sayısından uygun olanına oranlanarak kullanılmıştır.

Çoklu doğrusal bağlantının saptanmasında Varyans Şişkinlik Faktörü (VIF, Variance Inflation Faktor) kullanılarak, sistemdeki her bir bağımsız değişken için VIF değeri hesaplanmıştır. VIF değeri 5'ten büyük 10'dan küçükse çoklu doğrusal bağlantı, VIF 10'a eşit veya daha büyük ise yüksek düzeyde çoklu doğrusal bağlantı problemi söz konusudur (Albayrak, 2005). "Bilimsel Derece Sayısı-Bölgesel Alanı" özniteliğin 7,36 VIF değerine sahip olduğu için veri kümesinden çıkarılmıştır.

Dış değerlendirme belgelerindeki okullara ait "kurum kalite indeks puanı" verileri incelendiğinde dağılımın dengesiz olduğu görülmüştür. Dengesizliği gidermek için Tomek bağlantıları (Pereira ve ark., 2020) kullanılarak veri azaltılmıştır. Şekil 5'te bu sürece bir örnek verilmiştir. Şekil 5(a)'da, azınlık sınıfına ait veriler üçgen, çoğunluk sınıfına ait veriler daire ile gösterilmiştir. Komşu olan çiftler belirlenmiş ve çoğunluk sınıfına dahil olanlar veri kümesinden çıkarılmıştır. Veri setinden çıkarılan veriler kesikli çizgi ile Şekil 5(b)'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 5. Tomek Bağlantıları ile veri azaltarak dengelemeye bir örnek (a) Öncesi (b) Sonrası

"Kurum kalite indeks puanı" sürekli nicel bir veri türünde olduğu için, Tomek bağıntıları yöntemi direkt veri kümesine uygulanamamıştır. Bu sebeple "Kurum kalite indeks puanı" Eşit Genişlikli Ayrıklaştırma (EGA) yöntemi ile beş sınıfa ayrılarak, kategorik türe dönüştürülmüştür. EGA yönteminde sınıf genişlikleri ve her bir sınıfa ait kesme noktaları sırası ile Eş. 2 ve Eş. 3 kullanılarak belirlenmiştir.

$$SG = \frac{V_{max} - V_{min}}{K} \quad (2)$$

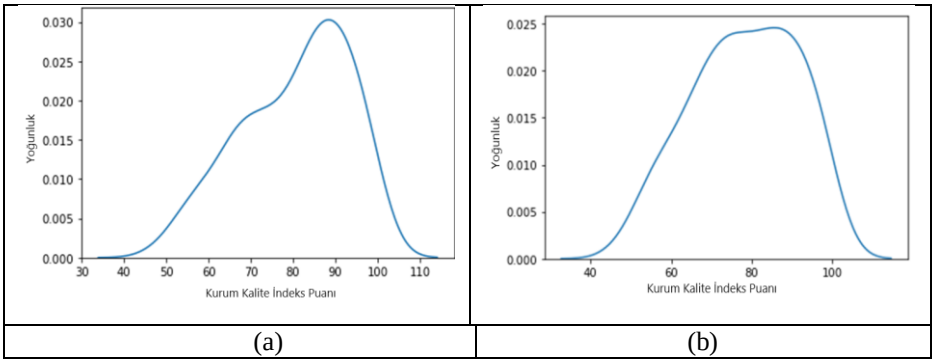
$$KesmeNoktasi_k = V_{min} + \sum_{i=1}^{k} SG \quad (3)$$

Burada, V_{min}: minimum Kurum kalite indeks puanını, V_{max}: maksimum Kurum kalite indeks puanını, K : sınıf sayısını, k : sınıf numarasını (k=1,..,K), SG : sınıf genişliğini göstermektedir. EGA yöntemi ile elde edilen Kurum Kalite İndeks puanı için sınıf aralıkları Tablo 1'de verilmiştir. Bu sayede sürekli olan çıkış değeri ayrıklaştırılarak, Tomek bağlantı linklerinin kullanılabilmesi sağlanmıştır.

Tablo 1. Eşit genişlikli ayrıklaştırma ile elde edilen sınıf aralıkları

k	Puan Aralıkları
1	48,00 – 58,40
2	58,41 – 68,80
3	68,81 – 79,20
4	79,21 – 89,60
5	89,61 – 100

Dengeleme işleminden önce ve sonraki eğitim kurumlarının "Kurum kalite indeks puanları" yoğunluk grafikleri sırası ile Şekil 6(a) ve (b)'de gösterilmişidir.



(a) (b)

Şekil 6. "Kurum Kalite indeks puanları" yoğunluk grafikleri (a) Dengeleme öncesi (b) Dengeleme sonrası

Veri ön işleme adımları tamamlandıktan sonra tasarlanacak özdeğerlendirme ve tavsiye sistemi için kullanılacak nihai veri kümesinde Tomek ile indirgendiği için 181 veri kaydı ve 62 öznitelik değeri kalmıştır.

Devamında 62 öznitelik verilerin ayrı ayrı normal dağılıma uyup uymadığını test etmek için % 95 güven seviyesinde shapiro-wilk istatistiki testi uygulanmış ve dönen p-değerleri incelenmiştir. Tüm değişkenler için geriye dönen p-değerleri 0,05'ten küçük olduğu için değişkenlerin normal dağılım göstermediği sonucuna varılmıştır. Bu sebeple non parametrik bir yöntem olan Spearman sıra korelasyon fonksiyonu ile değişkenler arası korelasyon katsayıları hesaplanmış ve bulgular Bölüm 5.3'te sunulmuştur.

Spearman sıra korelasyon katsayısının formülü Eş.4'te verilmiştir. Hesaplanan sıra korelasyon katsayılarının anlamlılığı, %99 güven seviyesi için Eş.5'te verilen test istatistiği kullanılarak test edilmiştir.

$$\rho_s = 1 - \left(\frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)}\right) \quad (4)$$

$$t = \frac{\rho\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{1-\rho^2}} \quad (5)$$

Burada; ρ= spearman sıra korelasyon katsayısını, $d_i = x_i$ ve y_i 'ye ait sıra farkını, n= gözlem sayısını, x ve y korelasyonu hesaplanacak değişkenleri, i=1…n olacak şekilde sıra numarasını göstermektedir. Eşitlik (5)'de yer alan t hesaplanan test istatistiği değerini, ρ hesaplanan Spearman sıra korelasyon katsayısı değerini, n ise örneklem sayısını, *(n-2)* serbestlik derecesini ifade etmektedir.

4.3. Çoklu Doğrusal Regresyon

Regresyon analizi, istatistiksel tabanlı bir makine öğrenmesi yöntemdir ve bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi inceleyerek tahminlerde bulunmamıza yardımcı olur. Gerçek izleme göstergeleri verileri kullanılarak kalite puanı tahmin edilebilmesi için hazırlanan veri setine regresyon analizi uygulanmıştır. Bu çalışmada, Eş. 6'da formülü verilen çoklu lineer regresyon yöntemi, bu formüle düzenleme terimi eklenerek elde edilen ve formülleri sırası ile Eş. (7), (8) ve (9)'da verilen Lasso, Ridge ve ElastikNet regresyon yöntemleri kullanılmıştır.

$$Y = X\beta + e \quad (6)$$

$$\min_{\beta}\left(\frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - X_i\beta)^2 + \lambda\sum_{j=1}^{p}|\beta_j|\right) \quad (7)$$

$$\min_{\beta}\left(\frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - X_i\beta)^2 + \lambda\sum_{j=1}^{p}\beta_j{}^2\right) \quad (8)$$

$$\min_{\beta}\left(\frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - X_i\beta)^2 + \lambda_1\sum_{j=1}^{p}|\beta_j| + \lambda_2\sum_{j=1}^{p}\beta_j{}^2\right) \quad (9)$$

Bu formüllerde, Y = bağımlı değişkeni, X = N×p boyutunda bağımsız değişkenleri temsil eden matrisi, β = p×1 boyutunda regresyon katsayılarını içeren vektörü, e = hata terimini, N= kayıt sayısını, p = öznitelik sayısını, λ=düzenleme katsayısını, λ_1= L_1 normu (mutlak toplam) düzenleme teriminin katsayısını, λ_2= L_2 normu (karesel toplam) düzenleme teriminin katsayısını temsil etmektedir.

Bu çalışmada Lineer, Lasso, Ridge ve ElastikNet çoklu regresyon algoritmaları ayrı ayrı model kurmak için kullanılmış ve başarıları incelenmiştir. Veri kümesindeki her bir okula ait kalite indeks puanları ile regresyon modelinin tahmin ettiği kalite indeks puanları arasındaki farkların toplamının ortalaması, ortalama mutlak hata (OMH) metriği ile ölçülmüştür. Ortalama mutlak hatanın formülü Eş. 10'da verilmiştir.

$$OMH = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y - y_{hesap}) \quad (10)$$

Bu formülde, *OMH* = ortalama mutlak hatayı, *y*= okulun gerçek kalite indeks puanını, y_{hesap} = regresyon algoritması tarafından hesaplanan kalite indeks puanını sonucunu *n*= veri sayısını temsil etmektedir. Çoklu regresyon analiz yöntemlerinden elde edilen bulgularda sunulmuştur.

5. Öz değerlendirme ve Tavsiye Sistemi Tasarımı

5.1. Çoklu Doğrusal Regresyon Analiz Bulguları

MTEGM'in dış değerlendirmeleri okulların eğitim kaliteleri hakkında geri dönüş almaları ve kendileri bu doğrultuda geliştirmeleri açısından önemli bir fırsattır. Ancak tetkik edilecek okul sayısının yüksek olması, eğitim süreci tamamlanmış tetkikçi sayısının yeterli olmaması, tetkikçi yetiştirme prosedürü ve oluşabilecek bir pandemi vb. durumlar dış değerlendirme periyod aralıklarının uzamasına sebep olabilmekte ve eğitim kurumunun kalite değerlendirme bilgilerini geri bildirim olarak alabilmesini geciktirebilmektedir. Bu gibi durumlarda, okul yönetimi, dış değerlendirme kriterlerine göre kendi kalite indeks puanının tahmini değerini öğrenerek öz değerlendirmesini yapmak ve kendini geliştirmek için hangi faaliyetlere odaklanacağını belirlemek isteyebilir. Bu amaçla, bu çalışmada makine öğrenmesi tabanlı bir öz değerlendirme ve faaliyet tavsiye sistemi tasarlanmış ve okullar tarafından rahatça kullanılabilmesi için bir web arayüz programı yazılmıştır. Makine öğrenmesi için Lineer, Lasso, Ridge ve ElastikNet Regresyon algoritmaları ayrı ayrı kullanılmış ve performansları kıyaslanmıştır. Performansları kıyaslamak için, öncelikle hazırlanan veri kümesinin dengelenmeden önceki ve sonraki halleri %80 eğitim ve %20 test olmak üzere ikiye bölünmüştür. Eğitim kümeleri Lineer Regresyon, Lasso, Ridge ve ElastikNet yöntemleri ile ayrı ayrı eğitilmişlerdir. Bu süreç 100 kez tekrar edilmiş ve test kümeleri için ayrı ayrı OMH değerleri hesaplanmıştır. Çoklu regresyon analiz yöntemlerine göre en iyi diğer bir deyişle en düşük OMH sonuçları, OMH'lerin ortalama ile standart sapma değerleri, dengeleme öncesi için Tablo 2 içerisinde ve sonrası için Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Dengeleme öncesi çoklu regresyon analizlerine göre test kümesi için ortalama ve en düşük OMH sonuçları

	Ortalama OMH±std	**En düşük OMH**
Çoklu Lineer Regresyon	9,18±1,03	6,88
Çoklu Lasso Çoklu Regresyon	10,98±1,13	7,88
Çoklu Ridge Regresyon	**8,79 ± 0,92**	**6,85**
Çoklu ElastikNet Regresyon	10,98±1,13	7,88

Tablo 3. Dengeleme sonrası çoklu regresyon analizlerine göre test kümesi için ortalama ve en düşük OMH sonuçları

	Ortalama OMH±std	**En düşük OMH**
Çoklu Lineer Regresyon	**7,99 ± 1,04**	**5,00**
Çoklu Lasso Çoklu Regresyon	11,35 ± 1,18	8,08
Çoklu Ridge Regresyon	8,20±0,94	5,93
Çoklu ElastikNet Regresyon	11,35± 1,18	8,08

Dengeleme öncesi, 100 defa çalıştırma içerisinden en düşük OMH değerleri Ridge regresyon yöntemi ile **6,85** olarak elde edilmiştir. Dengeleme sonrası için ise 100 defa çalıştırma içerisinden en düşük OMH değerleri Lineer regresyon yöntemi ile **5,00** olarak bulunmuştur. Ortalama OMH ve standart sapma değerleri incelendiğinde en küçük değerlerinin çoklu lineer regresyon tarafından sırasıyla **7,99** ve **1,04** olarak bulunduğu görülmektedir. Yapılan deneysel çalışma sonuçlarına dayanarak, dengeleme sonrası Çoklu Lineer Regresyon algoritması ile elde edilen en düşük OMH'ya sahip modelin özdeğerlendirme ve tavsiye sistemlerinin geliştirilmesi için kullanılmasına karar verilmiştir.

5.2. Faaliyet Tavsiye Sistemi

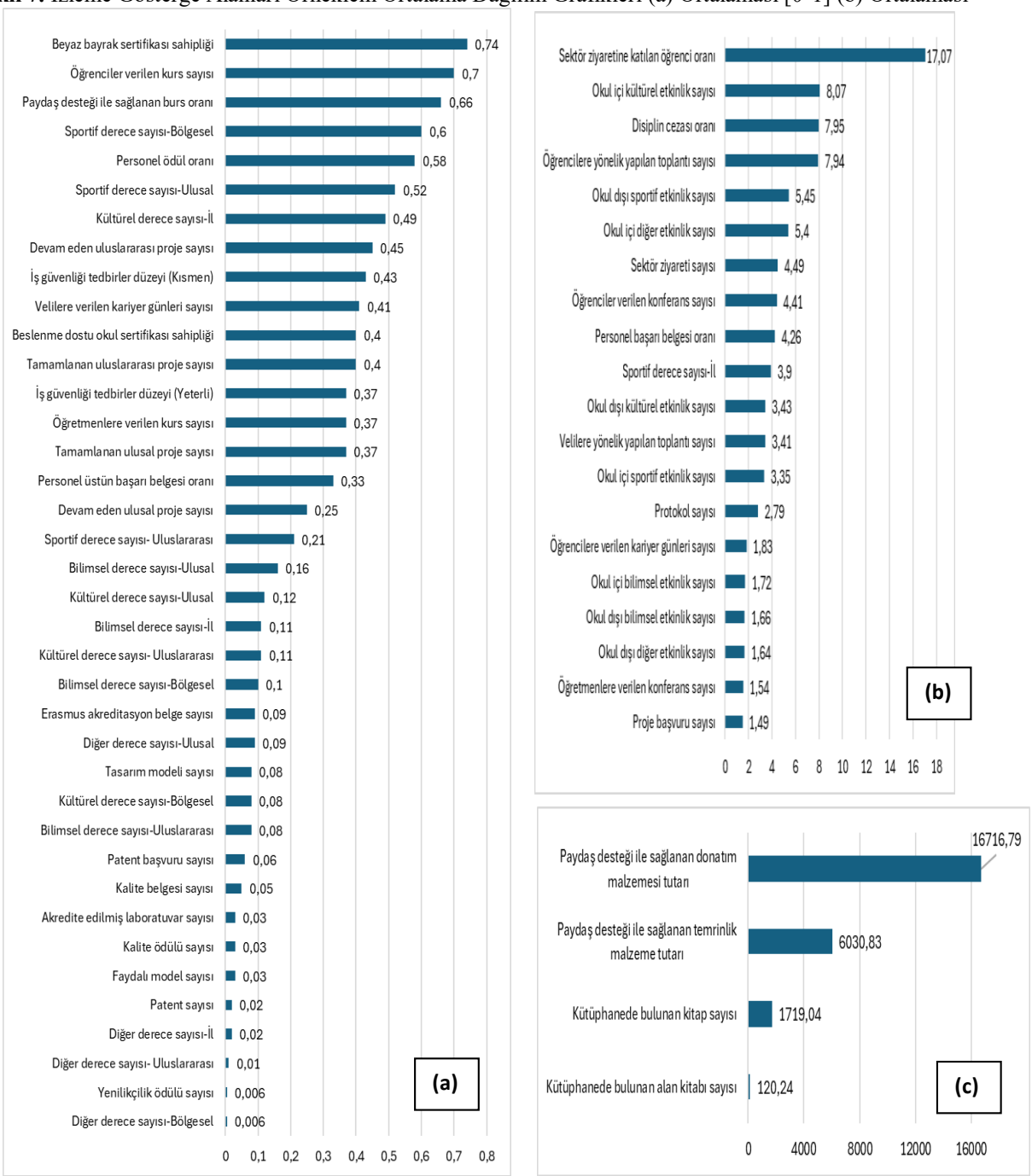
Bu bölümde eğitim kurumlarının kalitelerini artırmak için gerçekleştirecekleri faaliyetlerin seçiminde yardımcı olması amacıyla geliştirilen faaliyet tavsiye sistemi açıklanmıştır. İki aşamalı olarak tasarlanan faaliyet tavsiye sisteminin ilk aşamasında, filtreleme amacıyla kullanılmak üzere, veri setinde yer alan izleme göstergelerinin örneklem ortalamaları hesaplanmış ve bu değerler Şekil 7(a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir.

İzleme gösterge alanlarına ait örneklem ortalama değerlerinin, dağılım grafiklerinde daha anlaşılır gözükmesi için ortalamalar [0-1], [1,1-100] ve [100,1-17000] şeklinde üç aralığa bölünerek sırası ile Şekil 7 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Tavsiye almak isteyen eğitim kurumuna ait faaliyet değeri, ortalama değerinin altında ise ya da ilgili gösterge eğitim kurumunda bulunmuyorsa, bu alanlar tavsiye şeklinde döndürülmüştür. İkinci aşamada, tavsiye edilen bu faaliyetler ile %99 güven seviyesi için anlamlı korelasyonu olan alanlar destekleyici tavsiyeler olarak sunulmuştur.

6. Öz değerlendirme ve faaliyet tavsiye sistemi için Web ara yüzünün hazırlanması

Eğitim kurumlarının, geliştirilen özdeğerlendirme ve tavsiye sistemini kullanarak tahmini kalite indeks puanlarını öğrenebilmeleri ve faaliyet tavsiyeleri alarak ileriye dönük planlamalar yapabilmelerini mümkün kılan bir web arayüzü yazılmıştır. Web arayüzü için ASP.Net kullanılmıştır. Web ara yüzünün ana sayfasında, kurumun verilerini girebileceği ya da verilerini hazırlanan şablon dosyaya girip, oradan yükleyebileceği "Veri Girişi" ve "Dosyadan Yükle" isimli seçenekler sunulmuştur. Ara yüze ait ekran görüntüleri sırası ile Şekil 8, 9 ve 10'da verilmiştir.

Şekil 7. İzleme Gösterge Alanları Örneklem Ortalama Dağılım Grafikleri (a) Ortalaması [0-1] (b) Ortalaması [1,1-100] (c) Ortalaması [100,1-17000] arasında olan izleme göstergeleri

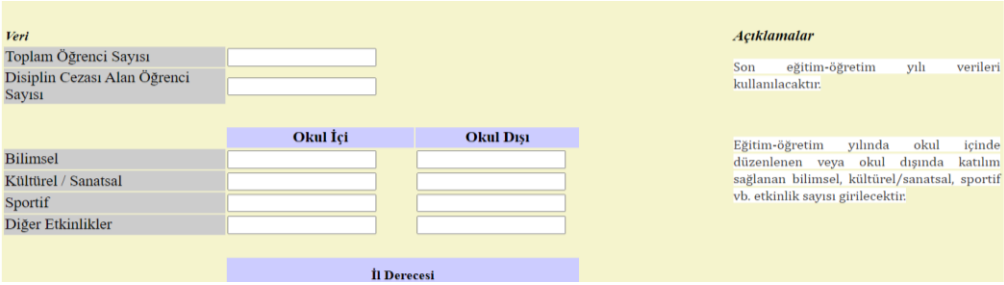




Şekil 8. Ana Sayfa Görünümü

Şekil 8'de karşılama ve bilgilendirme ekranının görüntüsü verilmiştir. Buradan eğitim kurumu "Veri Girişi" ve "Dosyadan Yükle" seçenekleri ile kurumlarına ait, gösterge değerlerinin girişi yapabilirler.

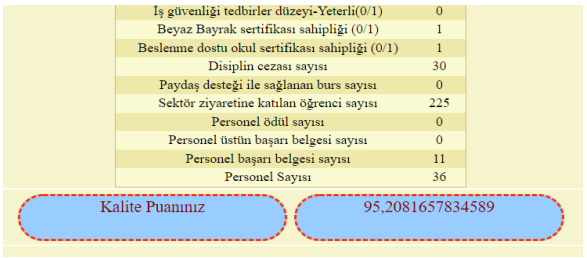
Girişlerin yapıldığı ekranın bir kısmının görüntüsü Şekil 9'da verilmiştir. Modelde kullanılan 62 adet İzleme gösterge alanları ve açıklamaları bu sayfada yer almakta ve kullanıcıdan değerlerinin girmesini beklemektedir. Her hesaplama için tekrar tekrar elle girilmesi, zor olduğu için, kullanıcıya şablon dosyadan veri girişi yapabilme imkânı da sunulmuştur. Şekil 10'daki sayfa görüntüsünden görüldüğü üzere, kullanıcı elektronik tablo şeklideki şablon dosyayı indirebilmekte ve izleme gösterge verilerinin kaydını yapabilmektedir. Devamında şekilden de görülen "Dosya Yükle- Kalite Puanını Hesapla" butonu tıklanarak regresyon modeline veriler aktarılır verilir ve tahmini kalite indeks puanı hesaplanır.



Şekil 9. "Veri Girişi" Sayfa Görünümü

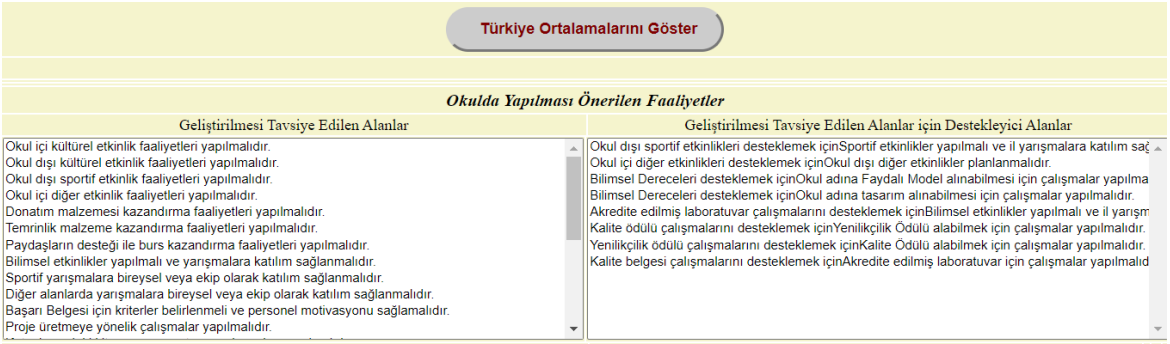


Şekil 10. "Dosyadan Şablon Yükleme" Sayfa Görünümü



Şekil 11. "Tahmini kalite indeks puanı hesaplama" sayfa görünümü

Kurum için tahmin edilen kalite puanının gösterildiği sayfa görüntüsünün bir kısmı Şekil 11'de verilmiştir. Kontrol amaçlı tüm girilen gösterge değerleri listelenmiş en alta da hesaplanan kalite indeks puanı gösterilmiştir. Faaliyet tavsiye sistemi için tasarlanan sayfa görüntüsü Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 13. Faaliyet tavsiye sistemi sayfa görünümü

Faaliyet tavsiye ekranında, kurum yetkilileri örneklem verisinden elde edilen Türkiye Ortalamalarının altında kalan faaliyet alanlarını "Geliştirilmesi Tavsiye Edilen Alanlar" başlığı altında görebilmektedirler. Geliştirilmesi tavsiye edilen alanlar ile korelasyona sahip olan alanlar da "Destekleyici Alanlar" başlığı altında listelenmektedir. Destekleyici alanlardan kasıt, neden sonuç ilişkisine sahip alanla değil, birlikte hareket etme eğiliminde olan alanlardır.

7. Sonuç

Ülkemizde nitelikli insan gücü yetiştirmek açısından mesleki ve teknik eğitime önem verilmekte ve kalitesinin izlenmesi ve artırılması için kalite güvence sistemi uygulanmaktadır. Kalite güvence sistemi özdeğerlendirme ve dış değerlendirme şeklinde uygulanmaktadır. Dış denetlemeyi gerçekleştirecek olan yetiştirilmiş denetçi eksiği veya pandemi gibi olumsuzluklara karşı kalite sürekliliğini temin etmek gerekir. Bu çalışmada, idareciler ve öğretmenler tarafından kalitenin istenildiği zaman ölçülmesine yardımcı olabilecek makine öğrenmesi tabanlı bir özdeğerlendirme ve faaliyet tavsiye sistemi önerisi yapılmıştır.

Çalışma, MTEGM' nün 06.11.2020 tarihli izni ile Türkiye genelinde zümrelere göre örnekleme yöntemi ile belirlenen gerçek veriler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Seçilen eğitim kurumlarına ait dış değerlendirme raporları, kendisi de dış değerlendirici olan ilk yazar tarafından, her bir eğitim kurumu için, kurum kalite indeks puanı da çıkış olarak eklenerek csv uzantılı bir dosya şeklinde hazırlanmıştır. Bu sayede çalışmada kullanılacak olan veri kümesinin oluşturulması sağlanmıştır. Gerçek dış değerlendirme verilerine dayalı olarak gerçekleştirilen çalışmada cevabı aranan araştırma sorularının cevapları, elde edilen bulgulara göre cevaplandırılmıştır.

- **MTEK'lerin dış değerlendirme sürecinde yaşanan denetçi eksikliği ve gecikmeler, makine öğrenmesi tabanlı bir özdeğerlendirme sistemi ile azaltılabilir mi?**

  Çalışma bulguları, makine öğrenmesi destekli özdeğerlendirme yaklaşımının, kurumsal düzeyde dış değerlendirme mekanizmalarına olan bağımlılığı azaltabileceğini göstermektedir. MTEK yöneticilerinin, kurumlarına ilişkin kalite indeks puanlarını tahmin edebilmesini ve bu sayede kalite güvence sürecine daha proaktif bir şekilde katılım sağlamalarını mümkün kılmaktadır.

Oluşturulan veri kümesi üzerinde Python programlama dili kullanarak ön işlem adımları gerçekleştirilmiştir. Bunun için eksik ve aykırı veriler tespit edilmiş ve giderilmiştir. Kategorik veriler kodlanmıştır. Veri seti içindeki çoklu doğrusal bağlantılar VIF faktörü kullanılarak tespit edilmiştir. Kurum kalite indeks puanları eşit aralıklı ayrıklaştırma yöntemi ile kategorik hale getirilmiş, kategorilere düşen veriler de dengesiz dağılım olduğu gözlemlenmiş ve çözümü için Tomek bağlantıları yöntemi kullanılarak veri kümesi dengelenmiştir.

- **Veri dengeleme teknikleri, özdeğerlendirme modelinin doğruluğunu etkiler mi?**

  Yapılan deneysel analizler, özellikle Tomek bağlantıları kullanılarak gerçekleştirilen veri dengeleme sürecinin, model performansı üzerinde belirgin ve istatistiksel olarak anlamlı bir iyileştirme sağladığını ortaya koymuştur. Dengeleme sonrası elde edilen modellerde daha düşük Ortalama Mutlak Hata (OMH) değerlerine ulaşılmış olup, bu durum veri setindeki dağılım adaletsizliklerinin, tahmin doğruluğu açısından olumsuz etkiler doğurabildiğini ve bu etkinin veri ön işleme ile bertaraf edilebileceğini göstermektedir.

- **Farklı regresyon algoritmaları karşılaştırıldığında, en düşük Ortalama Mutlak Hata (OMH) değerini veren model hangisidir?**

  Tüm bu işlemler sonucunda elde edilen dengelenmiş veri kümesine ve dengelenmeden önceki haline ayrı ayrı Lineer, Ridge, Lasso ve ElastikNet çoklu regresyon algoritmaları uygulanarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Her bir deneysel çalışma 100 kez tekrar edilmiştir. Dengelenmiş veri kümesi ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Dengeleme sonrası 100 çalıştırma içerisinden en düşük OMH değerleri Lineer regresyon yöntemi ile 5,00 olarak bulunmuştur. 100 çalıştırmanın ortalama OMH ve standart sapma değerleri incelendiğinde en küçük değerlerinin çoklu lineer regresyon tarafından sırasıyla 7,99 ve 1,04 olarak bulunduğu görülmektedir. Bu bağlamda, önerilen özdeğerlendirme sisteminde Çoklu Lineer Regresyon modelinin kullanımı, hem doğruluk hem de güvenilirlik açısından rasyonel bir tercih olarak öne çıkmıştır.

- **Spearman korelasyonu kullanılarak, izleme göstergeleri arasındaki anlamlı ilişkiler belirlenebilir mi?**

  Veri setinde normal dağılım varsayımının bulunmaması nedeniyle, faaliyet tavsiye sisteminde kullanılmak üzere izleme gösterge alanlarının ortalamaları ve alanlar arası korelasyon Spearman sıra korelasyon fonksiyonu kullanılarak hesaplanmış ve anlamlılıkları test edilmiştir. Uygulanan Spearman sıra korelasyonu analizi, izleme göstergeleri arasında güçlü ve istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu sebeple faaliyet tavsiye sistemine entegre edilen destekleyici önerilerin belirlenmesinde de kullanılmıştır.

- **MTEK'lerin özdeğerlendirme ve dış değerlendirme süreçlerine katkı sağlamak için web tabanlı bir faaliyet tavsiye sistemi gerçekleştirilebilir mi?**

  Eğitim kurumlarının, geliştirilen özdeğerlendirme ve tavsiye sistemini kullanarak tahmini kalite indeks puanlarını öğrenebilmeleri ve faaliyet tavsiyeleri alabilmesi bir web ara yüzü oluşturulmuştur. ASP.NET tabanlı olarak geliştirilen web uygulaması, eğitim kurumlarının hem

gösterge verilerini hızlı biçimde sisteme giriş olarak verilebilmesine, hem de tahmini kalite indeks puanlarını anlık olarak görüntüleyerek özelleştirilmiş faaliyet önerilerine erişebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, önerilen faaliyetlerle anlamlı korelasyona sahip alanların da "destekleyici tavsiyeler" başlığı altında sunulması, sistemin rehberlik kapasitesini artırmakta ve bütüncül bir gelişim yaklaşımını mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, MTEK'de kalitenin izlenmesi ve artırılmasına yardımcı olabilecek bu uygulama, kurumların etkinliği ve verimliliği artırmada kullanılabilir. Gelecek çalışmalar kapsamında, önerilen özdeğerlendirme ve faaliyet tavsiye sisteminin mevcut veri setinden daha büyük ve çeşitli veri kümeleriyle eğitilerek genelleme yeteneğinin artırılması planlanmaktadır. Öneri sisteminin doğruluğunu artırmak amacıyla daha gelişmiş makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinin entegrasyonu değerlendirilebilir. Bunun yanı sıra, sistemin kullanıcı deneyimini geliştirmek için dinamik bir web arayüzü veya mobil uygulama desteği sunulması bir geliştirme alanı olarak görülmektedir. Böylelikle kalite tetkikçilerinin dış değerlendirme süreçlerinde, bu uygulamadan yararlanması ve kalite tetkikçileri arasında bulunan değerlendirme farklılıklarının minimum seviyeye yaklaşmasına yardımcı olması öngörülmektedir.

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.

Teşekkür ve Bilgilendirme

Yazarlar Millî Eğitim Bakanlığına bağlı Mesleki ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğü'ne, Dış Değerlendirme Raporlarını paylaştıkları için teşekkür eder. Bu çalışma, birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında tamamladığı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Kaynakça

Ahadi A., Singh A., Bower M., Garrett M. Text mining in education a bibliometrics-based systematic review. Education Sciences 2022; 12(3): 1-17.

Albayrak SA. Çoklu doğrusal bağlantı halinde en küçük kareler tekniğinin alternatifi yanlı tahmin teknikleri ve bir uygulama. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi 2005; 1(1): 105-126.

Ayazgök B., Yalçin N. The investigation of the metacognitive awarness and the academic achievement about simple machine in 7th grade students in primary education. Procedia - Social and Behavioral Sciences 2014; 141: 774-780.

Aydın ZE. Balina optimizasyonu algoritması ve rastgele alt uzaylar temelli eksik veri tamamlama yöntemleri. Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi; sayfa no:3-9, Eskişehir, Türkiye, 2021.

Bütün H., Aslanargun E. Mesleki ve teknik eğitim kurumlarında toplam kalite yönetimi uygulamalarının değerlendirilmesi. Anadolu Eğitim Liderliği ve Öğretim Dergisi 2016; 4(1): 40-57.

Doger Ş. Veri kalitesinde eksik veri sorunlarının derin öğrenme yöntemi ile çözülmesi: Üretici çekişmeli ağlar ile bir uygulama. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Yüksek Lisans Tezi; sayfa no:37-42, İzmir, Türkiye 2020.

EC - EQAVET. EQAVET - European quality assurance in vocational education and training - employment, social affairs & inclusion - European commission. Employment, Social Affairs & Inclusion. https://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=1536&langId=en

Er Ş., Keskintürk T. Zümrelere göre örneklemede zümre sınırlarının ve örnek büyüklüklerinin genetik algoritma kullanılarak belirlenmesi. YA/EM 2006 – Yöneylem Arastırması / Endüstri Mühendisliği – 26.Ulusal Kongresi, 1- 04 Temmuz 2006, sayfa no:386-389, Kocaeli, Türkiye.

González-Calatayud V., Prendes-Espinosa P., Roig-Vila R. Artificial intelligence for student assessment: A systematic review. Applied Sciences 2021; 11(12): 1-15.

Grech A., Camilleri AF. The digitization of tvet and skills systems. International Labour Organization; 2020. https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/108201

Houngue P., Hountondji M., Dagba T. An effective decision-making support for student academic path selection using machine learning. International Journal of Advanced Computer Science and Applications 2022; 13(11): 727-734.

İslamoğlu AH., Alnıaçık Ü. Sosyal bilimlerde araştırma yöntemleri (Spss uygulamalı). 5. Baskı Beta Basım Yayım 2016;196-201.

Ma X. English teaching in artificial intelligence-based higher vocational education using machine learning techniques for students' feedback analysis and course selection recommendation. Journal of Universal Computer Science 2022; 28(9): 898–915.

MTEGM. Mesleki ve teknik eğitim genel müdürlüğü dış değerlendirme portalı. MEB. 2000. http://ozdegerlendirme.meb.gov.tr/ disdegerlendirme

MTEGM. Mesleki ve teknik eğitim kurumları kalite güvencesi dış değerlendirme uygulama rehberi. MEB. 2016. https://ozdegerlendirme.meb.gov.tr/dosya/Dis_Degerlendirme_Uyg.Reh.2019-1.pdf

Nadzinski G., Gerazov B., Zlatinov S., Kartalov T., Dimitrovska MM., Gjoreski H., Gams M. Data science and machine learning teaching practices with focus on vocational education and training. Informatics in Education 2023; 22(4): 671-690.

Namoun A., Alshanqiti A. Predicting student performance using data mining and learning analytics techniques: A systematic literature review. Applied Science 2021; 11(1): 1-28.

Ovla HD., Taşdelen B. Aykırı değer yönetimi. Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2012; 5(3): 1-8.

Pereira RM., Costa YMG., Silla CN. MLTL: A multi-label approach for the Tomek Link undersampling algorithm. Neurocomputing 2020; 383: 95-105.

Rodzalan SA., Noor NNM., Abdullah NH., Saat MM. Tvet skills gap analysis in electrical and electronic industry: Perspectives from academicians and industry players. Journal of Technical Education and Training 2022; 14(1): 158-177.

Siegel AF. Chapter 12 - Multiple regression: predicting one variable from several others. Practical Business Statistics. 7nd ed. Academic Press 2016; 355–418.

Smyshlyayeva LG., Semenova NA., Kurovskaya VL., Smyshlyayev KA. Assessing and developing the professionalism of professors of university teacher education: Changes in concept and technology. Tomsk State University Journal 2022; 483: 209-220.

Tashakkori A., Teddlie C. Sage handbook of mixed methods in social and behavioral research. 2nd ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publications; 2010.

TC Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. Kalkınma ajansları kalkınma planlamasında istatistiki bölge birimleri sınıflandırması. 2023. https://ka.gov.tr/sayfalar/kalkinma-planlamasinda-istatistiki-bolge-birimleri-siniflandirmasi--24

UNESCO. Transforming technical and vocational education and training for successful and just transitions: UNESCO strategy 2022-2029. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 2022; (2022):1-26.

Wang Y., Li Y. Chinese vocational skills education quality assessment using attentive dual residual generative adversarial network optimized with gazelle optimization algorithm. International Journal of Robotics & Automation 2024; 39(10): 1-10.

Waweru SM. A predictive model for quality-assurance in normal learning through student feedback in Kiambu technical colleges. Master of Science Data Analytics KCA University, sayfa no:44-57, Nairobi, Kenya; 2021.

Windelband L. Artificial intelligence and assistance systems for technical vocational education and training opportunities and risks. In: Shajek A., Hartmann E.A. (ed) New Digital Work: Digital Sovereignty at the Workplace. Springer International Publishing 2023; 195-213.

Yazgın Ö. Vocational and technical education: a comprehensive review. The Istanbul Journal of Social Sciences and Humanities 2024; 2(1): 1-17.

Ye JH., He Z., Bai B., Wu YF. Sustainability of technical and vocational education and training (tvet) along with vocational psychology. Behavioral Sciences 2024; 14(859): 1-5.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1711-1726, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1711-1726, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Potansiyel İlave Cisimlere Sahip Çift Yıldız Sistemi UZ Lyr ve Z Dra'nın Dinamik Kararlılık Analizi

Hüseyin ER[1]*, Muhammet Emir KENGER[2], Aykut ÖZDÖNMEZ[3], Murat TEKKEŞİNOĞLU[4]

[1,3]Department of Astronomy and Space Science, Faculty of Science, Atatürk University, Erzurum, Türkiye
[2,4]Department of Astronomy and Astrophysics, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Atatürk University, Erzurum, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-1339-3045
[2]https://orcid.org/0000-0002-2847-8124
[3]https://orcid.org/0000-0003-1399-5804
[4]https://orcid.org/0009-0003-2863-5577
*Sorumlu yazar: huseyin.er@atauni.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 09.12.2024
Kabul tarihi:17.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Örten çift yıldız sistemi
Yörünge kararlılık
Yörünge dönem değişimi
UZ Lyr
Z Dra

ÖZ

Bu çalışmada, REBOUND paketi ile N-cisim simülasyonları kullanarak UZ Lyr ve Z Dra sistemlerinin yörünge kararlılığı araştırılmıştır. Özellikle, Mean Exponential Growth Factor of Nearby Orbits (MEGNO) ve Wisdom-Holman Symplectic Integrator (WHFast) kullanılarak, ilave gezegensel cisimlere ev sahipliği yapabilecek bu çift yıldız sistemlerinin dinamik kararlılığı analiz edilmiştir. UZ Lyr için elde edilen sonuçlar, sistemin yaklaşık 10^4 yıl sonra dinamik olarak kararsız hale geldiğini ve MEGNO kararlılık haritasının gösterdiği gibi kaotik bir davranışa girdiğini göstermektedir. Ancak daha kısa zaman ölçeklerinde sistem yarı-kararlı görünmektedir. Sonuçlar, kısa vadeli simülasyonlara dayanarak uzun vadeli yörünge kararlılığını tahmin etmenin doğasında var olan zorlukları ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Z Dra sistemi için, önceki çalışmalarda önerilen dört model incelenmiştir. Simülasyonlarımız, tek ışık zaman etkisi (LTT) içeren modellerin kararlı kaldığı, iki LTT'li modellerin ise hem WHFast hem de MEGNO analizlerinde kısa zaman ölçeklerinde belirgin bir kararsızlık sergilediğini göstermektedir. Sonuçlar, ilave cisimlerin gözlemlenen zamanlama değişimlerine daha iyi bir ampirik uyum sağlayabileceğini, ancak bu tür konfigürasyonların genellikle dinamik olarak kararsız olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, ikili sistemlerde ek cisimlerin potansiyel varlığını değerlendirirken uzun vadeli dinamik analizin önemini vurgulamaktadır.

Dynamical Stability Analysis of UZ Lyr And Z Dra Binary Systems with Potential Additional Bodies

Research Article

Article History:
Received: 09.12.2024
Accepted: 17.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Eclipsing binary
Orbital stability
Orbital period variation
UZ Lyr
Z Dra

ABSTRACT

In this study, the orbital stability of the UZ Lyr and Z Dra systems was investigated using the REBOUND package with N-body simulations. In particular, the dynamical stability of these binary star systems, each potentially hosting additional planetary bodies by using the Mean Exponential Growth Factor of Nearby Orbits (MEGNO) and the Wisdom–Holman Symplectic Integrator (WHFast) was analyzed. The results for UZ Lyr show that the system becomes dynamically unstable after about 10^4 years, entering a chaotic regime as indicated by the MEGNO stability map. On shorter timescales, however, the system appears to be quasi-stable. The results reveal the inherent difficulties in forecasting long-term orbital stability based on short-term simulations. Similarly, four models proposed in previous studies were examined for the Z Dra system. Our simulations show that models containing a single light-time

effect (LTT) remain stable, whereas models with two LTT terms exhibit pronounced instability on short timescales in both WHFast and MEGNO analyses. The results suggest that while additional bodies may provide a better empirical fit to observed timing variations, such configurations are often dynamically unstable. This study highlights the importance of long-term dynamical analysis when evaluating the potential presence of additional objects in binary systems.

To Cite: Er H., Kenger ME., Özdönmez A., Tekkeşinoğlu M. Dynamical Stability Analysis of UZ Lyr And Z Dra Binary Systems with Potential Additional Bodies. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1711-1726.

1. Introduction

The exoplanet field has made remarkable progress (Mayor and Queloz, 1995; Beuermann et al., 2010; Doyle et al., 2011; Horner et al., 2012; Lohr et al., 2014; Nasiroglu et al., 2017; Sonbas et al., 2022; Er et al., 2024a) since the groundbreaking detection of the planet around the millisecond pulsar PSR B1257+12 nearly three decades ago (Wolszczan and Frail, 1992). Over 5000 exoplanets have been confirmed various methods, leading to significant advances in both ground- and space-based instruments. In addition, more than 7000 exoplanet candidates are currently awaiting confirmation, demonstrating the rapid and continuing progress in our understanding of planetary systems other than our own. Among exoplanet detection methods, the most notable method for detecting the existence of additional bodies in orbits around binary stars is the timing method (Goździewski et al., 2012; Marsh et al., 2014; Goździewski et al., 2015; Deeg and Belmonte 2018; Özdönmez et al., 2023). A circumbinary planet orbiting a binary system can induce sinusoidal variations in the O–C diagram, the differences between observed (O) and calculated (C) eclipse timings, due to the light travel time (LTT) effect (Irwin, 1952; Beuermann et al., 2012; Er et al., 2021).

There are several categories of eclipsing binary (EB) systems, primarily classified according to their Roche lobe configurations into three main groups: detached, semi-detached, and contact binaries (Kopal 1959). In classical Algol-type systems, the components are generally in close and exhibit a semi-detached, where one star fills its Roche lobe while the other does not. Typically, the primary star is a more massive main-sequence star of spectral type B–A that remains within its Roche lobe, whereas the less massive secondary is often an F–K type subgiant that fills its Roche lobe (Wang and Zhu 2019; Ma et al., 2022). The O–C diagrams of Algol-type binaries reveal variations caused by different mechanisms, demonstrating the diverse applications of LTT effect analyses in these systems (Zasche et al., 2008; Yuan and Qian 2019; Shi et al., 2021; Bakış et al., 2022; Yıldırım et al., 2023). The LTT effect can reveal the presence of substellar mass orbital companions such as planets and brown dwarfs in such systems (Lee et al., 2009; Qian et al., 2012; Wolf et al., 2021). However, definitive claims about CBPs require independent evidence, as other mechanisms such as the Applegate mechanism, apsidal motion, mass transfer, and angular momentum loss due to magnetic braking can also cause variations in orbital periods (Applegate, 1992; Claret and Giménez, 2010; Parsons et al., 2010; Schreiber et al., 2010; Zorotovic and Schreiber, 2013; Almeida et al., 2019; Burdge et al., 2019; Almeida et al., 2020).

UZ Lyr was considered an Algol-type eclipsing binary system (Nijland, 1931). However, it is labelled as "forgotten" by Koch et al., (1979) because a detailed light curve analysis of the system was not available. The system has been included in the catalogues of variable stars (Malkov et al., 2006; Pigulski et al., 2009) and has since been studied as photometric and spectroscopic by various researchers (Prša et al., 2011; Slawson et al., 2011; Armstrong et al., 2014; Frasca et al., 2016; Matson et al., 2017; Roobiat and Pazhouhesh, 2022). The orbital period variation of UZ Lyr was first proposed by Rafert (1982). Hoffman et al., (2006) and later Gies et al., (2015) analyzed the O-C diagram and suggested that the observed period variations could be due to a third body or stellar spots. Borkovits et al., (2016) suggested that the third body could have a period of ~15.16 yr and a minimum mass of $0.17M_{\odot}$. Recently, Roobiat and Pazhouhesh (2022) constructed the most recent O-C diagram of the system to study its orbital period variation. The O-C diagram of the system was modelled using several approaches, including linear, parabolic, and cubic functions, in addition to one or two LTTs. It was concluded that the best fit was obtained with a linear function combined with two LTTs.

The eclipsing binary Z Dra (V=10.8^{m}, P=1.357456^{d}) was first discovered by Ceraski (1903) using photographic observations of Blajko (1903) and identified as an Algol-type variable. The system was studied photometrically and spectroscopically by many researchers, and physical parameters such as mass and radius were determined (Dugan, 1912; Dugan, 1915; Struve, 1947; Ishchenko, 1947; Hill et al., 1975; Terrell, 2006). The orbital period variation of the system was first discovered by Dugan, 1915 and was later confirmed by many studies (Kopal, 1936; Ishchenko, 1947; Kreiner, 1971; Frieboes-Conde and Herczeg, 1973; Herczeg and Frieboes-Conde, 1974; Rafert, 1982). Khaliullina (2016) investigated the orbital period variation of the system by adding a sinusoidal term to the quadratic model and detected a cyclic variation with a period of 60.2 years, which was attributed to the presence of a third body with mass of $M_3 > 0.70M_{\odot}$. Finally, Yuan et al., (2016) published new minimum times for Z Dra between April 2014 and February 2015 using different telescopes. To investigate the cyclic behavior in the system, Yuan et al., (2016) modelled the updated O-C diagram with different models by adding additional object(s) to the quadratic and cubic terms. To explain the observed timing variations, Yuan et al., (2016) investigated three different models and analysed the Z Dra O-C diagram. According to their results, the model that best fit the data included two additional companions with orbital periods of ~59.4 and 29.8 years. In other words, the combination of these two periodicities best fitted the cyclic variations in the O-C residuals among the three solutions they examined. This implies that the most plausible explanation for the observed light travel time effects in the system is the presence of two companions with these particular periods.

Although it is possible to derive a statistical model that describes the O-C diagram, the orbits of the systems must be stable for at least several thousand years (Mai and Mutel, 2022). Essentially, for an orbital solution to be physically plausible, it must both statistically replicate the O-C variations and maintain dynamic stability over thousands of years. Understanding the nature of these systems requires studying their stability and dynamics. In recent years, significant progress has been made in detecting

additional bodies in binary systems through the analysis of orbital period variations (Brown-Sevilla et al., 2021; Gajdoš and Vaňko, 2023; Er et al., 2024). However, many studies have primarily relied on statistical models to fit these variations, often without performing long-term dynamical stability assessments. The results of our simulations reveal that while additional bodies may statistically account for the observed timing variations, their corresponding orbital configurations may be dynamically unstable. Thus, our study provides a critical methodological improvement and deeper insight into the complex dynamical behavior of binary systems, underscoring the necessity of coupling statistical modelling with long-term dynamical analyses (Horner et al., 2012; Mai and Mutel, 2022).

This study aims to investigate the orbital stability for Z Dra and UZ Lyr, respectively, for which dynamical stability simulations have not been performed in the literature, using new system parameters derived from the LTT models reported by Yuan et al., (2016) and Roobiat and Pazhouhesh (2022).

2. Materials and Methods

We used the N-body orbital integration package of REBOUND (Rein and Liu, 2012) to examine the orbital stability of the proposed planetary system. This package consists of a Mean Exponential Growth Factor of Nearby Orbits (MEGNO, Cincotta and Simó, 2000) indicator and a Wisdom–Holman symplectic integrator (WHFast, Rein and Tamayo, 2015). MEGNO is an important tool for studying the dynamics of planetary systems and other celestial bodies. By generating MEGNO stability maps, it is possible to examine how two initially close orbits behave over time based on a set of parameters such as semi-major axis and eccentricity (Cincotta and Simó, 2000; Rein and Tamayo, 2015; Livesey et al., 2024).

The following formula defines the MEGNO time-averaged value:

$$\langle Y(t)\rangle = \frac{1}{t-t_0}\int_{t_0}^{t} Y(t')dt'$$

Here, t_0 and t denote the start and end times of the integration, respectively. Y is a time-weighting factor derived from the variational equations applied to the orbit, which is used to determine whether the system behaves chaotically or regularly (for further details, see Morbidelli 2002; Hinse et al., 2010; Livesey et al., 2024). If the MEGNO indicator $\langle Y\rangle$ is ≤ 2, the system is stable, while values above 2 indicate chaos, with a value of 10 being assigned when a particle is ejected or collides (Cincotta and Simó, 2000; Goździewski et al., 2001; Brown-Sevilla et al., 2021; Gajdoš and Vaňko, 2023; Özdönmez et al., 2023; Livesey et al., 2024). WHFast is an advanced version of the symplectic Wisdom-Holman integrator (Wisdom and Holman, 1991), optimized for systems with a dominant central body and minor perturbations to Keplerian orbits. This integrator supports the kernel method as well as first- and second-order symplectic correctors. WHFast efficiently integrates orbits over a specified duration, demonstrating the evolution of orbital parameters such as the semi-major axis and eccentricity as

functions of time. This is crucial for analyzing planetary interactions, predicting when a planet may escape the system or collide, and assessing the long-term stability of orbits (Wisdom and Holman, 1991).

3. Results

We used the N-body orbital integration package of REBOUND (Rein and Liu, 2012) to investigate the orbital stability of the UZ Lyr and Z Dra systems, where possible additional objects may exist. Dynamical stability simulations were performed using the best-fit planetary masses and orbital elements determined by Roobiat and Pazhouhesh (2022) for UZ Lyr and Yuan et al., (2016) for Z DRA in Tables 1 and 2. In Tables 1 and 2, the parameters are defined as follows: P_i represents the orbital period of the *i*th body, while $e_3$denotes its orbital eccentricity and ω_3 indicates the longitude of pericentre (periastron). The parameter $K_3$is defined as the semi-amplitude of the LTT signal observed in the O–C diagram, which arises due to the gravitational perturbation by the *i*th body. Moreover, $a_{12}sin_i$represents the projected semi-major axis of the binary system around the barycentre, and $M_{3,min}$is the minimum mass of the *i*th body as derived from the LTT model. The central binary star is regarded as a single mass in both simulations of the two systems, and all orbits were restricted to co-planar. The choice of parameters for our N-body simulations was guided by the two previous observational studies. The orbital parameters used in our analysis were obtained from LTT models fitted to the O-C diagrams, with the semi-major axis (*a*) and eccentricity (*e*) being the most critical parameters; these values were taken directly from published LTT solutions. The integration timestep was set to 0.01% of the shortest orbital period (in years) to preserve the symplectic nature of the Wisdom-Holman integrator and to minimise the accumulation of numerical errors (Wisdom and Holman, 1991; Rein and Tamayo, 2015). We systematically evaluated alternative initial conditions and configurations. Specifically, the semi-major axis and eccentricity were varied over 50 equally spaced intervals within a defined range (Ngrid), and the effects of these variations on the dynamical behavior of the system were analysed using MEGNO stability maps. This comprehensive exploration of the parameter space allowed us to account for potential uncertainties and to determine the sensitivity of the long-term stability results to the chosen initial conditions and observational constraints. Under these conditions, dynamic stability simulations were first performed with a time interval of 10^7 yr to obtain both the MEGNO value and the orbital stability timeline. In the event of structural instability in the system's orbit over shorter time periods, the application of MEGNO was performed for analysis at these shorter timescales.

Figure 1 shows that the system consisting of the parameters of the best-fit model (linear function with two LTTs) proposed by Roobiat and Pazhouhesh (2022) for UZ Lyr, exhibits chaotic orbital behavior, with its configurations becoming destabilized and significantly perturbed after about 10^4 years. In Figure 2, the system is in the unstable region ($\langle Y \rangle \geq 2$) in the MEGNO stability map analyzed in the 10^6 year time interval, while it is in the stable region ($\langle Y \rangle \leq 2$) in the 10^4 year MEGNO stability map in Figure 3.

Table 1. Orbital parameters of UZ Lyr obtained from two LTT models by Roobiat and Pazhouhesh (2022).

Parameters	
$P_3(yr)$	23.140(20)
e_3	0.06(2)
$\omega_3(°)$	63(2)
$K_3(day)$	0.00523(39)
$a_{12}sin_i(au)$	13.645(17)
$M_{3,min}(M_\odot)$	0.31494(13)
$P_4(yr)$	360(85)
e_4	0.60(11)
$\omega_4(°)$	56(6)
$K_4(day)$	0.05011(69)
$a_{123}sin_i(au)$	88.344(21)
$M_{4,min}(M_\odot)$	0.55187(29)
Rebound Parameters	
Time-Step (yr)	0.02
Ngrid	50

Table 2. Orbital parameters of Z Dra obtained from the two LTT models with the quadratic term (solution 3 in them) and the two LTT models with the cubic term (solution 4 in them) by Yuan et al., (2016)

Parameters	Solution 3	Solution 4
$P_3(yr)$	29.81 ± 0.08	29.05 ± 0.08
e_3	0.43 ± 0.01	0.11 ± 0.03
$\omega_3(°)$	285.6 ± 3.9	83.1 ± 26
$M_{3,min}(M_\odot)$	0.39 ± 0.03	0.33 ± 0.04
$A_3(au, i_3 = 90^\circ)$	12.74 ± 0.3	12.3 ± 0.2
$P_4(yr)$	59.41 ± 0.12	58.07 ± 0.12
e_4	0.62 ± 0.02	0.56 ± 0.01
$\omega_4(°)$	76.8 ± 4	240.5 ± 1.6
$M_{4,min}(M_\odot)$	0.77 ± 0.02	0.77 ± 0.03
$A_4(au, i_4 = 90^\circ)$	22.3 ± 0.3	21.9 ± 0.2
Rebound Parameters		
Time-Step (yr)	0.03	0.03
Ngrid	50	50

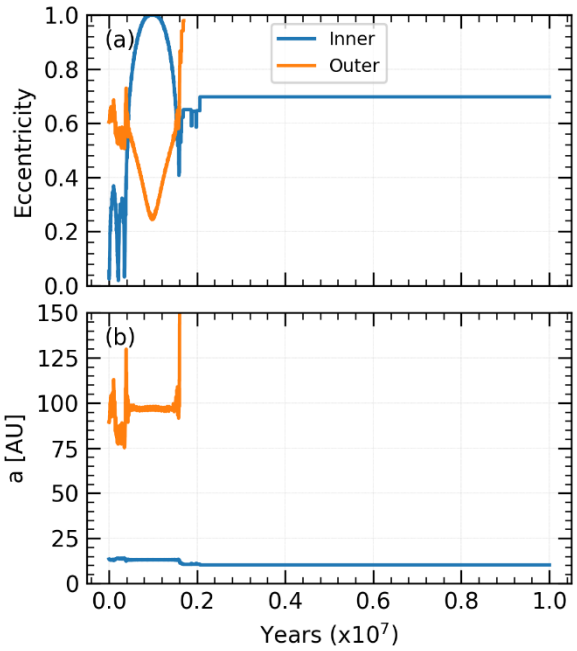


Figure 1. Orbital stability analysis of the UZ Lyr system based on the two-companion LTT model proposed by Roobiat & Pazhouhesh (2022). This simulation, performed with the WHFast integrator over 10^7 years, illustrates the long-term dynamical evolution of the system. (a) shows the time evolution of the eccentricities for the inner (blue) and outer (orange) companions over 10 Myr, while (b) presents the corresponding variations in their semi-major axes. Note that the outer companion is eventually ejected from the system, whereas the inner companion maintains a stable orbit. These results suggest that the UZ Lyr system is unlikely to sustain a dynamically stable configuration with two additional bodies.

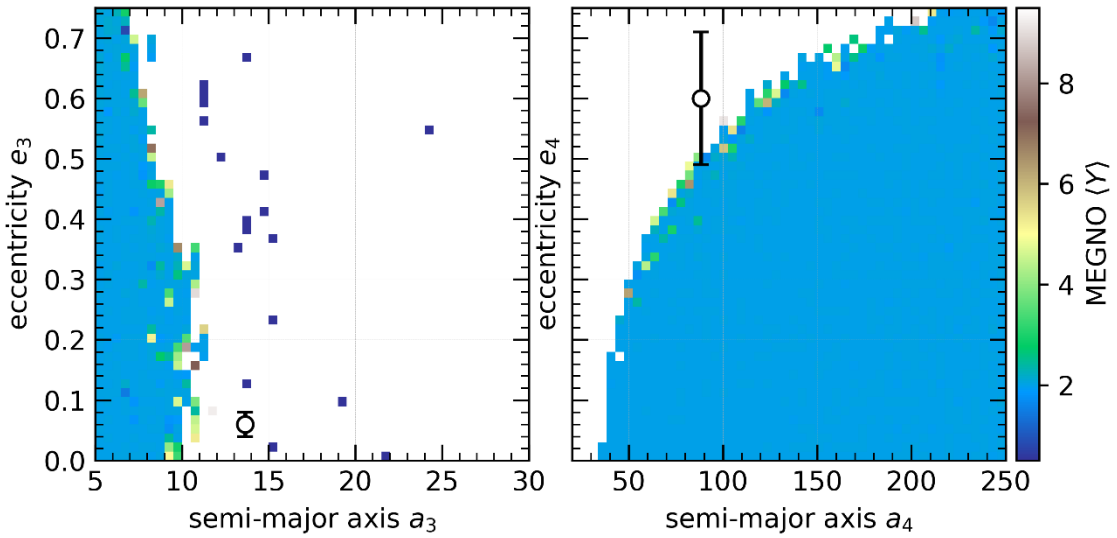


Figure 2. MEGNO chaos parameter surface map for a range of eccentricity and semi-major axis values for the inner companion (left panel) and the outer companion (right panel) of the two-companion LTT solution by Roobiat & Pazhouhesh (2022) for a duration of 1 Myr. The white circles denote the best-fit model parameters along with their uncertainties (refer to Table 1). In this context, the white circles indicate that, for this solution, both companions are located in highly chaotic regions of the parameter space.

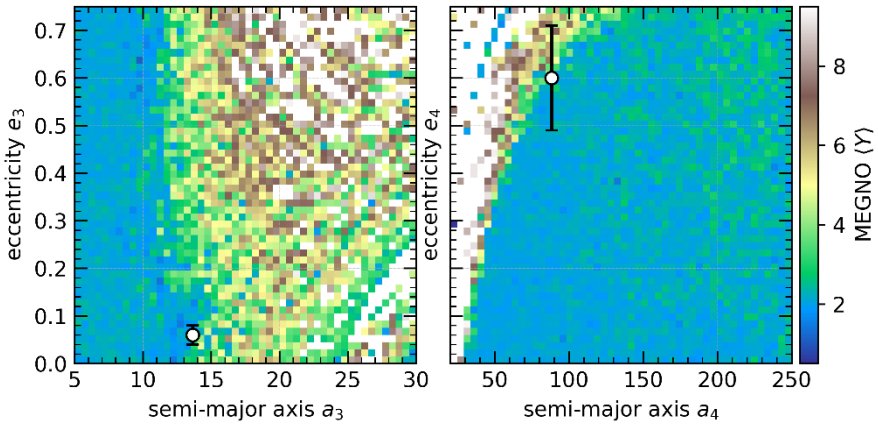


Figure 3. MEGNO chaos parameter surface map for a duration of 10^4 year for the inner companion (left panel) and the outer companion (right panel) corresponding to the two-companion LTT solution by Roobiat & Pazhouhesh (2022). Here, the white circles again mark the best-fit parameters (and their uncertainties) as listed in Table 1. In contrast to Figure 2, the white circles in this figure fall within regions that are comparatively stable, suggesting a more regular orbital behavior for the alternative solution.

Since Yuan et al., (2016) modelled the updated O-C diagram of Z Dra with 4 different functions by adding additional object(s) to the quadratic and cubic terms, we also performed dynamic stability simulations on 4 different models. Solutions 1 and 2 by Yuan et al., (2016) involve single LTT models, and we conclude that they are stable, as expected for a system with a single LTT. However, dynamic stability simulation graphs are not presented in this study because Yuan et al., (2016) stated that these two solutions are not very compatible with the O-C diagram and that the best solution is solution 3 (quadratic term + two LTT). When other models are examined, it becomes clear that the system exhibits instability on short timescales for both solution 3 and solution 4, as shown in Figure 4. Moreover, an analysis of the MEGNO stability map, as illustrated in Figure 5, indicates that the system parameters of both solutions are situated within unstable regions.

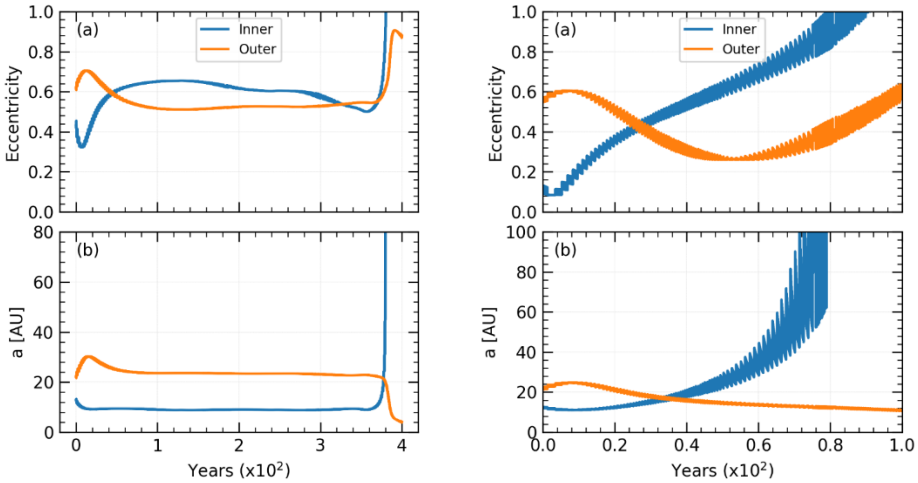


Figure 4. Orbital stability timeline for the Z Dra system using two LTT models (Solutions 3 and 4) from Yuan et al. (2016). The left panel shows the stability timeline for Solution 3, while the right panel presents that for Solution 4. In both cases, short-timescale interactions lead to rapid mutual perturbations, resulting in either collisions or ejections from the system. This outcome demonstrates that the Z Dra configuration, as modelled by these solutions, is dynamically unstable.

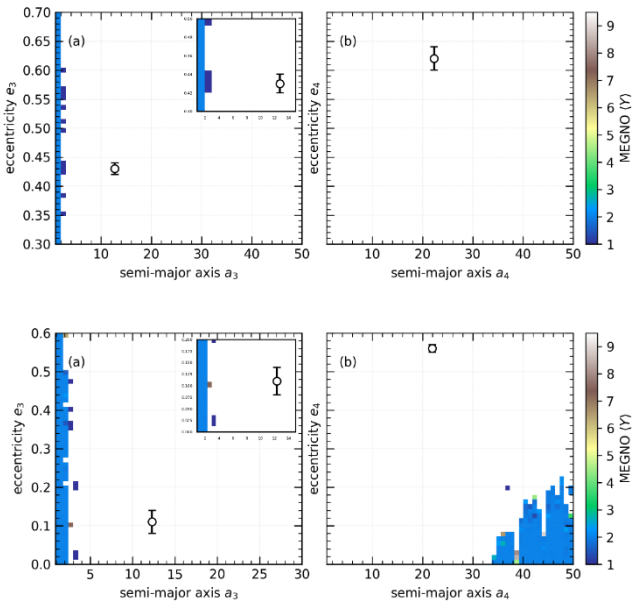


Figure 5. Orbital stability analysis of the Z Dra system using the two LTT models provided by Yuan et al. (2016). The upper panel illustrates the stability timeline for Solution 3, and the lower panel shows the results for Solution 4. In both models, the short-term dynamics reveal that the inner and outer companions are quickly ejected from the system. The accompanying MEGNO stability maps, constructed according to the two-companion solution, further underscore instability of the system. On short timescales, both inner and outer bodies escape the system in both solutions.

4. Discussion and Conclusions

The dynamic stability of UZ Lyr and Z Dra was analyzed using N-body simulations of REBOUND (Rein and Liu, 2012), focusing on the possible presence of additional objects in these systems. The simulation timescales were chosen using a stepwise approach with increasing time intervals to thoroughly capture the long-term dynamic behavior of the system. We first examined the stability of the system over a relatively short timescale (about 10^3 years). If the system remained stable over this interval, we extended the integration period to longer durations (10^4, 10^5, 10^6 years) and continued this process until the system either exhibited chaotic behavior. If instability occurred before the maximum planned duration was reached, the simulation was terminated early. When the dynamic stability simulation results for the UZ Lyr system based on the model parameters proposed by Roobiat and Pazhouhesh (2022) are examined, the eccentricity of the inner planet approaches 1.0. This suggests that the inner planet is moving towards orbital instability, which could disrupt the overall balance of the system. The eccentricity of the outer planet initially remained constant at about 0.6 but decreased over time to the level of 0.2. The semi-major axis of the inner planet shows only minor variations and remains relatively stable at a low level. On the other hand, the semi-major axis of the outer planet exhibited oscillatory behavior in the early stages of the simulation and later detached from the system. The dynamic stability simulation results for the UZ Lyrae system indicate significant instability. The orbit of the system becomes chaotic after about 10^4 years. This behavior is consistent with expectations for systems experiencing nonlinear perturbations from multiple bodies. Further analysis using the MEGNO strengthens this instability. The MEGNO value exceeds 2 in a 10^6 year stability map, indicating that the

system is entering a chaotic regime. Interestingly, in a shorter 10^4 year simulation, the MEGNO remains below 2, indicating that the system initially appears stable. This suggests that while UZ Lyr is dynamically stable on short timescales, its long-term evolution is dominated by chaotic interactions that lead to instability. This chaotic transition is likely driven by several intertwined mechanisms. First, the cumulative effect of gravitational perturbations from the additional companion gradually alters the orbital elements of UZ Lyr, such as the eccentricity, the semi-major axes and the argument of pericentre. These small perturbations, while negligible in the short term, can lead to significant changes over time due to the system's sensitivity to initial conditions. Second, overlapping mean-motion resonances and secular resonances are expected to play a significant role in destabilizing the system. The sensitivity of chaotic systems to initial conditions means that even minor variations within the observational uncertainties can lead to markedly different evolutionary outcomes. Furthermore, unstable orbits are not always implied by a chaotic system. However, chaotic time evolution is always implied by unstable orbits. The integration length is the crucial factor to take into account. There is a chance that the quasi-period will be incorrectly concluded if the dynamical system's chaotic onset moment necessitates a significantly longer time span than the integration time. Thus, it is important to integrate the system long enough for it to potentially display chaotic behavior (Horner et al., 2012, 2013; Hinse et al., 2014). Our results show that short-term stability can be misleading, because a configuration that appears stable over a limited number of orbits may be dynamically unstable on astrophysically important timescales. Long-term integrations are therefore important to reliably assess the feasibility of multibody configurations in binary systems. More precise orbital parameters are needed to improve our orbital stability models. This finding highlights the challenges of definitively characterizing systems with multiple potential additional objects. Short-term stability does not guarantee long-term stability, and systems can transition from quasi-stable to unstable on different timescales, depending on the specific configurations of additional bodies. These results are also seen in other systems (Goździewski et al., 2001; Horner et al., 2013; Borkovits et al., 2016; Brown-Sevilla et al., 2021; Er et al., 2021; Mai and Mutel, 2022; Özdönmez et al., 2023).

The Z Dra system presents a more complex scenario due to the variety of models proposed by Yuan et al., (2016), who tested four different solutions for the O-C diagram. Of these, solutions 1 and 2 represent single LTT models. As expected for single LTT systems, both solutions remain dynamically stable in our simulations. This is consistent with the general expectation that simple perturbations from a single additional body are less likely to induce chaotic behavior in such systems. It is important to note, however, that Yuan et al., (2016) concluded that these solutions do not fit the O-C diagram satisfactorily, suggesting that they are less likely to represent the true configuration of Z Dra. In contrast, solutions 3 and 4, which involve two LTTs, exhibit pronounced instability on short timescales. The presence of two additional bodies significantly perturbs the system, pushing it into a chaotic regime. This instability is confirmed by the MEGNO simulation, where both solutions exhibit values indicative of unstable orbits. According to our numerical simulations, the system disintegrates rapidly, with the hypothetical

companions either colliding with the central binary or being ejected in a matter of thousands of years. These findings suggest that either the proposed companions do not exist, or they must occupy a markedly different orbital configuration than previously proposed. The results suggest that while adding more bodies may provide a better empirical fit to the O-C diagram, it also leads to dynamic instability. Therefore, while models with two LTTs may provide better agreement with observations, they are unlikely to be physically realistic on long timescales due to the rapid onset of chaotic behavior. Future studies, particularly for UZ Lyr, should include additional observational data to revise the system parameters and orbital stability.

Conflict of Interest

The authors stated that there are no conflicts of interest regarding the publication of this article.

Researchers' Contribution Rate Statement

The contribution rates of the authors in the study are equal.

References

Almeida LA., Almeida L., Damineli A., Rodrigues CV., Castro M., Ferreira LCE., Jablonski F., do Nascimento JD., Pereira MG. Orbital period variation of KIC 10544976: Applegate mechanism versus light travel time effect. The Astronomical Journal 2019; 157(4): 150.

Almeida LA., Pereira ES., Borges GM., Damineli A., Michtchenko TA., Viswanathan GM. Eclipse timing variation of GK Vir: evidence of a possible Jupiter-like planet in a circumbinary orbit. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2020; 497(3): 4022-4029.

Applegate JH. A mechanism for orbital period modulation in close binaries. The Astrophysical Journal 1992; 385: 621.

Armstrong DJ., Gómez MCY., Faedi F., Pollacco D. A catalogue of temperatures for Kepler eclipsing binary stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2014; 437(4): 3473-3481.

Bakış V., Eker Z., Bakış H., Kayacı S., Yücel G., Tunç E., Taşpınar Ö., Yalçın Y., Melnik A., Esendağlı Ç.. Orbital period changes in IO Cep, IM Cep and TX Ari: Path to masses of distant components. New Astronomy 2022; 93: 101754.

Beuermann K., Breitenstein P., Debski B., Diese J., Dubovsky PA., Dreizler S., Hessman FV., Hornoch K., Husser TO., Pojmanski G., Wolf M., Woźniak PR., Zasche P., Denk B., Langer M., Wagner C., Wahrenberg D., Bollmann T., Habermann FN., Haustovich N., Lauser M., Liebing F., Niederstadt F. The quest for companions to post-common envelope binaries. II. NSVS14256825 and HS0705+6700. Astronomy and Astrophysics 2012; 540: A8.

Beuermann K., Hessman FV., Dreizler S., Marsh TR., Parsons SG., Winget DE., Miller GF., Schreiber MR., Kley W., Dhillon VS., Littlefair SP., Copperwheat CM., Hermes JJ. Two planets orbiting

the recently formed post-common envelope binary NN Serpentis. Astronomy and Astrophysics 2010; 521: L60.

Blajko S. Sur la période de 4.1903 Draconis (BD. +73°.533). Astronomische Nachrichten 1903; 162: 383.

Borkovits T., Hajdu T., Sztakovics J., Rappaport S., Levine A., Bíró IB., Klagyivik P. A comprehensive study of the Kepler triples via eclipse timing. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2016; 455(4): 4136-4165.

Brown-Sevilla SB., Nascimbeni V., Borsato L., Tartaglia L., Nardiello D., Granata V., Libralato M., Damasso M., Piotto G., Pollacco D., West RG., Colombo LS., Cunial A., Piazza G., Scaggiante F. A new photometric and dynamical study of the eclipsing binary star HW Virginis. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2021; 506(2): 2122-2135.

Burdge KB., Coughlin MW., Fuller J., Kupfer T., Bellm EC., Bildsten L., Graham MJ., Kaplan DL., Roestel J., Dekany RG., Duev DA., Feeney M., Giomi M., Helou G., Kaye S., Laher RR., Mahabal AA., Masci FJ., Riddle R., Shupe DL., Soumagnac MT., Smith RM., Szkody P., Walters R., Kulkarni SR., Prince TA. General relativistic orbital decay in a seven-minute-orbital-period eclipsing binary system. Nature 2019; 571(7766): 528-531.

Ceraski W. Découverte d'une variable du type Algol 4.1903 Draconis. Astronomische Nachrichten 1903; 161: 159.

Cincotta PM., Simó C. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials - I. Astronomy and Astrophysics Supplement Series 2000; 147: 205-228.

Claret A., Giménez A. The apsidal-motion test of stellar structure and evolution: an update. Astronomy and Astrophysics 2010; 519: A57.

Deeg HJ., Belmonte JA. Handbook of exoplanets. International Publishing AG 2018; 978-3-319-55334-4

Doyle LR., Carter JA., Fabrycky DC., Slawson RW., Howell SB., Winn JN., Orosz JA., Přsa A., Welsh WF., Quinn SN., Latham D., Torres G., Buchhave LA., Marcy GW., Fortney JJ., Shporer A., Ford EB., Lissauer JJ., Ragozzine D., Rucker M., Batalha N., Jenkins JM., Borucki WJ., Koch D., Middour CK., Hall JR., McCauliff S., Fanelli MN., Quintana EV., Holman MJ., Caldwell DA., Still M., Stefanik RP., Brown WR., Esquerdo GA., Tang S., Furesz G., Geary JC., Berlind P., Calkins ML., Short DR., Steffen JH., Sasselov D., Dunham EW., Cochran WD., Boss A., Haas MR., Buzasi D., Fischer D. Kepler-16: A transiting circumbinary planet. Science 2011; 333(6049): 1602.

Dugan RS. The algol-system Z draconis. Contributions from the Princeton University Observatory 1912; 2: 1-44.

Dugan RS. Inequalities in the period of the eclipsing variable Z Draconis. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 1915; 75: 702.

Er H., Karaman N., Özdönmez A., Nasiroglu I., Gürbulak BB. Investigation on transit observations of the WASP-10 and WASP-11 systems. New Astronomy 2024; 107: 102138.

Er H., Özdönmez A., Nasiroglu I. New observations of the eclipsing binary system NY Vir and its candidate circumbinary planets. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2021; 507(1): 809-817.

Er H., Özdönmez A., Nasiroglu I., Kenger ME. Orbital period variation analysis of the HS 0705+6700 post-common envelope binary. Publications of the Astronomical Society of Australia 2024; 41: e047.

Frasca A., Molenda-Żakowicz J., De Cat P., Catanzaro G., Fu JN., Ren AB., Luo AL., Shi JR., Wu Y., Zhang HT. Activity indicators and stellar parameters of the Kepler targets. An application of the ROTFIT pipeline to LAMOST-Kepler stellar spectra. Astronomy and Astrophysics 2016; 594: A39.

Frieboes-Conde H., Herczeg T. Period variations of fourteen eclipsing binaries with possible light-time effect. Astronomy and Astrophysics Supplement Series 1973; 12: 1.

Gajdoš P., Vaňko M. Chaos in multiplanetary extrasolar systems. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2023; 518(2): 2068-2075.

Gies DR., Matson RA., Guo Z., Lester KV., Orosz JA., Peters GJ. Kepler eclipsing binaries with stellar companions. The Astronomical Journal 2015; 150(6): 178.

Goździewski K., Bois E., Maciejewski AJ., Kiseleva-Eggleton L. Global dynamics of planetary systems with the MEGNO criterion. Astronomy and Astrophysics 2001; 378: 569-586.

Goździewski K., Nasiroglu I., Słowikowska A., Beuermann K., Kanbach G., Gauza B., Maciejewski AJ., Schwarz R., Schwope AD., Hinse TC., Haghighipour N., Burwitz V., Słonina M., Rau A. On the HU Aquarii planetary system hypothesis. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2012; 425(2): 930-949.

Goździewski K., Słowikowska A., Dimitrov D., Krzeszowski K., Żejmo M., Kanbach G., Burwitz V., Rau A., Irawati P., Richichi A., Gawroński M., Nowak G., Nasiroglu I., Kubicki D. The HU Aqr planetary system hypothesis revisited. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2015; 448(2): 1118-1136.

Herczeg T., Frieboes-Conde H. Period variations of the eclipsing binary RZ Cassiopeiae. Astronomy and Astrophysics 1974; 30: 259-263.

Hill G., Hilditch RW., Younger F., Fisher WA. MK classifications of some Northern Hemisphere binary systems. Memoirs of the Royal Astronomical Society 1975; 79: 131.

Hinse TC., Christou AA., Alvarellos JLA., Goździewski K. Application of the MEGNO technique to the dynamics of Jovian irregular satellites. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2010; 404: 837-857.

Hinse TC., Horner J., Wittenmyer RA. An orbital stability study of the proposed companions of SW lyncis. Journal of Astronomy and Space Sciences 2014; 31: 187-197.

Hoffman DI., Harrison TE., McNamara BJ., Vestrand WT., Holtzman JA., Barker T. The case for third bodies as the cause of period changes in selected algol systems. The Astronomical Journal 2006; 132(6): 2260-2267.

Horner J., Hinse TC., Wittenmyer RA., Marshall JP., Tinney CG. A dynamical analysis of the proposed circumbinary HW Virginis planetary system. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2012; 427(4): 2812-2823.

Horner J., Wittenmyer RA., Hinse TC., Marshall JP., Mustill AJ., Tinney CG. A detailed dynamical investigation of the proposed QS Virginis planetary system. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2013; 435(3): 2033-2039.

Irwin JB. The determination of a light-time orbit. The Astrophysical Journal 1952; 116: 211.

Ishchenko IM. Period i Fotometricheskaya Orbita Z Draconis. Period and Photometric Orbit of Z Draconis.. Bulletin of the Tashkent Observatory 1947; 2: 435-471.

Khaliullina AI. Variations in the orbital periods of the Algol-type eclipsing binaries RZ Cas and Z Dra. Astronomy Reports 2016; 60(5): 517-525.

Koch RH., Wood FB., Florkowski DR., Oliver JP. Photoelectrically-neglected eclipsing binaries. Information Bulletin on Variable Stars 1979; 1709: 1.

Kopal Z. Über die periodischen korrektionsglieder der elemente von bedeckungsveränderlichen und ihre physikalische Deutung. Astronomische Nachrichten 1936; 258(23): 393.

Kreiner JM. Investigation of changes in periods of eclipsing variables. Acta Astronomica 1971; 21: 365.

Lee JW., Kim SL., Kim CH., Koch RH., Lee CU., Kim HI., Park JH. The sdB+M eclipsing system HW virginis and its circumbinary planets. The Astronomical Journal 2009; 137(2): 3181-3190.

Livesey JR., Barnes R., Deitrick R. Orbital Stability and secular dynamics of the proxima centauri planetary system. The Astrophysical Journal 2024; 964(1): 4.

Lohr ME., Norton AJ., Anderson DR., Collier CA., Faedi F., Haswell CA., Hellier C., Hodgkin ST., Horne K., Kolb UC., Maxted PFL., Pollacco D., Skillen I., Smalley B., West RG., Wheatley P. J. Period and amplitude variations in post-common-envelope eclipsing binaries observed with SuperWASP. Astronomy and Astrophysics 2014; 566: A128.

Ma WW., Zhao EG., Sarotsakulchai T.. Photometric study of semi-detached eclipsing binary TW Cas based on TESS photometry. New Astronomy 2022; 93: 101741.

Mai X., Mutel RL. Orbital stability of proposed NY virginis exoplanets. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2022; 517(1): L108-L110.

Malkov OY., Oblak E., Snegireva EA., Torra J. A catalogue of eclipsing variables. Astronomy and Astrophysics 2006; 446: 785-789.

Marsh TR., Parsons SG., Bours MCP., Littlefair SP., Copperwheat CM., Dhillon VS., Breedt E., Caceres C., Schreiber MR. The planets around NN Serpentis: still there. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2014; 437(1): 475-488.

Matson RA., Gies DR., Guo Z., Williams SJ. Radial velocities of 41 Kepler eclipsing binaries. The Astronomical Journal 2017; 154(6): 216.

Mayor M., Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. Nature 1995; 378(6555): 355-359.

Morbidelli A. Modern celestial mechanics: aspects of solar system dynamics. Modern Celestial Mechanics: Aspects of Solar System Dynamics 2002; 0415279399

Nasiroglu I., Goździewski K., Słowikowska A., Krzeszowski K., Żejmo M., Zola S., Er H., Ogłoza W., Dróżdż M., Koziel-Wierzbowska D., Debski B., Karaman N. Is there a circumbinary planet around NSVS 14256825?. The Astronomical Journal 2017; 153(3): 137.

Nijland AA. Notizen über bedeckungsveränderliche. Astronomische Nachrichten 1931; 242(1): 9.

Özdönmez A., Er H., Nasiroglu I. Investigation on the orbital period variations of NN Ser: implications for the hypothetical planets, the Applegate mechanism, and the orbital stability. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2023; 526(3): 4725-4734.

Parsons SG., Marsh TR., Copperwheat CM., Dhillon VS., Littlefair SP., Hickman RDG., Maxted PFL., Gänsicke BT., Unda-Sanzana E., Colque JP., Barraza N., Sánchez N., Monard LAG. Orbital period variations in eclipsing post-common-envelope binaries. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2010; 407(4): 2362-2382.

Pigulski A., Pojmański G., Pilecki B., Szczygieł DM. The all sky automated Survey. The catalog of variable stars in the Kepler field of view. Acta Astronomica 2009; 59(1): 33-46.

Prša A., Batalha N., Slawson RW., Doyle LR., Welsh WF., Orosz JA., Seager S., Rucker M., Mjaseth K., Engle SG., Conroy K., Jenkins J., Caldwell D., Koch D., Borucki W. Kepler eclipsing binary stars. I. Catalog and Principal Characterization of 1879 Eclipsing Binaries in the First Data Release. The Astronomical Journal 2011; 141(3): 83.

Qian SB., Zhu LY., Dai ZB., Fernández-Lajús E., Xiang FY., He JJ. Circumbinary planets orbiting the rapidly pulsating subdwarf B-type binary NY Vir. The Astrophysical Journal 2012; 745(2): L23.

Rafert JB. Periodic ephemerides for 49 eclipsing binary-star systems. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 1982; 94: 485-495.

Rein H., Liu SF. REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. Astronomy and Astrophysics 2012; 537: A128.

Rein H., Tamayo D. WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom-Holman integrator for long-term gravitational simulations. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2015; 452(1): 376-388.

Roobiat KY., Pazhouhesh R. Light curve analysis and period study of two eclipsing binaries UZ Lyr and BR Cyg. Research in Astronomy and Astrophysics 2022; 22(2): 025013.

Schreiber MR., Gänsicke BT., Rebassa-Mansergas A., Nebot GA., Southworth J., Schwope AD., Müller M., Papadaki C., Pyrzas S., Rabitz A., Rodríguez-Gil P., Schmidtobreick L., Schwarz R., Tappert C., Toloza O., Vogel J., Zorotovic, M. Post common envelope binaries from SDSS. VIII. Evidence for disrupted magnetic braking. Astronomy and Astrophysics 2010; 513: L7.

Shi X., Qian S., Li L., Liao W. HL Dra: an active Algol-like binary system with a pulsating component star and a cool third body. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2021; 505: 6166-6178.

Slawson RW., Prša A., Welsh WF., Orosz JA., Rucker M., Batalha N., Doyle LR., Engle SG., Conroy K., Coughlin J., Gregg TA., Fetherolf T., Short DR., Windmiller G., Fabrycky DC., Howell SB., Jenkins JM., Uddin K., Mullally F., Seader SE., Thompson SE., Sanderfer DT., Borucki W., Koch D. Kepler eclipsing binary stars. II. 2165 eclipsing binaries in the second data release. The Astronomical Journal 2011; 142(5): 160.

Sonbas E., Karaman N., Özdönmez A., Er H., Dhuga KS., Göğüş E., Nasiroglu I., Zejmo M. Probing transit timing variations of three hot Jupiters: HATP-36b, HATP-56b, and WASP-52b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2022; 509(4): 5102-5116.

Struve O. Spectrographic observations of eight eclipsing binaries. The Astrophysical Journal 1947; 106: 92.

Terrell D. Photometry of the Algol-type binary Z Draconis. Information Bulletin on Variable Stars 2006; 5742: 1.

Wisdom J., Holman M. Symplectic maps for the N-body problem. The Astronomical Journal 1991; 102: 1528-1538.

Wolf M., Kučáková H., Zasche P., Hornoch K., Kára J., Merc J., Zejda M. Possible substellar companions in dwarf eclipsing binaries. SDSS J143547.87+373338.5, NSVS 7826147, and NSVS 14256825. Astronomy and Astrophysics 2021; 647: A65.

Wolszczan A., Frail DA. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. Nature 1992; 355(6356): 145-147.

Yıldırım MF., Soydugan F. Semi-detached Algol type binaries with increasing orbital periods: Case studies of BD Vir, BO Gem, DG Lac, RW Cet, and RX Hya. New Astronomy 2023; 101: 102016.

Yuan JZ., Şenavcı HV., Qian SB. Z Draconis with two companions in a 2:1 mean-motion resonance. Research in Astronomy and Astrophysics 2016; 16(5): 81.

Yuan JZ., Qian SB. A strange phenomenon in XZ Andromedae: two Keplerian periods with a 1:3 ratio. Research in Astronomy and Astrophysics 2019; 19: 128.

Zasche P., Liakos A., Wolf M., Niarchos P. Period changes in six semi-detached Algol-type binaries. New Astronomy 2008; 13: 405-413.

Zorotovic M., Schreiber MR. Origin of apparent period variations in eclipsing post-common-envelope binaries. Astronomy and Astrophysics 2013; 549: A95.

Wang ZH., Zhu LY. SX Piscium: A near-contact mass-transferring binary with a possible brown dwarf companion. Publications of the Astronomical Society of Japan 2019; 71: 101.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1727-1738, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1727-1738, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Muş Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut *(Cicer arietinum* L.*)* Genotiplerinin Fizyolojik ve Agronomik Özelliklerinin İncelenmesi

Mehmet KARAMAN[1*]

[1]Muş Alparslan Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Bitkisel Üretim ve Teknolojileri Bölümü, Muş

[1]https://orcid.org/0000-0002-6176-9580
*Sorumlu yazar: m.karaman@alparslan.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 22.02.2025
Kabul tarihi:17.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Nohut
Tane verimi
NDVI
Kanopy sıcaklığı

ÖZ

Bu çalışma, Muş ekolojik koşullarında bazı nohut (*Cicer arietinum* L.*)* genotiplerinin fizyolojik ve agronomik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 2022 yılının geç ilkbahar mevsiminde yürütülmüştür. Denemede on üç tescilli nohut çeşidi ile bir adet yerel nohut çeşidi kullanılmıştır. Deneme, tesadüf blokları deneme deseninde 3 tekerrürlü olarak düzenlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre; genotipler arasında metrekarede bitki sayısı, çiçeklenme süresi, normalize edilmiş vejetasyon indeksi, kanopy sıcaklığı ($p \leq 0,01$) ve tane verimi ($p \leq 0,05$) yönünden önemli farklılıklar bulunmuştur. Metrekarede bitki sayısı 13,33-24,00 adet/m^2, tane verimi 65,05-100,40 kg/da, çiçeklenme süresi 47,67-54,67 gün, normalize edilmiş vejetasyon indeksi 0,373-0,500, kanopy sıcaklığı 32,05-34,70 °C arasında değişmiştir. Korelasyon analizi sonuçlarına göre; bitki boyu (r=0,376*), metrekarede bitki sayısı (r=0,415**) ve normalize edilmiş vejetasyon indeksi (r=0,468**)'nin tane verimi ile pozitif ve önemli ilişkili olduğu belirlenmiştir. Araştırmada, çiçeklenme süresi ve kanopy sıcaklığı düşük genotiplerin tane verimi değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Gelecekte Muş ili ve benzer ekolojilerde nohut fizyolojisi üzerine daha fazla araştırma yapılmasının faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

Investigation of Physiological and Agronomic Characteristics of Some Chickpea *(Cicer arietinum* L.*)* Genotypes in Muş Ecological Conditions

Research Article

Article History:
Received: 22.02.2025
Accepted: 17.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Chickpea
Grain yield
NDVI
Canopy temperature

ABSTRACT

This study was carried out in the late of spring season of 2022 to determine the physiological and agronomic characteristics of some chickpea *(Cicer arietinum* L.*)* genotypes in Muş ecological conditions. Thirteen registered and one landrace chickpea varieties were used as material. The experiment was designed as a randomized block design with 3 replications. Among the examined traits, it was determined that there was significant variation among the genotypes at $p \leq 0.01$ for number of plants per square meter, flowering time, normalized difference vegetation index and canopy temperature, and at $p \leq 0.05$ in grain yield. The number of plants per square meter 13.33-24.00 plants.m^{-2}, grain yield 65.05-100.40 kg.da^{-1}, flowering time 47.67-54.67 days, normalized difference vegetation index 0.373-0.500 and canopy temperature between 32.05-34.70 ^{o}C were varied. Correlation analysis results showed that plant height (r=0.376*), number of plants per square meter (r=0.415**) and normalized difference vegetation index (r=0.468**) were positively and significantly correlated with grain yield. In the research, it was observed that genotypes with low flowering time and canopy temperature had high grain yield values. It was concluded that it would be beneficial to conduct further research on chickpea physiology in Muş province and similar ecologies in the future.

To Cite: Karaman, M. 2025. Muş Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut *(Cicer arietinum* L.*)* Genotiplerinin Fizyolojik ve Agronomik Özelliklerinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1727-1738.

1.Giriş

Nohut *(Cicer arietinum* L.*)*, 2n=16 kromozoma sahip tek yıllık yemeklik tane baklagil bitkisidir. Nohutun önemli orijin merkezlerinden biri Türkiye olmakla birlikte sıcağa ve kuraklığa mercimekten sonra en dayanıklı yemeklik tane baklagil bitkisi olması nedeniyle nadas alanlarının daraltılmasında öne çıkan bir baklagildir (Şehirali, 1988; Özaktan ve Erol, 2023). Nohut, ham veya işlenerek değerlendirilmekte olup çoğunlukla humus, leblebi, cips, atıştırmalık veya sulu yemeklerde kullanılarak tüketilmektedir (Atmaca, 2008; Özaktan ve Erol, 2023).



Şekil 1. Nohut çiçeklenme dönemi (Karaköy, 2008)



Şekil 2. Nohut bakla dönemi (Karaköy, 2008)

Nohut, tanesinde bulunan %18-31 oranındaki proteinin %76-77 civarındaki sindirilme derecesi gibi özelliklerinin yanı sıra çocukların beslenmesinde önemli aminoasitlerden birisi olan "histidine" içeriğinin nohut proteininde anne sütündeki proteinden daha fazla olması nohut tüketimine ayrı bir önem kazandırmıştır (Küçükalbay ve Akbolat, 2012; Kaya ve ark., 2023). Nohut bitkisi Rhizobium bakterisi ile karşılıklı faydaya dayanan ilişki (simbiyotik yaşam) sonucunda havanın serbest azotunu fikse etmesi (Rodriguez ve ark., 2020), kazık kök sistemi sayesinde toprağın yapısını iyileştirmesi (Gogoi ve ark., 2018) gibi nedenlerle ekolojik faktörlere bağlı değişmekle beraber ekim nöbetinde dikkate alınması gereken önemli yemeklik tane baklagillerden birisidir (Reckling ve ark., 2016; Mupangwa ve ark., 2021; Oğuz ve Erman, 2021). Nohut yetiştiriciliğinde birim alandan elde edilen tane verimi ekim zamanından yüksek oranda etkilenmektedir. Sahil bölgelerine yakın yerler hariç karasal iklimin baskın olduğu iç bölgelerde nohut ekimi genellikle yazlık yapılmaktadır (Açıkgöz, 1987; Demirci ve Bildirici, 2020).

Doğu Anadolu Bölgesi gibi kışı sert geçen ve karın uzun süre yerde kaldığı lokasyonlarda da ekim işlemi ancak geç ilkbaharda (Muş, Erzurum, Van vs.) yapılabilmektedir. Bu bağlamda geç ekimlerde toprak neminin azaldığını ve kısa vejetasyon süresinin %26-68 oranında düşük tane verimi ile sonuçlandığını bildiren çok sayıda araştırma mevcuttur (Açıkgöz, 1987; Üstün, 1994; Demirci ve Bildirici, 2020;

Karaman ve ark., 2024). Başka bir çalışmada ekim zamanının önemine vurgu yapılarak ekim zamanını geciktirmekle bitki boyunda, ilk bakla yüksekliğinde ve bakla sayısında düşüş olduğu bildirilmiştir (Ceran, 2015; Ercan ve ark., 2019).

Bu çalışmada amaç, Muş ekolojik koşullarında nohutta yağışa dayalı koşullarda tarımsal ve fizyolojik özelliklerde meydana gelen değişimleri, tane verimi ile fizyolojik ve agronomik özellikler arasındaki ilişkiyi belirlemektir.

2. Materyal ve Metot

Araştırma, Muş Alparslan Üniversitesi kampüs yerleşkesinde 2022 yılı nohut yetiştirme sezonunda yazlık ekim (geç ilkbahar) koşullarında yürütülmüştür. Araştırma materyalini ise 1 yerel ve 13 tescilli nohut çeşidi oluşturmuştur. Denemede kullanılan genotiplerin orijini ve özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Genotiplerin orijini ve tane özelliklerine ilişkin bilgiler*

S.N.	Genotip Adı	Islahçı Kuruluş Adı veya Orijini	Genotip Özellikleri
1	Botan	GAP Uluslararası Tarımsal Araşt. ve Eğit. Merk. Müd.	Tane rengi bej, tane tipi koçbaşı
2	Akçin-91	Tarla Bitkileri Merkez Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi krem, tane tipi koçbaşı
3	Aksu	Doğu Akdeniz Geçit Kuşağı Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi bej, tane tipi koçbaşı
4	Azkan	Geçit Kuşağı Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi bej, tane tipi koçbaşı
5	Aslanbey	Doğu Akdeniz Geçit Kuşağı Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi açık krem, tane tipi koçbaşı
6	Muş yerel	Muş İli	Tane rengi bej, tane tipi koçbaşı
7	Çağatay	Karadeniz Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi açık bej, tane tipi koçbaşı
8	Borabey	Karadeniz Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi bej, tane tipi koçbaşı
9	Gökçe	Tarla Bitkileri Merkez Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi krem, tane tipi koçbaşı
10	Hasanbey	Doğu Akdeniz Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi sarı, tane tipi köşeli-yuvarlak
11	Sezenbey	Karadeniz Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi krem, tane tipi koçbaşı
12	Seçkin	Doğu Akdeniz Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi açık sarı, tane tipi köşeli
13	Ubet	GAP Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi koyu bej, tane tipi koçbaşı
14	Zuhal	Karadeniz Tarımsal Araşt. Enst. Müd.	Tane rengi bej, tane tipi koçbaşı

*Araşt. ve Eğit. Merk. Müd.: Araştırma ve Eğitim Merkezi Müdürlüğü, Araşt. Enst. Müd.: Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü

Çalışma, yağışa dayalı koşullarda tesadüf blokları deneme desenine göre 3 tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Parseller 5 m uzunluğunda, 4'er sıra ve sıra arası 25 cm olarak düzenlenmiştir. Tohumluk miktarı 50 adet/m^2 olup, tohum ekimi 22.04.2022 tarihinde elle yapılmıştır. Deneme alanında 0-30 cm derinlikten alınan toprak örnekleri üzerinde yapılan analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

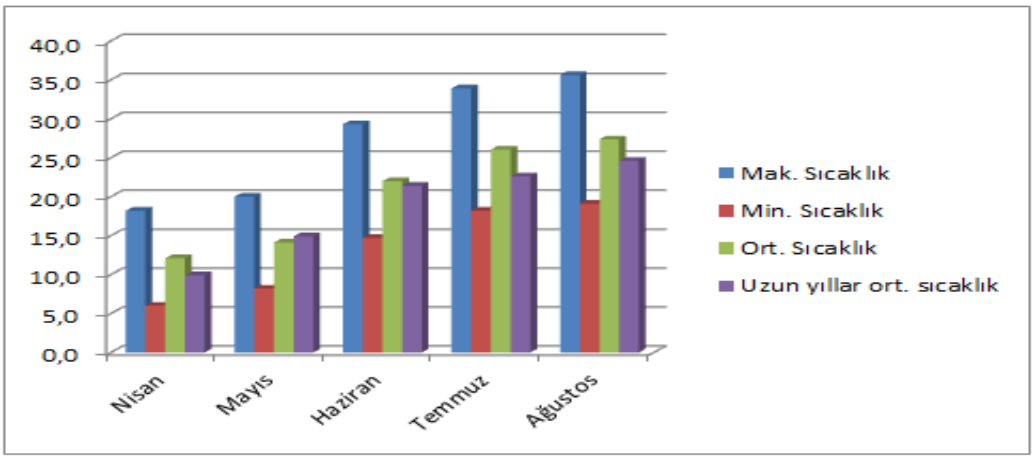
Tablo 2. Deneme alanı topraklarının özellikleri

Toprak Bünyesi	Elektriksel İletkenlik (dS/m)	pH	Kireç 'CaCO3' (%)	Fosfor 'P_2O_5' (kg/da)	Organik Madde (%)
killi-tın	0,45	7,2	2,8	2,0	2,21

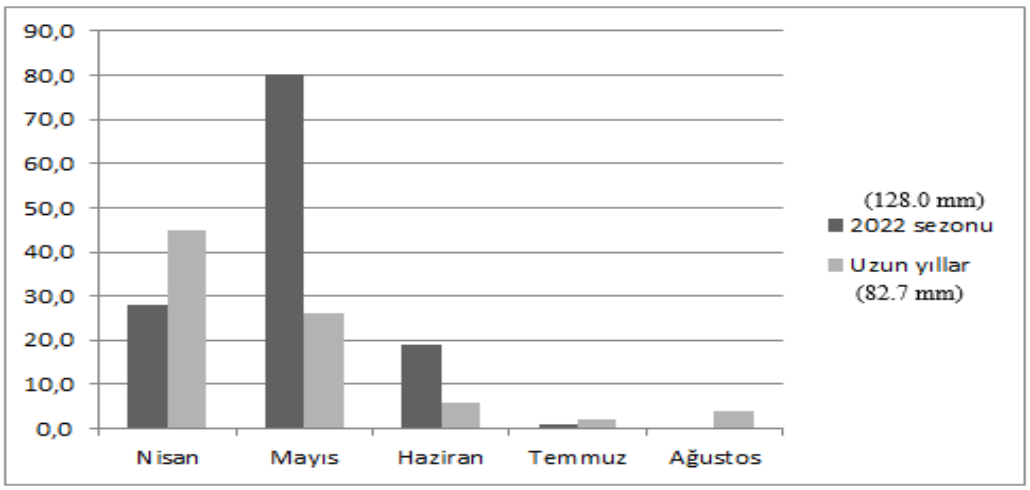
Deneme alanı topraklarının nötre yakın, fosfor içeriği yetersiz ve organik madde içeriğinin orta olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). Bu bağlamda, topraktaki besin elementi eksikliğini tamamlamak amacıyla

ekimle beraber 2 kg/da N ve 5,2 kg/da P_2O_5 toprağa uygulanmıştır. Hasat öncesinde her parselin 1.ve 4. sırası ile başından ve sonundan 0,5 m'lik kısmı kenar tesiri olarak atıldıktan sonra kalan alan üzerinden hasat işlemi 11.08.2022 tarihinde el ile bitkilerin üzerindeki baklalar toplanarak gerçekleştirilmiştir. Harmanlama işlemi ise farklı çaptaki elekler yardımıyla 15 Ağustus-15 Eylül 2022 tarihleri arasında tamamlanmıştır.

Muş ilinin 2022 yılı nohut üretim sezonu içerisinde ortalama sıcaklık değerleri uzun yılların ortalama sıcaklık değerleri ile karşılaştırıldığında Mayıs ayı hariç diğer aylarda sezondaki ortalama sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Muş ilinin 2022 sezonuna ve uzun yıllara ilişkin sıcaklık (°C) durumu



Şekil 4. Muş ilinin 2022 sezonuna ve uzun yıllara ilişkin yağış durumu (mm)

Araştırmanın yapıldığı sezon ile uzun yıllara ilişkin ortalama yağış miktarı incelendiğinde sezonda gerçekleşen yağış miktarının 45,3 mm daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 4). Ancak, sezonda meydana gelen yağışların aylar bazında düzensiz olduğu ve yağışın yaklaşık 2/3'ünün Mayıs ayında meydana geldiği tespit edilmiştir.

2.1. *İncelenen Özelliklere İlişkin Prosedürler*

İlk bakla yüksekliği (cm): Her parselde rastgele seçilen 10 bitkide toprak seviyesinden ilk baklaya kadar olan mesafe ölçüldükten sonra ortalaması alınarak cm cinsinden belirlenmiştir.

Bitkide ana dal sayısı (adet) ve bakla sayısı (adet): Parsel bazında rastgele seçilen 10 bitkide ana dal sayısı ve bakla sayısı belirlendikten sonra ortalaması alınarak adet cinsinden kaydedilmiştir.

Bitki boyu (cm): Her parselde tesadüfi olarak seçilen 10 bitkinin toprak yüzeyinden gövde ucuna kadar uzunluğu belirlenmiş ve ortalaması alınarak cm cinsinden tespit edilmiştir.

Metrekarede bitki sayısı (adet): Her parselin rastgele seçilen 1'er metrekarelik iki farklı noktasında bulunan bitki sayısı belirlendikten sonra ortalaması alınarak saptanmıştır.

Tane verimi (kg/da): Parsel bazında hasat ve harmandan sonra elde edilen ürün ±0.001 düzeyinde hassas terazide tartılmış ve kg/da cinsinden kaydedilmiştir.

Çiçeklenme süresi (gün): Denemenin ekiminden parselin %50'si çiçekleninceye kadar geçen zaman gün olarak kaydedilip tespit edilmiştir (Singh ve ark., 1991).

Normalize edilmiş vejetasyon indeksi: %50 bakla bağlama döneminde, havanın açık, güneşli, rüzgârsız ve bitki yüzeyinin kuru olduğu bir günde saat 11.00-15.00 arasında GreenSeeker cihazı ile ölçüm yapılarak belirlenmiştir.

Kanopy sıcaklığı (^{o}C): %50 bakla bağlama döneminde, 12.00-14.00 saatleri arasında kızılötesi termometre (91KB JPG) kullanılarak santigrat (^{o}C) cinsinden ölçüm yapılmıştır (Reynolds ve ark., 2001).

Araştırılan özelliklere ilişkin verilerin istatistiki analizleri ve özellikler arası ilişkileri gösteren korelasyon analizi JMP 13.0.1 pro paket programı vasıtasıyla yapılmıştır. Gruplar arası farklılıkları ve önem düzeylerini ($p \leq 0,05$) belirlemek için LSD testi dikkate alınmıştır (Gomez ve Gomez, 1984).

3. Bulgular ve Tartışma

Araştırmada incelenen özelliklerden genotipler arasında metrekarede bitki sayısı, çiçeklenme süresi, normalize edilmiş vejetasyon indeksi, kanopy sıcaklığında ($p \leq 0,01$) ve tane verimi ($p \leq 0,05$) yönünden farklılıklar önemli, bitki boyu, ilk bakla yüksekliği, bitkide ana dal sayısı ve bitkide bakla sayısı önemsiz bulunmuştur (Tablo 3 ve Tablo 4).

İlk bakla yüksekliği deneme ortalamasının 13,33 cm olduğu ve 12,00 ile 14,80 cm arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Gökçe çeşidi en yüksek, Muş yerel nohut çeşidi ise en düşük ilk bakla yüksekliği değerini vermiştir. İlk bakla yüksekliğine ilişkin farklı çevrelerde yapılan çalışmalarda Türk ve Koç (2003) bu özelliğin 10,07-14,45 cm, Ceran ve Önder (2016) 15,33-27,67 cm, Sarımurat ve ark. (2022) 15,33-20,70 cm, Kurtarıcı ve Yücel (2023) 11,8-18,8 cm olduğunu saptamışlardır. Çalışmamızın sonuçları Türk ve Koç (2003), Kurtarıcı ve Yücel (2023) ile benzer olup, genotiplerin ilk bakla yüksekliğinin makineli hasada uygun olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Araştırılan morfolojik ve verim unsuru özelliklere ilişkin veriler ve önemlilik durumu

Genotip	İBY (cm)	BADS (adet)	BBS (adet)	BB (cm)	MBS (adet)	
Botan	12,60	3,47	23,80	32,60	14,67	de
Akçin	12,30	3,47	24,40	34,07	19,00	a-d
Aksu	13,47	3,13	24,53	33,40	24,00	a
Azkan	13,90	3,60	29,20	34,47	22,00	ab
Aslanbey	12,33	3,00	25,93	31,33	16,00	cde
Muş yerel	12,00	3,33	35,27	29,73	24,00	a
Çağatay	13,80	3,20	26,93	32,73	17,33	b-e
Borabey	12,87	2,87	29,60	31,80	13,33	e
Gökçe	14,80	3,00	26,00	34,33	20,00	abc
Hasanbey	13,00	3,20	28,80	30,73	18,00	b-e
Sezenbey	13,93	3,07	27,67	31,93	19,33	a-d
Seçkin	14,27	3,33	30,10	34,40	21,33	ab
Ubet	13,87	2,20	22,53	33,73	21,33	ab
Zuhal	13,53	2,93	24,40	28,87	17,33	b-e
Maksimum değer:	14,80	3,60	35,27	34,47	24,00	
Minimum değer:	12,00	2,20	22,53	28,87	13,33	
Genel ortalama:	13,33	3,13	27,08	32,44	19,12	
LSD (0,05):	ö,d.	ö,d.	ö,d.	ö,d.	5,32**	
CV(%):	8,84	14,25	15,93	6,97	16,59	

İBY: ilk bakla yüksekliği, BADS: bitkide ana dal sayısı, BBS: bitkide bakla sayısı, BB: bitki boyu, MBS: metrekarede bitki sayısı, ö.d.:önemli değil

Ana dal sayısı genotipler arasında 2,20 ile 3,60 adet/bitki arasında farklılık göstermiştir. Denemede ana dal ortalaması 3,13 adet/bitki olarak saptanmıştır. Azkan çeşidi en fazla ana dal sayısına sahip olurken, Ubet nohut çeşidi en az ana dal sayısını vermiştir. Ana dal sayısı ile ilgili olarak farklı araştırıcılar tarafından yapılan çalışmalarda Babagil (2010) 3,1-3,3 adet/bitki, Uzun ve ark. (2012) 2,92-3,95 adet/bitki, Demirci ve Bildirici (2020) 2,0-3,3 adet/bitki, Güneş ve ark. (2022) 2,03-2,65 adet/bitki, Doğan ve ark. (2023) 3,0-4,3 adet/bitki olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırma sonuçlarımız benzer olmakla birlikte bazı araştırıcılar, ana dal sayısının kalıtım ile ilişkili olmasının yanı sıra ekim sıklığı ve çevre koşullarının etkisi altında şekillendiğini vurgulamıştır (Toğay ve ark., 2005; Doğan ve ark., 2023). Bitkide bakla sayısı 22,53 ile 35,27 adet/bitki arasında farklılık göstermiştir. Denemede ortalama bakla sayısının 27,08 adet/bitki olduğu tespit edilmiştir. Muş yerel nohut çeşidinde en fazla bakla sayısı elde edilirken, Ubet nohut çeşidinde en az sayıda bakla olduğu saptanmıştır (Tablo 3). Bitkide bakla sayısı ile ilgili farklı çevrelerde yapılan çalışmalarda Babagil (2010) 21,6-25,5 adet/bitki, Bayrak ve Önder (2017) 20,12-30,42 adet/bitki, Sarımurat ve ark. (2022) 12,26-19,56 adet/bitki, Güneş ve ark. (2022) 25,53-49,52 adet/bitki, Doğan ve ark. (2023) 21,3-38,9 adet/bitki olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmamızda elde edilen sonuçlar, Güneş ve ark. (2022)'nın bulgularından daha düşük, Sarımurat ve ark. (2022)'nın bulgularından daha yüksek ve diğer araştırmacıların sonuçları ile paralellik göstermiştir. Bitki boyu 28,87 ile 34,47 cm arasında değişmekle beraber çeşitler arasındaki farklılık önemsiz bulunmuştur. Bitki boyuna ilişkin deneme ortalamasının 32,44 cm olduğu saptanmıştır. Azkan çeşidinin

en uzun boylu olduğu gözlemlenirken Zuhal nohut çeşidinin en kısa bitki boyuna sahip olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3). Bitki boyuna ilişkin farklı çevrelerde yapılan çalışmalarda Demirci ve Bildirici (2020) bu özelliğin 39,0 ile 48,3 cm, Sarımurat ve ark. (2022) 31,70 cm ile 39,50 cm, Kurtarıcı ve Yücel (2023) 24,7-43,0 cm olduğunu bildirmişlerdir. Bitki boyu; ekim zamanı, iklim, çeşit ve toprak yapısına bağlı olarak değişmekle beraber sonuçlarımız Demirci ve Bildirici (2020)'nin bulgularında daha düşük, diğer araştırıcıların bulguları ile benzerdi.

Tablo 4. Tane verimi ve diğer tarımsal özelliklere ilişkin veriler ve oluşan gruplar

Genotip	TV (kg/da)		ÇS (gün)		NDVI		CS (ºC)	
Botan	88,54	abc	54,33	a	0,430	bc	33,83	abc
Akçin	81,05	b-e	49,67	efg	0,470	ab	34,30	ab
Aksu	98,97	ab	51,33	def	0,500	a	33,80	abc
Azkan	100,40	a	52,00	bcd	0,467	abc	33,55	bc
Aslanbey	84,70	abc	50,33	def	0,423	c	32,05	d
Muş yerel	92,91	abc	47,67	g	0,447	bc	33,25	c
Çağatay	78,81	cde	50,00	def	0,437	bc	34,70	a
Borabey	65,05	e	53,67	abc	0,373	d	33,58	bc
Gökçe	89,48	abc	54,00	ab	0,437	bc	33,48	bc
Hasanbey	87,86	abc	51,00	def	0,450	bc	33,53	bc
Sezenbey	95,72	abc	51,67	cde	0,463	abc	33,45	bc
Seçkin	80,40	b-e	54,67	a	0,430	bc	34,68	a
Ubet	84,84	abc	49,33	fg	0,433	bc	33,75	a-c
Zuhal	71,09	de	51,33	def	0,427	bc	33,70	a-c
Maksimum değer:	100,40		54,67		0,500		34,70	
Minimum değer:	65,05		47,67		0,373		32,05	
Genel ortalama:	85,7		51,50		0,442		33,69	
LSD (0,05):	19,16*		2,24**		0,043**		1,01**	
CV(%):	13,32		2,59		5,85		1,79	

TV: tane verimi, ÇS: çiçeklenme süresi, NDVI: %50 bakla dönemi normalize edilmiş vejetasyon indeksi, CS: %50 bakla dönemi kanopy sıcaklığı

Metrekarede bitki sayısının 13,33 ile 24,00 adet/m^2 arasında değişim gösterdiği, deneme ortalamasının 19,12 adet/m^2 olduğu tespit edilmiştir. Aksu ve Muş yerel nohut çeşitlerinde metrekarede en yüksek, Borabey nohut çeşidinde ise metrekarede en düşük bitki olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 3). Metrekarede bitki sayısına ilişkin farklı çevrelerde yapılan çalışmalarda Biçer ve Anlarsal (2005) 28,71-29,40 adet/m^2, Ölmez (2014) 37,5-67,6 adet/m^2, Kaya ve ark. (2023) 10,7-12,0 adet/m^2 arasında değişim gösterdiğini bildirmişlerdir. Sonuçlarımız, araştırıcıların sonuçlarıyla benzer olmamakla birlikte söz konusu farklılığın ekim normu, çeşit, ekoloji ve toprak yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği düşünülmektedir.

Tane verimi 65,05 ile 100,40 kg/da arasında değişim göstermiştir. Deneme ortalamasının 85,7 kg/da olduğu, Azkan çeşidinin en yüksek, Borabey çeşidinin ise en düşük tane verimini verdiği belirlenmiştir (Tablo 4). Tane verimine ilişkin farklı araştırıcılar tarafından yapılan çalışmalarda Çiftçi ve ark. (2004) 42,0-80,7 kg/da, Babagil (2010) 91,9-132,8 kg/da, Bayrak ve Önder (2017) 78,1-154,1 kg/da, Kurtarıcı ve Yücel (2023) 52,4-214,5 kg/da, Çirka ve ark. (2024) 69,95-88,42 kg/da olduğunu bildirmişlerdir.

Çalışmamızda diğer araştırıcıların bulguları ile kısmen benzer tane verimi değerleri elde edilmiştir. Çiçeklenme süresi 47,67 ile 54,67 gün arasında farklılık göstermiştir. Ortalama çiçeklenme süresinin 51,50 gün olduğu saptanmıştır. Muş yerel nohut çeşidi en erken çiçeklenen çeşit olurken, Seçkin çeşidi en geç çiçeklenen nohut çeşidi olmuştur (Tablo 4). Çiçeklenme süresi çeşide, çevre koşullarına, ekimin yazlık veya kışlık yapılmasına bağlı olarak değişmekle beraber Erdemci (2012) 57,6-104.0 gün, Demirci ve Bildirici (2020) 47,3-53,6 gün, Kurtarıcı ve Yücel (2023) 54,7-73,3 gün olduğunu vurgulamışlardır. Sonuçlarımız, Demirci ve Bildirici (2020) ile benzerdi.

Tablo 5. Özellikler arası ilişkileri ve önemlilik düzeyini gösteren korelasyon tablosu (p<0.05 veya p<0.01)

Özellikler	İBY	BADS	BBS	BB	MBS	TV	ÇS	NDVI
İBY								
BADS	-0,055							
BBS	-0,034	0,409**						
BB	0,323*	0,059	-0,206					
MBS	-0,094	0,234	0,261	0,228				
TV	0,076	0,175	0,075	0,376*	0,415**			
ÇS	0,188	0,084	-0,087	0,188	-0,300	-0,074		
NDVI	0,093	0,248	-0,113	0,241	0,373*	0,468**	-0,265	
CS	0,081	0,106	-0,060	0,184	0,172	-0,257	0,134	-0,062

*: 0,05 **: 0,01 düzeyinde önemli

Normalize edilmiş vejetasyon indeksi (NDVI) 0,373 ile 0,500 arasında değişmiştir. Deneme ortalamasının ise 0,442 olduğu belirlenmiştir. En yüksek NDVI değeri Aksu çeşidinde, en düşük NDVI değeri ise Borabey çeşidinde saptanmıştır (Tablo 4). NDVI değeri arttıkça genotipe ait biyomasın arttığı ve birim alan toprak yüzeyini daha iyi kapladığı gözlemlenmiştir (Yıldız ve ark., 2012; Gündoğdu, 2018).

Zhang ve ark. (2021) nohutta erken büyüme, çiçeklenme ve bakla bağlama dönemi NDVI ile tane verimi arasında pozitif ve önemli ilişki olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmamızda, bakla dönemi NDVI'nın tane verimi ile pozitif ve önemli ilişkili olduğu doğrulanmıştır (Tablo 5).

Kanopy sıcaklığı 32,05 ile 34,70 ^{o}C arasında farklılık göstermiştir. Denemenin ortalama kanopy sıcaklığının 33,69 ^{o}C olduğu belirlenmiştir. Aslanbey nohut çeşidinin bitki örtüsünü en serin tuttuğu belirlenirken, Çağatay nohut çeşidinin ise bitki örtüsünü en az serin tutan çeşit olduğu saptanmıştır. Kanopy sıcaklığı, genotiplerin kuraklığa karşı tolerans durumunu tahmin etmede seleksiyonda dikkate alınması gereken önemli özelliklerden olmakla birlikte genotiplerin su kullanım durumunu, çevresel streslere ve sıcaklığa karşı tepkisini belirlemede kullanıldığı bildirilmiştir (Balota et al. 2007; Purushothaman ve Krishnamurthy, 2014).

Korelasyon analizi sonuçlarına göre; tane verimi ile bitki boyu (r=0,376*), metrekarede bitki sayısı (r=0,415**) ve normalize edilmiş vejetasyon indeksi (r=0,468**) arasında pozitif ve önemli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5).

4. Sonuçlar

Araştırmada, agronomik özelliklerden metrekarede bitki sayısında ve fizyolojik özelliklerin tamamında genotipler arasında önemli düzeyde varyasyon olduğu gözlemlenmiştir. İlk bakla yüksekliğinin tüm genotiplerde ≥12 cm olması geç ilkbahar koşullarında ekim yapılsa bile söz konusu genotiplerin makineli tarıma uygun olduğunu göstermiştir. Tane veriminde Azkan ve Aksu nohut çeşitlerinin en verimli çeşitler olduğu saptanmıştır. Agronomik özelliklerden bitki boyu ve metrekarede bitki sayısı, fizyolojik özelliklerden normalize edilmiş vejetasyon indeksi tane verimi ile önemli seviyede ilişkili olduğu belirlenmiştir. Çiçeklenme süresi ve kanopy sıcaklığı ≤ deneme ortalaması olan genotiplerin tane verimi bakımından ön sırada olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, Muş ili ve benzer ekolojilerde kısa çiçeklenme süresi ve düşük kanopy sıcaklığını doğru seleksiyon için önemli ipucu kılabilir. Son olarak, Muş ili ve benzer ekolojilerde fizyoloji odaklı çalışmaların artmasının ve sürdürülmesinin nohut yetiştiriciliğine katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

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

Açıkgöz N. Nohut Tarımı. T.C. Tarım Orman ve Köy İşleri Bakanlığı, Ege Bölge Zirai Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları; 1987.

Atmaca E. Eskişehir koşullarında bazı nohut çeşit ve hatlarında farklı ekim zamanı ve sıra arası mesafelerinin verim, verim unsurları ve kalite üzerine etkisi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:2, Ankara, Türkiye, 2008.

Babagil GE. Muş ekolojik koşullarında bazı nohut (*Cicer arietinum* L.) çeşitlerinin verim ve verim unsurlarının değerlendirilmesi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi 2010; 7(3): 181-186.

Balota M., Payne WA., Evett SR., Lazar MD. Canopy temperature depression sampling to assess grain yield and genotypic differentiation in winter wheat. Crop Science 2007; 47: 1518-1529.

Bayrak H., Önder M. Konya ekolojisinde tarımı yapılan yerel nohut popülasyonları ve çeşitlerinin (*Cicer arietinum* L.) tarımsal, teknolojik ve besinsel karakterlerinin belirlenmesi. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi 2017; 26: 52-61.

Biçer BT., Anlarsal AE. Diyarbakır yöresi nohut *(Cicer arietinum* L.*)* köy popülasyonlarının tarımsal, morfolojik ve fenolojik özellikler için değerlendirilmesi. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2005; 9(3): 1-8.

Ceran F. Farklı zamanlarda ekilen nohut (*Cicer arietinum* L.) çeşitlerinin bazı tarımsal özelliklerinin belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek lisans tezi, sayfa no:5, Konya, Türkiye, 2015.

Ceran F., Önder M. Farklı dönemlerde ekilen nohut çeşitlerinde *(Cicer arietinum* L.*)* bazı tarımsal özelliklerin belirlenmesi. Selçuk Tarım bilimleri Dergisi 2016; 3(1): 25-29.

Çiftçi V., Toğay N., Toğay Y. Determining relationship among yield and some yield components using path coefficient analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.). Asian Journal of Plant Sciences 2004; 3(5): 632-635.

Çirka M., Kulaz H., Baran İ. Nohutta (*Cicer arietinum* L.) fosfor ve çinko uygulamalarının verim ve verim özellikleri üzerine etkileri. Akademik Ziraat Dergisi 2024; 13(1): 159-168.

Demirci Ö., Bildirici N. Şanlıurfa ekolojik koşullarında yetiştirilen bazı nohut (*Cicer arietinum* L.) çeşitlerinin verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2020; 20: 656-662.

Doğan Y., Ertaş M., Doğan S. Nohut *(Cicer arietinum L.)* çeşitlerinin Mardin-Kızıltepe ve Şanlıurfa-Bozova koşullarında verim ve verim unsurları bakımından değerlendirilmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi 2023; 10(3): 739-749.

Ercan MYİ., Uzun S., Özaktan H. Kayseri ekolojik koşullarında farklı ekim zamanlarının nohut *(Cicer arietinum* L.*)* bitkisinde verim, verim unsurları ve kalite üzerine etkileri. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; 16: 434-440.

Erdemci İ. Güneydoğu Anadolu Bölgesi koşularında farklı nohut *(Cicer arietinum* L.*)* genotiplerinin yazlık ve kışlık ekimlerinde bazı tarımsal ve teknolojik özeliklerinin belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no:61, Adana, Türkiye, 2012.

Gogoi N., Baruah KK., Meena RS. Grain legumes: Impact on soil health and agroecosystem. Chapter: 16, Legumes for Soil Health and Sustainable Management: Springer, Singapore 2018.

Gomez KA., Gomez AA. Statistical procedures for agricultural research. 2nd Ed. John Willey and Sons, Inc.**:** New York; 1984.

Gündoğdu KS. Buğday ekili parsellerde NDVI değerlerinin konumsal ve zamana bağlı değişiminin belirlenmesi. KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi 2018; 21(4): 492-499.

Güneş A., Tekatlı M., Ertürk E., Kılınç C. Kahramanmaraş koşullarında bazı ileri nohut (*Cicer arietinum* L.) genotiplerinde tarımsal özelliklerin incelenmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi 2022; 9(1): 119-131.

Karaköy T. Çukurova ve Orta Anadolu Bölgelerinden toplanan bazı yerel nohut *(Cicer arietinum* L.*)* genotiplerinin verim ve verimle ilgili özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezi, sayfa no:25-26, Adana, Türkiye, 2008.

Karaman M., Erdemci İ., Kaya S. Muş ekolojik koşullarında bazı tescilli nohut *(cicer arietinum* L.*)* çeşitlerinin verim, kalite ve agronomik özellikler bakımından değerlendirilmesi. Anadolu, J. of AARI 2024; 34(1): 1-12.

Kaya Y., Karaömerlioğlu Ö., Barış EF., Topaldemir H. Nohut hasadının elle yapılışı ve buna bağlı ortaya çıkan sorunlar (Tufanbeyli örneği). Premium e-Journal of Social Sciences 2023; 8(38): 226-235.

Kurtarıcı H., Yücel D. Mardin ilinden toplanan yerel nohut genotiplerinin karakterizasyonu. ISPEC Tarım Bilimleri Dergisi 2023; 7(1): 60-71.

Küçükalbay M., Akbolat D. Nohut hasadı için yerel olarak geliştirilen makine ile dane kaybının belirlenmesi. Ziraat Fakültesi Dergisi 2012; 7(1): 1307-1315.

Mupangwa W., Nyagumbo I., Liben F., Chipindu L., Craufurd P., Mhkuhlani S. Maize yields from rotation and intercropping systems with different legumes under conservation agriculture in contrasting agro-ecologies. Agriculture, Ecosystems and Environment 2021; 306: 107170.

Oğuz A., Erman M. Siirt ekolojik koşullarında farklı ekim zamanlarında ekilen nohut çeşitlerinin verim, verim öğeleri ve nodülasyon üzerine etkisi. MAS Journal of Applied Sciences 2021; 6(3): 564-575.

Ölmez M. Nohut *(Cicer arietinum* L.*)*'ta sıra arası mesafesi ile bitki sıklığının verim ve verim öğeleri üzerine etkileri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:28, Van, Türkiye, 2014.

Özaktan H., Erol O. Determination of some physical properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties cultivated in Kayseri ecological conditions. Journal of Erciyes Agriculture and Animal Science 2023; 6(1): 67-72.

Purushothaman R., Krishnamurthy L. Timing of sampling for the canopy temperature depression can be critical for the best differentiation of drought tolerance in chickpea. SAT eJournal 2014; 1(1): 1-9.

Reckling M., Hecker JM., Bergkvist G., Watson CA., Zander P., Schlafke N., Stoddard FL., Eory V., Topp CFE., Marie J., Bachinger J. A cropping system assessment framework-Evaluating effects of introducing legumes into crop rotations. European Journal of Agronomy 2016; 76: 186-197.

Reynolds MP, Nagarajan S., Razzaque MA., Ageeb OAA. Heat tolerance, application of physiology in wheat breeding. Mexico: CIMMYT; 2001.

Rodriguez C., Carlsson G., Englund J., Flöhr A., Pelzer E., Jeuffroy M., Makowski D., Jensen ES. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. European Journal of Agronomy 2020; 118: 126077.

Sarımurat MŞ., Kulaz H., Erdin F. Van ekolojik koşullarında yetiştirilebilen bazı nohut (*Cicer arietinum* L.) çeşitlerinde verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. MAS Journal of Applied Sciences 2022; 7(1): 128-138.

Singh KB., Holly, L., Bejiga G. A catolog of kabuli chickpea germplasm. ICARDA 1991; 398.

Şehirali S. Yemeklik tane baklagiller. A.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları 1089; 1988.

Toğay N., Toğay Y., Erman M., Doğan Y., Çığ F. Kuru ve sulu koşullarda farklı bitki sıklıklarının bazı nohut (*Cicer arientum L.*) çeşitlerinin verim ve verim öğelerine etkisi. Tarım Bilimleri Dergisi 2005; 11(4): 417-421.

Türk Z., Koç M. Diyarbakır koşullarında kuru ve sulu olarak yetiştirilen nohut (*Cicer arietinum* L.)'un verim ve verim unsurlarının belirlenmesi üzerine bir araştırma. Türkiye 5. Tarla Bitkileri Kongresi, 13-17 Ekim 2003, Diyarbakır.

Uzun A., Özçelik H., Yılmaz S. Seçilmiş bazı nohut (*Cicer arietinum* L.) hatlarının agronomik ve kalite özellikleri bakımından değerlendirilmesi. Akademik Ziraat Dergisi 2012; 1(1): 29-36.

Üstün A. Kuzey-Geçit bölgesinde nohut verimliliğini arttırma yolları. Tarım ve Köy Dergisi, Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı 1994.

Yıldız H., Mermer A., Ünal E., Akbaş F. Türkiye bitki örtüsünün NDVI verileri ile zamansal ve mekansal analizi. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi 2012; 21(2): 50-56.

Zhang C., McGee RJ., Vandemark GJ., Sankaran S. Crop performance evaluation of chickpea and dry pea breeding lines across seasons and locations using phenomics data. Frontiers and Plant Science 2021; 12: 640259.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1739-1751, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1739-1751, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Stres Tolerans İndeksleri Kullanılarak Ekmeklik Buğdayda Kuraklık Toleransının Değerlendirilmesi

Ferhat KIZILGEÇİ[1*], Negar TEBRİZLİ[2]

[1]Mardin Artuklu Üniversitesi, Kızıltepe Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Mardin
[2]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Organik Tarım İşletmeciliği Bölümü, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0002-7884-5463
[2]https://orcid.org/0000-0002-2307-5756
*Sorumlu yazar: ferhatkizilgeci@artuklu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 18.02.2025
Kabul tarihi: 28.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Kuraklık stresi
Destek sulama
TOL
Tane verimi
Biplot

ÖZ

Kuraklık stresi, dünya genelinde tahıl yetiştiriciliğinin yapıldığı birçok bölgede buğday verimliliğini sınırlayan önemli bir çevresel strestir. Bu çalışmada, bazı ekmeklik buğday (*Triticum aestivum* L.) genotiplerinin kuraklık stresine toleransını değerlendirmek amacıyla yürütülmüştür. Araştırma, 2021-2022 yetiştirme sezonunda sulu ve yağışa dayalı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Araştırmada dokuz kuraklık tolerans indeksi, sulu (Yp) ve yağışa dayalı (Ys) koşullar altında elde edilen tane verimine göre hesaplanmıştır. Varyans analizi sonucuna göre, kuraklık stresinin tane verimi üzerinde önemli etkilerinin yanı sıra tane verimi açısından genotipler arasında önemli farklılıklar olduğunu belirlenmiştir. Korelasyon ve çok değişkenli analiz sonuçları, strese tolerans indeksi (STI), geometrik ortalama verimlilik (GMP), harmonik ortalama (HM) ve ortalama verimlilik (MP) indekslerinin kuraklığa dayanıklı ve yüksek verimli genotiplerin seçimi için uygun kriterler olduğunu görülmüştür. HM, GMP, STI ve MP indekslerine göre Gn10 genotipi hem sulu hem de yağışa dayalı koşullar için yüksek verimli ve uygun genotip olduğu görülmüştür. Yp, Ys ve tolerans indeksleri kullanarak yapılan biplot analizine dayanarak, koşullar arasında üstün genotip belirlenmesinin mümkün olabileceği belirlenmiştir.

Evaluation of Drought Tolerance in Bread Wheat Using Stress Tolerance Indices

Research Article

Article History:
Received: 18.02.2025
Accepted: 28.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Drought stress
Supplement irrigation
TOL
Grain yield
Biplot

ABSTRACT

Drought stress is a major environmental stress limiting wheat productivity in most cereal growing areas of the world. The objective of this study was to evaluate drought stress tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. For this purpose, 14 genotypes were grown during 2021-2022 growing seasons under irrigated and rain-fed conditions. The nine drought tolerance indices were calculated based on grain yield under irrigated (Yp) and rain-fed (Ys) conditions. Results of the analysis of variance showed the significant influences of drought stress on grain yield as well as significant differences among genotypes for grain yield. Results of correlation coefficients and multivariate analyses revealed that the stress tolerance index (STI), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM) and mean productivity (MP) indices were the most profitable criteria for selection of drought tolerant and high-yielding genotypes. Using HM, GMP, STI and MP, the Gn10 were found to be the best genotypes with high yield and suitable for both irrigated and rain-fed conditions. Based on biplot analysis using Yp, Ys and the indices, it was possible to identify superior genotype across the conditions.

To Cite: Kızılgeçi F., Tebrizli N. Stres Tolerans İndeksleri Kullanılarak Ekmeklik Buğdayda Kuraklık Toleransının Değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1739-1751.

1. Giriş

Buğday, dünya genelinde en yaygın olarak yetiştirilen ürünlerden biridir ve dünya nüfusunun yaklaşık üçte biri için temel gıda maddesidir (Kizilgeci ve ark., 2020). Çok elverişli koşullardan marjinal koşullara kadar çeşitli ortamlarda yetiştirilmektedir. Bu nedenle çeşitli biyotik ve abiyotik streslerle karşı karşıya kalmaktadır (Kizilgeci ve Öztürk, 2022). Kuraklık stresi bir abiyotik stres faktörü olup hem asimilatların kaynağını (source) hem de havuzunu (sink) olumsuz yönde etkileyerek ürün veriminin azalmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden üretimdeki en önemli sınırlayıcı faktör olarak bilinmektedir (Moghaddam ve ark., 2024). Kuraklığa dayanıklı ekmeklik buğday genotiplerinin geleneksel yöntemlerle başarılı bir şekilde yetiştirilmesi için, yetiştiricilerin yetiştirme materyali hakkında temel bilgilere sahip olması gerekmektedir. Bunlardan bir tanesi, genotiplerin su stresine karşı gösterdikleri tepkilerdir. Genotipler arasında görünen tepki farklılıkları farklı genetiğe sahip bitkilerin kontrolüne ilişkin bir anlayış içerir. Zira strese dayanıklı ürünün geliştirmesi için bitkilerin kuraklığa karşı verdiği tepkileri anlamak önemlidir (Farshadfar ve ark., 2013). Bitkilerin kuraklık stresine karşı gösterdikleri toleransı değerlendirmek için çok sayıda nicel indeksler önerilmiştir. Bu indeksler hem stresli hemde stressiz koşullar altında bitki performansını karşılaştırmış olup, kuraklığa dayanıklı çeşitlerin değerlendirmesi için faydalı araçlardır (Nooryazdan, 2024). Rosielle ve Hamblin (1981)'e göre, stres tolerans (TOL) ve ortalama verimlilik (MP), sırasıyla stresli ve stressiz ortamlar arasındaki verim ve ortalama verim farkı olarak tanımlanmaktadırlar. (Pourdad, 2008)'e göre; TOL indeksine dayalı olarak seçilen genotiplerin stresli şartlarda nispeten yüksek verime ve sulu koşullarında düşük verime sahip çeşitlerdir. Düşük TOL değeri strese karşı daha yüksek tolerans göstermektedir. Tarla koşullarında kuraklık stresinin şiddeti yıldan yıla değişiklik göstermektedir (Fischer ve ark., 1979). Bitki ıslahçıları bu stres şiddetinin verim üzerinde yarattığı farklılığı geometrik ortalama verimlilik faktörü (GMP) ile değerlendirmektedir. Ayrıca hassas ve dirençli genotipleri ayırt etmesinde de MP'den daha iyi bir indekstir (Ramirez ve Kelly, 1998). Kuraklık koşulları altında yüksek verimli bir çeşit için bir diğer seçim kriteri, stres duyarlılık indeksidir (SSI). Fischer ve Maurer (1978), SSI'yi stresli ve stressiz koşullar altındaki genotiplerin performansına oranlamıştır. Fernandez (1992), strese tolerans indeksinin (STI) sulu koşullarda tane verimi (Yp), yağışa dayalı koşullarda tane verimi (Ys) ve Ȳp'ye (toplam Yp'nin ortalaması) dayalı olarak stresli ve stressiz koşullar altındaki yüksek verimli genotipleri belirlemek için gelişmiş bir indeks olarak tanımlamıştır. Golabadi ve ark. (2006). STI, MP ve GMP'nin, hem stresli hem de stressiz koşullar altında makarnalık buğdayda yüksek verimli genotiplerin seçimi için üstün kriterler olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu kriterlere dayalı seçim, stressiz koşullarda düşük verim potansiyeline ve stresli koşullarda yüksek verim potansiyeline sahip genotiplerin seçilmesine yardımcı olmaktadır. Fernandez (1992) MP ve Ys arasında pozitif bir korelasyon olduğunu bu nedenle MP'ye dayalı seçim, hem stresli hem de stressiz koşullar altında ortalama verimi artıracağını bildirmiştir. Rosielle ve Hamblin (1981), Nouri ve ark. (2011), Kamrani (2015) ve Najaphy ve

Geravandi (2011) yapmış oldukları çalışmalarında STI ve GMP indekslerinin, hem stresli hem de stressiz koşullarda iyi performans gösteren genotiplerin seçimi için daha uygun indeksler olduğunu bildirmişleridir. Bu nedenle, farklı indeksler arasında en iyi ve en uygun endeksin seçimi için mutlaka yetişme koşulları (stresli veya stressiz ortam) dikkate alınması gerekmektedir. Bansal ve Sinha (1991), kuraklığa dayanıklı buğday genotiplerinin belirlenmesi için SSI ve tane verimini stabilite parametrelerinin kullanmasını önermiştir. Fischer ve Maurer (1978), SSI'si bir birimden az olan genotiplerin kuraklığa dayanıklı olduğunu, çünkü kuraklık koşullarındaki verim düşüşlerinin tüm genotiplerin ortalama verim düşüşünden daha küçük olmasından dolayı olduğunu belirtmiştir. Fernandez (1992), farklı yıllardaki stres varyasyonunun etkilerinden kaçınmak için duyarlılığın belirlenmesinde genotiplerin GMP'sini her iki koşulda kullanmıştır. Ramirez ve Kelly (1998), GMP ve SSI indekslerinin fasulyede kuraklığa dayanıklı genotiplerin belirlenmesi için daha arzu edilen kriterler olabileceğini bildirmiştir. STI ve GMP indeksleri stresli ve stressiz koşullar altında yüksek verime sahip genotipleri seçmeninde SSI indeksi ise stres koşullarında iyi verim veren genotipleri belirlenmesinde kullanılmaktadır (Souri ve ark., 2005; Kamrani, 2015). Rahmani ve ark. (2013) YSI, GMP ve HM indekslerinin stres koşulları altında verimle ilgili pozitif korelasyon gösterdiğini, TOL ve MP indekslerinin ise stressiz koşullar altında pozitif korelasyon gösterdiğini bildirmişlerdir. Mevcut çalışma, 14 ekmeklik buğday genotipinin farklı çevre koşulları altında (yağışa dayalı ve sulu) yüzde verim azalması (RC), stres tolerans indeksi (STI), harmonik ortalama (HM), geometrik ortalama (GMP), ortalama verimlilik (MP), verim indeksi (YI), verim stabilite indeksi (YSI), bağıl stres indeksi (RSI), tolerans indeksi (TOL) ve stres duyarlılık indeksi (SSI) gibi dokuz stres indeksiyle (i) kuraklığa dayanıklı genotiplerin tanımlanması ve seçilmesi (ii) genotiplerin tane verimi ve stres indeks değerlerinin değerlendirilmesi (iii) tane verimi ve stres indeksleri arasındaki korelasyon analizi, temel bileşen, biplot ve cluster analizi temelinde incelenmesi amacıyla yürütülmüştür.

2. Materyal ve Metot

Araştırmada, bitki materyali olarak CIMMYT tarafından geliştirilen onbir adet ileri kademe ekmeklik buğday genotipi ve bölge çifçileri tarafında yaygın olarak yetiştiriciliği yapılan Ceyhan 99, Dinç ve Sagittario ekmeklik buğday çeşitleri standart olarak kullanılmıştır. Mevcut çalışma, 2021-2022 üretim sezonunda sulu ve yağışa dayalı koşullarda Şanlıurfa ilinde yürütülmüştür. Deneme parselleri 5 m × 1,2 m: 6 m^2 olacak şekilde tesadüf bloklar deneme desenine göre 3 tekrarlamalı olarak kurulmuştur. Deneme sahasının toprak yapısı killi-tınlı, organik madde içeriği oldukça düşük, pH:7,70 ve tuzluluk sorunu olmayan yapıya sahiptir (Tablo 1).

Tablo 1. Deneme alanına ait bazı toprak özellikleri

pH	EC (ds/m)	Kireç (%)	P_2O_5 (kg da^{-1})	K_2O (kg da-1)	N (%)	Org. madde (%)
7,70	0,9	24	1,18	45,2	0,07	1,1

Araştırmanın yürütüldüğü yetiştirme döneminde ortalama sıcaklık değeri 15,46 °C ve toplam yağış miktarı 120,2 mm gerçekleşmiştir (Tablo 2). Araştırmanın yürütüldüğü dönem ile uzun yıllar yağış miktarı kıyaslandığında yaklaşık olarak 300 mm daha düşük yağış düşmüştür.

Tablo 2. Araştrmanın yürütülüğü 2021-2022 yılı Şanlıurfa ili iklim verileri

Aylar	Ort. Minimum Sıcaklık (°C)	Ort. Max. Sıcaklık (°C)	Ort. Sıcaklık (°C)	Toplam Yağış (mm)
Kasım	10,35	20,55	15,2	26,6
Aralık	5,35	14,90	9,95	11,95
Ocak	3,40	11,15	7,00	20,6
Şubat	5,00	15,95	10,30	3,8
Mart	4,65	15,20	9,60	20,45
Nisan	11,85	26,35	19,30	5,85
Mayıs	15,80	30,80	23,80	30,5
Haziran	19,80	36,00	28,55	0,45
Toplam				120,2
Ortalama	9,53	21,36	15,46	

Sulu koşul için gerekli olan destek sulama başaklanma ve tane dolum döneminde olmak üzere 2 defa yağmurlama sulama sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Deneme sahasında görülen yabancı ot, hastalık ve zararlılara karşı kimyasal mücadele yapılmıştır. Hasat harman işlemi Haziran ayında gerçekleştirilmiştir. Hasat sonrası elde edilen ürünlerin tane verimi sulu koşullar (Yp) yağışa dayalı ise (Ys) olarak ifade edilmiştir. Araştırmada dokuz duyarlılık ve tolerans indeksi incelenmiştir. Bu indekslerin hesaplamaları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Tolerans ve duyarlılık indekslerinin matematiksel formülleri

İndeks	Formül	Referans
Tolerans	TOL=Ys-Yp	Rosielle ve Hamblin (1981)
Ortalama Verimlilik	MP=(Ys +Yp)/2	Rosielle ve Hamblin (1981)
Geometrik Ortalama Verimlilik	GMP=√Ys ×Yp	Fernandez (1992)
Harmonik Ortalama	HM = 2(Ys ×Yp)/(Ys +Yp)	Bidinger ve ark. (1987)
Stres Duyarlılık İndeksi	SSI=(1-(Ys /Yp))/(1-($\bar{Y}s/\bar{Y}p$))	Fischer ve Maurer (1978)
Stres Tolerans İndeksi	STI=(Ys ×Yp)/($\bar{Y}p$)^2	Fernandez (1992)
Verim İndeksi	YI=(Ys)/($\bar{Y}s$)	Gavuzzi ve ark.(1997)
Verim Stabilite İndeksi	YSI=Ys /Yp	Bouslama ve Schapaugh (1984)
Bağıl Stres Indeksi	RSI=(Ys /Yp)/ ($\bar{Y}s/\bar{Y}p$)	Fischer ve Wood (1979)

Yukarıdaki formülde, Ys: yağışa dayalı koşulda yetiştirilen her bir genotipin verim değeri, Yp: destek sulama koşulunda yetiştirilen her bir genotipin verim değeri, $\bar{Y}s$ ve $\bar{Y}p$ sırasıyla yağışa dayalı ve destek sulama koşullarında tüm genotiplerin verim ortalamasını ifade etmektedir. Çalışmada elde edilen verilerin varyans analizi, stres tolerans indeksleri arasındaki pearson's korelasyon analizi ve cluster analizi için JMP Clinical 18 istatistik programı kullanılmıştır. Stres tolerans indeksleri, üç boyutlu çizimler ve biplot analizleri için iPASTIC toolkit (Pour-Aboughadareh ve ark., 2019) kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Araştırma sonuçlarına göre elde edilen varyans analizi, ortalama verim değerleri ve duyarlılık/tolerans indeks sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. Yağışa dayalı ve sulu koşullarda genotipler arası farklılıklar sırasıyla %1 ve %5 seviyesinde önemli farklılıklar oluştuğu görülmüştür. En yüksek tane verimi kuru ve sulu koşullarda Gn10 (sırasıyla, 384,8 ve 919,5 kg da^{-1}) genotipinde belirlenmiştir. En düşük tane verimi kuru koşullarda Gn7 (248,5 kg da^{-1}) ve sulu koşullarda Gn9 (683,7 kg da^{-1}) genotiplerinde belirlenmiştir. Her iki koşul kıyaslandığında tane veriminde en fazla azalış %70,11 ile Gn11 genotipinde görülmüştür. Duyarlılık/tolerans indeksleri incelediğinde; En düşük TOL değerine Gn9 ve Sagittario genotiplerinin sahip oldukları ve bu iki genotipin diğer genotiplere göre strese daha tolerant olduğu görülmüştür. Dinç, Gn5, Gn7, Gn10 ve Gn11 genotipleri ise strese daha hassas oldukları belirlenmiştir. Lamba ve ark. (2023) yüksek TOL değerlerine sahip genotiplerin strese karşı daha yüksek duyarlılık gösterdiğinden, toleranslı genotipleri seçmek için daha küçük TOL değerlerine sahip genotiplerin tercih edilmesi gerektiğini bildirmiştir. Çalışmamızda en yüksek MP, GMP, HM ve STI indeks değerine Gn10 sahip olmuştur. Gn10 genotipi diğer genotiplere göre stres koşullarında daha iyi performans göstermiştir. Pour-Aboughadareh ve ark. (2019) stresli ve stressiz koşullarda iyi performans gösteren genotiplerin STI, MP, GMP ve HM indekslerinin yüksek değerlere sahip olduğunu ve bu genotiplerin strese toleranslı olacağını bildirmiştir. SSI, stresli koşullara kıyasla stressiz koşullar altında minimal azalma gösteren genotipler belirlenirken (Fischer ve Maurer, 1978); SSI > 1, kuraklık stresine karşı ortalamanın üzerinde bir duyarlılık göstermektedir (Guttieri ve ark., 2001). Sagittario (0,831) çeşidi en düşük SSI değeri ile strese daha az duyarlıyken, Gn11 (1,160) en yüksek SSI değeri ile strese daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. YI, YSI ve RSI hem stresli hem de stressiz koşullarda genotiplerin stabilitesini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu indeksler genotiplerin toleransına veya duyarlılığına dayanmaktadır. En yüksek YI değeri Gn10 genotipinde belirlenmiştir. Ashraf ve ark. (2015) ve Singh ve ark. (2015)'na göre daha yüksek YI değerine sahip genotiplerin stres koşullarına karşı daha dayanıklı olacağını bildirmişlerdir. Araştırmamızda YSI ve RSI indekslerinin toleranslı genotiplerin karakterizasyonunda benzer sıralamaya sahip olduğu belirlenmiştir. Sagittario, Gn6, Gn9 ve Ceyhan 99 genotipleri en yüksek değere sahip olmuştur.

Çalışmada incelenen genotiplerinin kuraklık duyarlılık/tolerans indekslerinin sıralama toplamları 34 (Sagittario ve Gn10) ile 136 (Gn4) ve sıralama ortalamaları 3,09 (Sagittario ve Gn10) ile 12,36 (Gn4) arasında değişmiştir (Tablo 5). Araştırmamızda Gn10 genotipine ait ST, SO ve SS değerlerinin (sırasıyla, 34, 3,09 ve 3,48) düşük olması stresli koşullarda daha iyi performans göstereceğini göstermektedir. Pour-Aboughadareh ve ark. (2020) tüm indekslerin sıralama toplamasının (ST) en iyi genotipleri seçmek için bir gösterge olarak kullanılabilineceğini, Buna göre, her özelliğin en iyi performansı en düşük sıralamada olması gerektiği, dolayısıyla en düşük ST ve standart sapma (SS) değerlerine sahip genotipler en iyi genotipler olduğunu bildirmiştir.

Tablo 4. Yağışa dayalı ve destek sulama koşullarında yetiştirilen ekmeklik buğday genotiplerinin ortalama tane verim değerleri, stres tolerans indeksleri ve varyan analiz sonuçları

Genotip Adı	Yp (kg da^{-1})	Ys (kg da^{-1})	RC(%)	TOL	MP	GMP	HM	SSI	STI	YI	YSI	RSI
Ceyhan 99	700,1	298,9	57,31	401,2	499,5	457,45	418,94	0,948	0,346	0,971	0,427	1,079
Dinç	824,7	312,8	62,07	511,9	568,75	507,9	453,57	1,027	0,427	1,016	0,379	0,958
Sagittario	734,2	365,4	50,23	368,8	549,8	517,95	487,95	0,831	0,444	1,187	0,498	1,258
Gn1	820,1	313,7	61,75	506,4	566,9	507,21	453,81	1,022	0,425	1,019	0,383	0,967
Gn2	725,9	284,4	60,82	441,5	505,15	454,36	408,68	1,007	0,341	0,924	0,392	0,99
Gn3	796,5	305,5	61,64	491,0	551,0	493,29	441,62	1,020	0,402	0,993	0,384	0,969
Gn4	683,8	251,0	63,29	432,8	467,4	414,29	367,21	1,047	0,284	0,816	0,367	0,928
Gn5	856,3	324,4	62,12	531,9	590,35	527,05	470,54	1,028	0,459	1,054	0,379	0,957
Gn6	754,6	350,3	53,58	404,3	552,45	514,14	478,48	0,887	0,437	1,138	0,464	1,173
Gn7	794,7	248,5	68,73	546,2	521,6	444,39	378,61	1,137	0,327	0,808	0,313	0,79
Gn8	748,4	279,0	62,72	469,4	513,7	456,95	406,47	1,038	0,345	0,907	0,373	0,942
Gn9	683,7	337,1	50,69	346,6	510,4	480,08	451,56	0,839	0,381	1,095	0,493	1,246
Gn10	919,5	384,8	58,15	534,7	652,15	594,83	542,55	0,962	0,585	1,25	0,418	1,058
Gn11	844,8	252,5	70,11	592,3	548,65	461,86	388,79	1,160	0,353	0,821	0,299	0,755
Ortalama	777,66	307,74		469,93	542,70	487,98	439,20	1,00	0,397	1,000	0,398	1,005
Std sapma	68,18	40,98		70,2	43,95	43,44	46,27	0,093	0,072	0,133	0,056	0,142
DK(%)	8,30*	15,10**										
AÖF	96,70	66,10										

(Yp) sulu koşullarda tane verimi, (Ys) yağışa dayalı koşullarda tane verimi, (STI),stres tolerans indeksi, (HM) harmonik ortalama , (GMP) geometrik ortalama , (MP) ortalama verimlilik , (YI) verim indeksi , (YSI) verim stabilite indeksi , (RSI) bağıl stres indeksi , (TOL) tolerans indeksi ve stres (SSI) duyarlılık indeksi, (RC) yüzde verim azalması

Tablo 5. Kuraklık tolerans indekslerinin sıralaması, sıralama toplamı (ST), sıralama ortalaması (SO) ve standart sapması (SS)

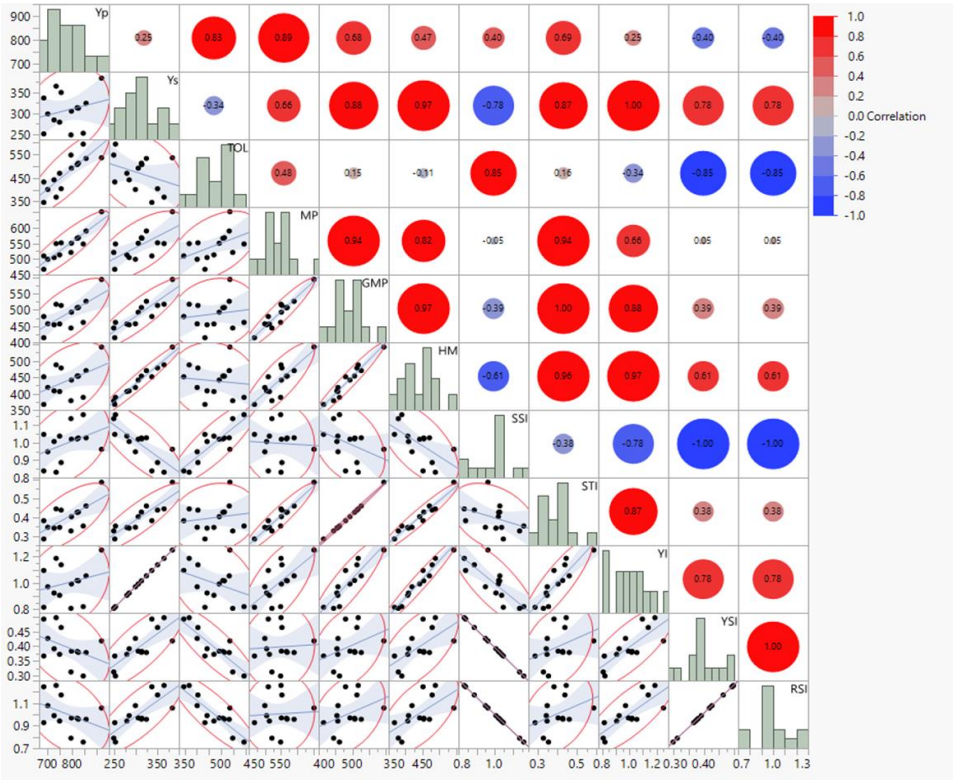
Genotip Adı	**Yp**	**Ys**	**TOL**	**MP**	**GMP**	**HM**	**SSI**	**STI**	**YI**	**YSI**	**RSI**	**ST**	**SO**	**SS**
Ceyhan 99	12	9	3	13	10	9	4	10	9	4	4	87	7,91	3,53
Dinç	4	7	10	3	5	6	9	5	7	9	9	74	6,73	2,33
Sagittario	10	2	2	7	3	2	1	3	2	1	1	34	3,09	2,84
Gn1	5	6	9	4	6	5	8	6	6	8	8	71	6,45	1,57
Gn2	11	10	6	12	12	10	6	12	10	6	6	101	9,18	2,64
Gn3	6	8	8	6	7	8	7	7	8	7	7	79	7,18	0,75
Gn4	13	13	5	14	14	14	12	14	13	12	12	136	12,36	2,58
Gn5	2	5	11	2	2	4	10	2	5	10	10	63	5,73	3,77
Gn6	8	3	4	5	4	3	3	4	3	3	3	43	3,91	1,51
Gn7	7	14	13	9	13	13	13	13	14	13	13	135	12,27	2,20
Gn8	9	11	7	10	11	11	11	11	11	11	11	114	10,36	1,29
Gn9	14	4	1	11	8	7	2	8	4	2	2	63	5,73	4,22
Gn10	1	1	12	1	1	1	5	1	1	5	5	34	3,09	3,48
Gn11	3	12	14	8	9	12	14	9	12	14	14	121	11,00	3,46

(Yp) sulu koşullarda tane verimi, (Ys) yağışa dayalı koşullarda tane verimi, (STI),stres tolerans indeksi, (HM) harmonik ortalama , (GMP) geometrik ortalama , (MP) ortalama verimlilik , (YI) verim indeksi , (YSI) verim stabilite indeksi , (RSI) bağıl stres indeksi , (TOL) tolerans indeksi ve stres (SSI) duyarlılık indeksi

3.1. Korelasyon analizi

Sulu ve yağışa dayalı koşullarda yetiştirilen genotiplerin tane verimi ile incelenen dokuz duyarlılık/tolerans indeksine ait Pearson's korelasyon analizi Şekil 1'de gösterilmiştir. Korelasyon analizine göre sulu koşullarda tane verimi (Yp) ile TOL (r=0,83, %1), MP (r=0,89, %0,1), GMP (r=0,68,

%1) ve STI (r=0,69, %1) arasında olumlu önemli ilişki olduğu belirlenmiştir. Kuru koşullarda tane verimi (Ys) ile MP (r=0,66, %5), GMP (r=0,88, %0,1), HM (r=0,97, %0,1), STI (r=0,87, %0,1), YI (r=1,0, %0,1), YSI (r=0,78, %1) ve RSI (r=0,78, %1) arasında olumlu ve önemli ilişki olduğu görülmüştür. Farshadfar ve Javadinia (2011) Ys ve Yp ile yüksek oranda ilişkili olan indekslerin, strese dayanıklı çeşitlerin belirlenmesi için en uygun olan indeksler olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle çalışmamızda sulu ve yağışa dayalı koşullarda tane verimi ile yüksek oranda pozitif ve önemli korelasyon gösteren MP, GMP ve STI indekslerinin en uygun indeksler olduğu belirlenmiştir. Bu indekslerin kuraklık stresinin yanı sıra stressiz koşullarda da yüksek verimli genotipleri belirlemede etkili olabileceğini göstermiştir. Kamrani ve ark. (2018), Yp ve Ys'nin birlikte pozitif korelasyona gösterdiği duyarlılık/tolerans indekslerinin her iki koşulda da yüksek performanslı genotiplerin belirlenebileceğini ileri sürmüştür.



Şekil 1. Tolerans indeksleri Pearson's korelasyon analizine dayalı Scatterplot Matrix (önemli daireler) grafiği (Yp) sulu koşullarda tane verimi, (Ys) yağışa dayalı koşullarda tane verimi, (STI),stres tolerans indeksi, (HM) harmonik ortalama , (GMP) geometrik ortalama , (MP) ortalama verimlilik , (YI) verim indeksi , (YSI) verim stabilite indeksi , (RSI) bağıl stres indeksi , (TOL) tolerans indeksi ve stres (SSI) duyarlılık indeksi

3.2. Principal Component Analizi (PCA)

Temel birleşen analizi (PCA) Tablo 6 ve Şekil 2'de sunulmuştur. İlk iki birleşen (PC1+PC2) iki koşulda toplam varyansın % 99,87 ifade etmektedir. PC1 elde edilen varyasyonun % 62,98'ini ifade etmekte ve Yp, Ys, MP, GMP, HM, STI, YI, YSI, RSI ile yüksek koordinasyon göstermiştir. Bu nedenle, ilk birleşen verim potansiyeli ve kuraklık toleransı olarak adlandırılmaktadır. Dinç, Sagittario, Gn1, Gn5 Bu bileşen, her iki ortamda da yüksek verime sahip kuraklığa dayanıklı genotipleri olmuştur. Benzer

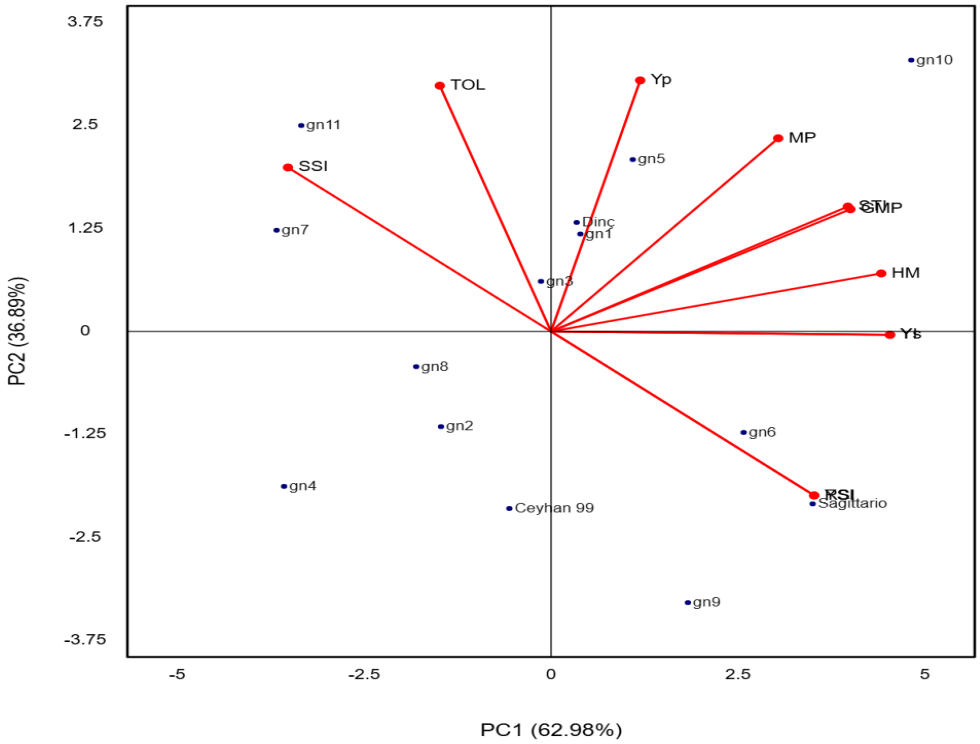
şekilde, PC2, Yp, TOL, MP, GMP, HM ve SSI ile ilişkiye sahip olmuştur. Bu da stres duyarlılığı bileşeni olarak adlandırılabilir. Moghaddam ve ark. (2024) biplot diyagramına göre genotiplerin kuraklık dayanıklılık indekslerine (STI, MP, GMP ve HM) göre üstün genotiplerin belirleneceğini ifade etmişlerdir.

Tablo 6. Sulu ve yağışa dayalı koşullar altında yetiştirilen 14 buğday genotipinin tane verimi için ilk iki ana bileşenin (PC) özdeğeri, değişkenliği, kümülatif ve faktör yüklemeleri

Faktör	**PC1**	**PC2**
Özdeğer	6,927377	4,058127
Değişkenlik (%)	62,97615	36,89206
Kümülatif %	62,97615	99,86822
Yp	0,262963	0,963882
Ys	0,99985	-0,01298
TOL	-0,32819	0,943548
MP	0,670125	0,741627
GMP	0,882912	0,469099
HM	0,97401	0,22276
SSI	-0,77615	0,629513
STI	0,875564	0,479474
YI	0,99985	-0,01298
YSI	0,776146	-0,62951
RSI	0,776146	-0,62951
Ceyhan 99	-0,55783	-2,1466
Dinç	0,342795	1,321826
Sagittario	3,499344	-2,09064
Gn1	0,391824	1,181806
Gn2	-1,47197	-1,15424
Gn3	-0,13455	0,607551
Gn4	-3,57102	-1,8786
Gn5	1,092894	2,084154
Gn6	2,576125	-1,22456
Gn7	-3,67111	1,227113
Gn8	-1,80437	-0,42712
Gn9	1,830786	-3,28797
Gn10	4,818063	3,289885
Gn11	-3,34099	2,497399

(Yp) sulu koşullarda tane verimi, (Ys) yağışa dayalı koşullarda tane verimi, (STI) stres tolerans indeksi, (HM) harmonik ortalama , (GMP) geometrik ortalama , (MP) ortalama verimlilik , (YI) verim indeksi , (YSI) verim stabilite indeksi , (RSI) bağıl stres indeksi , (TOL) tolerans indeksi ve stres (SSI) duyarlılık indeksi

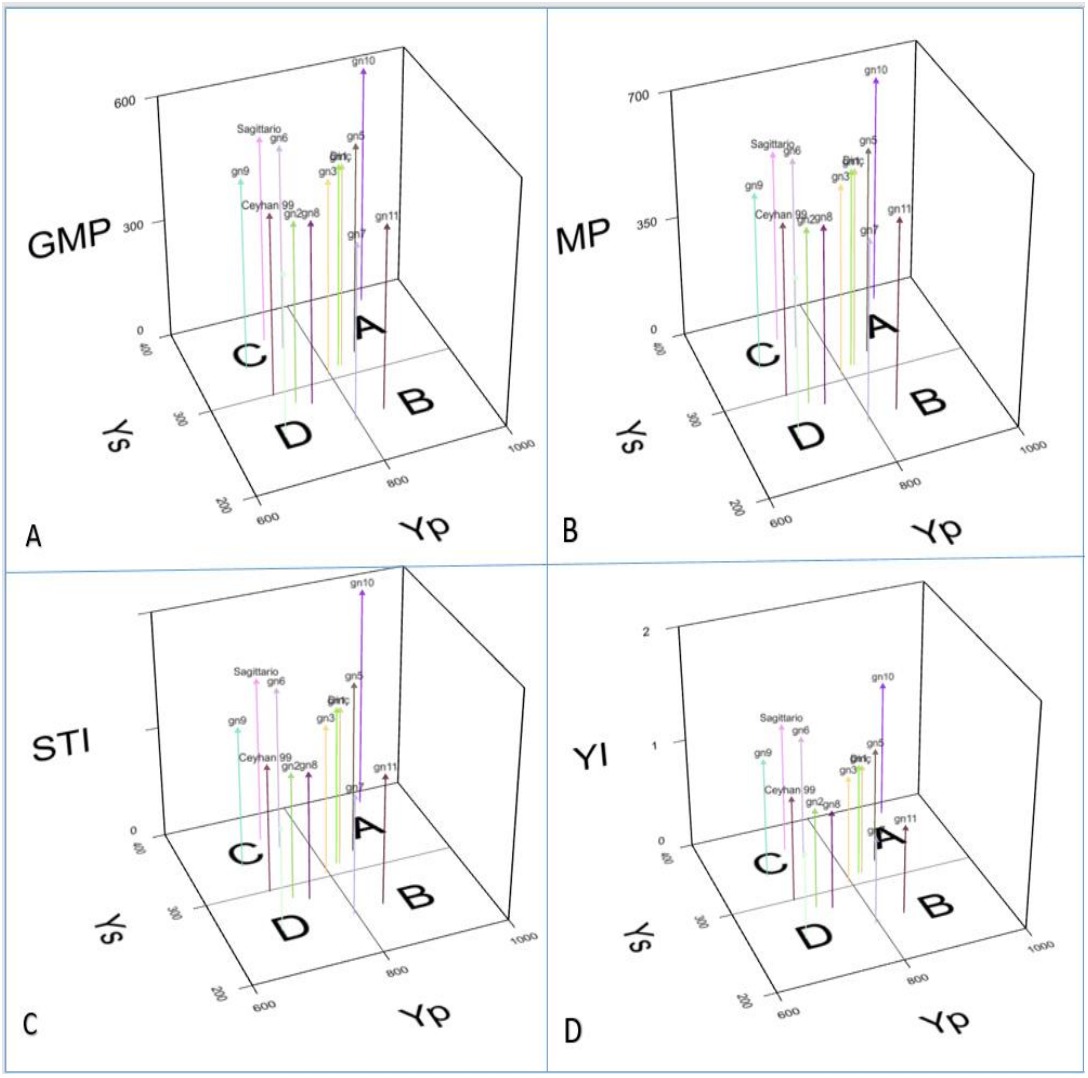
Korelasyon katsayısı iki değişken arasındaki ilişkileri analiz etmek için uygun olsa da, Nouri ve ark. (2011) PCA'nın hem normal hem de stres koşullarında en iyi verimli genotiplerin seçimi için korelasyon katsayısından daha iyi bir kriter olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2. Ondört ekmeklik buğday genotipi ve kuraklık duyarlılık/tolerans indekslerinin biplot grafiği (Yp) sulu koşullarda tane verimi, (Ys) yağışa dayalı koşullarda tane verimi, (STI) stres tolerans indeksi, (HM) harmonik ortalama , (GMP) geometrik ortalama , (MP) ortalama verimlilik , (YI) verim indeksi , (YSI) verim stabilite indeksi , (RSI) bağıl stres indeksi, (TOL) tolerans indeksi ve stres (SSI) duyarlılık indeksi

3.3. Üç boyutlu grafik

Kuraklığa duyarlı/tolerant genotipleri belirlemek için oluşturulan üç boyultlu grafikler Şekil 3'te gösterilmiştir. Fernandez (1992)'in teorisine göre, genotipler, stres ve stres olmayan ortamlardaki performanslarına göre dört gruba ayrılmıştır; Genotipler, hem stres hem de stres olmayan koşullarda üstünlük gösterenler (Grup A), yalnızca stres olmayan koşullarda olumlu performans gösterenler (Grup B), yalnızca stres koşullarında nispeten daha yüksek verim verenler (Grup C) ve hem stres hem de stres olmayan koşullarda zayıf performans gösterenler (Grup D) olarak gruplandırılmıştır. Optimum seçim kriteri için Grup A diğer üç gruptan ayrılmıştır. Çalışmamızda yüksek verimli genotipleri belirlemek için seleksiyon kriteri olarak belirlenen GMP, MP, YI, STI arasındaki üç boyutlu grafiklere göre Gn1, Gn5, Gn10 ve Dinç 'A' grubunda; Gn11 'B' grubunda, Gn3, Gn6, Gn9, Ceyhan99 ve Sagittario 'C' grubunda; Gn2, Gn4, Gn7, Gn8 'D' grubunda yer aldığı görülmüştür.

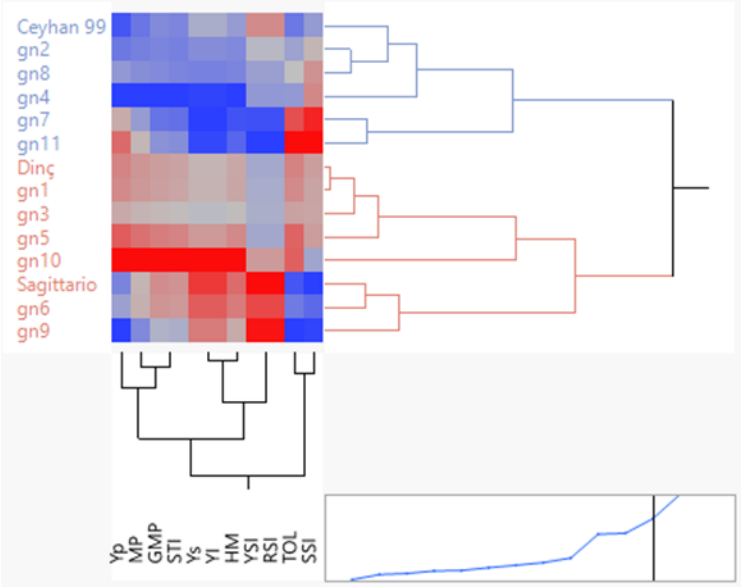


Şekil 3. Ekmeklik genotiplerin (A) GMP, (B) MP, (C) STI, (D)YI ve Ys, Yp arasında üç boyutlu grafik sunumu

Ortalama verimlilik (MP), geometrik ortalama verimlilik (GMP) ve stres tolerans indeksi (STI), optimal ve kuraklık stresi koşulları altında tane verimi ile güçlü bir şekilde ilişkilendirilmiştir. Bu da MP, GMP ve STI'ye dayalı genotiplerin seçiminin, kuraklık stresi ve sulu koşullarda yüksek tane verimi ile sonuçlanacağını göstermiştir. Bu bulgu, hem sulu hem de yağışa dayalı koşullarda, kuraklığa dayanıklı genotiplerin seçimi için test ortamları olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

3.4. Cluster Analizi

Yp, Ys ve araştırmada incelene dokuz kuraklığa duyarlılık/tolerans indekslerine göre, incelenen tüm buğday genotipleri iki gruba ayrılmıştır (Şekil 4). İlk grupta araştırmada incelenen dokuz duyarlılık/tolerans indeks sıralama ortalaması (SO) yüksek olan genotiplerin (Ceyhan 99, Gn2, Gn4, Gn7, Gn8, Gn11) yer aldığı görülürken ikinci grupta ise SO'su düşük olan genotipler yer almıştır.



Şekil 4. Ward yöntemi kullanılarak, stres tolerans indekslerine dayalı çeşitlerin sınıflandırılması

4. Sonuçlar

Kuraklığa dayanıklı genotiplerin seçiminde, genotiplerin hem stresli hem de stressiz koşullara iyi adapte olması önemlidir. Mevcut çalışmada, Yp (stres olmayan ortamda verim), Ys (stresli ortamda verim) ve tolerans indeksleri kullanılarak yapılan korelasyon ve çok değişkenli analizler, özellikle Strese Tolerans İndeksi (STI), Geometrik Ortalama Verimlilik (GMP), Harmonik Ortalama (HM) ve Ortalama Verimlilik (MP) indekslerinin, kuraklığa dayanıklı ve yüksek verimli genotiplerin seçiminde uygun kriterler olduğunu göstermiştir. Bu analizler sonucunda, Gn10 genotipinin hem sulama yapılan hem de yağışa dayalı üretim koşullarında yüksek verimlilik sergileyerek öne çıktığı belirlenmiştir. Gn10 genotipinin, özellikle kuraklık stresi altında veya sulu alanlarda yetiştirilmek üzere Güneydoğu Anadolu Bölgesi için ümitvar bir genotip olduğu görülmüştür.

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

Ashraf A., El-Mohsen A., Abd El-Shfi MA., Gheith EMS., Suleiman HS. Using different statistical procedures for evaluating drought tolerance indices of bread wheat genotypes. Advances in Agriculture and Biology 2015; 3: 19–23.

Bidinger FR., Mahalakshmi V., Rao GDP. Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). II. Estimation of genotype response to stress. Australian Journal of Agricultural Research 1987; 38(1): 49-59.

Bansal KC., Sinha SK. Assessment of drought resistance in 20 accessions of *Triticum aestivum* and related species. Part I: total dry matter and grain yield stability. Euphytica 1991; 56, 7–14.

Bouslama M., Schapaugh WT. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. Crop Science 1984; 24(5): 933–937.

Farshadfar E., Javadinia J. Evaluation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes for drought tolerance. Seed and Plant Improvement Journal 2011; 27: 517–537.

Farshadfar E., Mohammad M., Seyed M. Assessment of drought tolerance in land races of bread wheat based on resistance/tolerance indices.International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research 2013; 1(2): 143- 158.

Fernandez GCJ. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In: Kuo, C.G. (Ed.) Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. Tainan, Taiwan; 1992.

Fischer RA., Maurer R. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Crop and Pasture Science 1978; 29: 897–912.

Fischer RA., Wood JT. Drought resistance in spring wheat cultivars. III. Yield associations with morpho-physiological traits. Australian Journal of Agricultural Research 1979; 30(6): 1001-1020.

Gavuzzi P., Rizza F., Palumbo M., Campanile RG., Ricciardi GL., Borghi B. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. Canadian Journal of Plant Science 1997; 77: 23–531.

Golabadi M., Arzani A., Mirmohamadi Maibody SAM. Assessment of drought tolerance in segregation population in durum wheat. African Journal of Agricultural Research 2006; 1(5): 162-171.

Guttieri MJ., Bowen D.,Gannon D., O'Brien K., Souza E. Solvent retention capacities of irrigated soft white spring wheat flours. Crop Science 2001; 41: 1054–1061.

Kamrani M. Relationship among agro-morphological traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under irrigated and rain-fed conditions. Journal of Agronomy 2015; 14: 254–263.

Kamrani M., Hoseini Y., Ebadollahi A. Evaluation for heat stress tolerance in durum wheat genotypes using stress tolerance indices. Archives of Agronomy and Soil Science 2018; 64(1): 38-45.

Kizilgeci F., Mokhtari NEP., Hossain A. Growth and physiological traits of five bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes are influenced by different levels of salinity and drought stress. Fresenius Environmental Bulletin 2020; 29(9A): 8592-8599.

Kizilgeci F., Öztürk F. Agronomical, morphological and physiological responses to heat and drought stress in wheat: A review. Tarımsal Perspektif-2 Agricultural Perspective 2022; 2-5.

Lamba K., Kumar M., Singh V., Chaudhary L., Sharma R., Yashveer S., Dalal MS. Heat stress tolerance indices for identification of the heat tolerant wheat genotypes. Scientific Reports 2023; 13(1): 10842.

Najaphy A., Geravandi M. Assessment of indices to identify wheat genotypes adapted to irrigated and rain-fed environments. Advances in Environmental Biology 2011; 3212.

Nooryazdan H. Evaluation of grain yield among wheat cultivars based on drought stress tolerance indices. Cereal Biotechnology and Biochemistry 2024; 3(2): 325-345.

Nouri A., Etminan A., Teixeira da Silva JA., Mohammadi R. Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turjidum* var. durum Desf.). Australian Journal of Crop Science 2011; 5(1): 8-16.

Pourdad SS. Study of drought resistance indices in spring safflower. Acta Agronomica Hungarica 2008; 56(2): 203–212.

Pour-Aboughadareh A., Yousefian M., Moradkhani H., Moghaddam Vahed M., Poczai P., Siddique KH. iPASTIC: An online toolkit to estimate plant abiotic stress indices. Applications in Plant Sciences 2019; 7(7): e11278.

Pour-Aboughadareh A., Mohammadi R., Etminan A., Shooshtari L., Maleki-Tabrizi N., Poczai P. Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. Sustainability 2020; 12(14): 5610.

Rahmani SH., Farshadfar E., Jowkar MM. Locating QTLs controlling yield based indicators of drought tolerance in agropyron using wheat agropyron disomic addition lines. International Journal of Agricultural Sciences 2013; 5(9): 1028-1033.

Ramirez-Vallejo P., Kelly JD. Traits related to drought resistance in common bean. Euphytica 1998; 99: 127–136.

Rosielle AA., Hamblin J. Theoretical aspects of selection for yield in stress and nonstress environment. Crop Science 1981; 21: 943-946.

Singh S., Sengar RS., Kulshreshtha N., Datta D., Tomar RS., Rao VP., Ojha A. Assessment of multiple tolerance indices for salinity stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Agricultural Science 2015; 7(3): 49.

Souri J., Dehghani H., Sabaghpour SH. Study pea (*Pisum sativum* L.) genotypes in water stress condition. Iranian Journal of Agricultural Sciences 2005; 36(6): 1517-1527.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1752-1767, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1752-1767, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Kırmızı Et Tüketimini Etkileyen Faktörler: Üniversite Öğrencilerinin Tüketim Tercihleri

Derya İlkay YILMAZ[1*], Serdar Çağan GÜN[2], Umut BİLGİN[3]

[1,2,3]Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, 59030, Tekirdağ

[1]https://orcid.org/0000-0003-0273-3323
[2]https://orcid.org/0009-0002-1036-0520
[3]https://orcid.org/0009-0002-2651-9807
*Sorumlu yazar: deryailkay@nku.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 26.02.2025
Kabul tarihi:28.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Gıda güvenliği
Beslenme alışkanlığı
Tüketici davranışları

ÖZ

Bu çalışma; Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi öğrencilerinin kırmızı et tüketim tercihlerini ve tercihlerini etkileyen faktörleri incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada; öğrencilerin kırmızı et tüketim miktarları, satın alma tercihleri ve tercihleri etkileyen faktörler değerlendirilmiş olup bu faktörlerin demografik değişkenlerle ilişkisi analiz edilmiştir. 229 öğrenci ile yüz yüze yapılan anket çalışmasında En İyi-En Kötü Analizi ile Faktör Analizi yöntemleri kullanılarak öğrencilerin kırmızı et tüketim tercihleri değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; öğrencilerin kırmızı et tüketiminde en önemli motivasyon kaynağı lezzet olurken, fiyat yüksekliği en büyük sınırlayıcı faktör olarak belirlenmiştir. Ayrıca, öğrencilerin büyük bir kısmının kırmızı eti kasaplardan satın almayı tercih ettiği, hijyen ve güvenilirlik konularının satın alma kararlarında önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Gelir düzeyi arttıkça kırmızı et tüketim miktarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Üniversite yemekhanelerinde kırmızı et içeren ekonomik menülerin sunulması, yerel üreticilerle iş birliği yapılarak uygun fiyatlı ve güvenilir kırmızı et temininin sağlanması önerilmektedir. Bununla birlikte kırmızı et üretimi ve tüketimi konusunda sağlık ve çevresel sürdürülebilirlik konularına yönelik farkındalığı artırmak amacıyla bilgilendirme kampanyaları düzenlenmelidir. Bu çalışma, üniversite öğrencilerinin kırmızı et tüketim alışkanlıklarını daha iyi anlamaya yönelik bölgesel ve özgün bir perspektif sunmaktadır.

Factors Affecting Red Meat Consumption: University Students' Consumption Preferences

Research Article

Article History:
Received: 26.02.2025
Accepted: 28.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Food safety
Dietary habits
Consumer behavior

ABSTRACT

This study aims to examine the red meat consumption preferences of students at Tekirdağ Namık Kemal University Faculty of Agriculture and the factors influencing these preferences. The study evaluates students' red meat consumption quantities, purchasing preferences, and the factors affecting these preferences, analyzing their relationship with demographic variables. A face-to-face survey was conducted with 229 students, and their red meat consumption preferences were assessed using the Best-Worst Analysis and Factor Analysis methods. According to the analysis results, the most significant motivation for red meat consumption among students is taste, while the high price of red meat is identified as the biggest limiting factor. Additionally, it was determined that a majority of students prefer to purchase red meat from butchers, with hygiene and reliability playing a crucial role in their purchasing decisions. It was also observed that the amount of red meat consumption increases as income levels rise. To promote red meat consumption among university students, it is recommended to offer affordable

meal options containing red meat in university cafeterias and to collaborate with local producers to ensure the supply of reasonably priced and reliable red meat. Furthermore, awareness campaigns should be organized to enhance students' knowledge about health and environmental sustainability concerning red meat production and consumption. This study provides a regional and unique perspective for a better understanding of university students' red meat consumption habits.

To Cite: Yılmaz Dİ., Gün SÇ., Bilgin U. Kırmızı Et Tüketimini Etkileyen Faktörler: Üniversite Öğrencilerinin Tüketim Tercihleri. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1752-1767.

1. Giriş

Günümüzde beslenme; bireylerin hem sağlıklı yaşam sürdürmesi hem de gelecek nesillerin gelişimi açısından temel bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda hayvansal kaynaklı proteinler özellikle kırmızı et zengin amino asit içeriği ve doyuruculuğu nedeniyle beslenmede kritik bir rol oynamaktadır (Kaygısız ve ark., 2021). Kırmızı et tüketimi; yalnızca bireysel sağlık açısından değil, aynı zamanda ülkelerin ekonomik refah ve kültürel yapılarının bir göstergesi olarak da değerlendirilmektedir (Kızıloğlu ve Kızıloğlu, 2013).

Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Teşkilatı'nın (OECD) verilerine göre 2023 yılında dünya kırmızı et tüketimi ortalama 22,8 kg/kişi olarak gerçekleşmiştir (OECD, 2025). En fazla kırmızı et tüketen ülkeler sırasıyla; Avustralya (49,4 kg/kişi), Arjantin (47,2 kg/kişi) ve Amerika Birleşik Devletleri (46,1 kg/kişi) olmuştur. Türkiye'nin 2023 yılında ortalama kırmızı et tüketimi 16,4 kg/kişi olarak gerçekleşmiştir (OECD, 2025).

Türkiye'de kırmızı et tüketiminin düşük olmasının temel nedenleri arasında; ekonomik, kültürel ve yapısal faktörler yer almaktadır. Ekonomik açıdan, kırmızı etin yüksek üretim maliyetleri ve dolayısıyla yüksek satış fiyatları, özellikle düşük gelir grubuna sahip tüketiciler için erişilebilirliği sınırlamaktadır (Gürbüz ve ark., 2023). Bu durum, bireylerin bütçe kısıtlamaları nedeniyle alternatif protein kaynaklarına yönelmelerine yol açmaktadır. Ayrıca, gıda güvenliği ve hijyen konularındaki zaman zaman yaşanan endişeler, kırmızı etin tercih edilmemesinde etkili olabilmektedir (Kızıloğlu ve Kızıloğlu, 2013). Kültürel açıdan ise, geleneksel beslenme alışkanlıkları, bölgesel farklılıklar ve tüketicilerin sağlık bilinci kırmızı et tüketimi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Karakuş ve ark., 2008). Bu unsurlar, Türkiye'de kırmızı et tüketiminde, özellikle gelişmiş ülkelerle karşılaştırıldığında daha düşük olmasına neden olmaktadır.

Tüketicilerin kırmızı et tüketim alışkanlıklarının incelendiği çalışmalar; tüketicilerin kırmızı et tüketim tercihlerinde sosyoekonomik ve kültürel etmenlerin etkili olduğunu göstermektedir (Yaylak ve ark., 2010; Akçay ve Vatansever, 2013; Onurlubaş ve ark., 2018; Yüzbaşıoğlu ve ark., 2018; Soro ve Gültekin, 2020; Momin, 2021; Örük, 2021; Palamutoğlu ve ark., 2022; Acıbuca ve Kaya, 2023; Gürbüz ve ark., 2023). Edirne ve Tekirdağ örneklerinde ise tüketim miktarı, satın alma sıklığı ve tercih edilen satış kanalları gibi parametreler detaylı olarak ele alınmış; özellikle fiyat artışları ve gelir düzeylerinin tüketim davranışları üzerindeki etkisi vurgulanmıştır (Meço İlhan, 2011; Lorcu ve Bolat, 2012; Yılmaz ve ark., 2012).

Yetersiz ve dengesiz beslenme üniversite öğrencilerinin sıklıkla yaşadığı problemler arasındadır. Öğrencilerin düzenli öğün tüketmek yerine öğün atlayıp, sandviç ve simit gibi aperatiflere yöneldiği; ekonomik kısıtlamalar ve kötü yurt koşullarının beslenmelerini olumsuz etkilediği, tüketimlerinin sadece karın doyurma amacı taşıdığı saptanmıştır (Onurlubaş ve ark., 2018).

Literatürde üniversite öğrencileri ile yapılmış kırmızı et tüketim araştırmaları sınırlı kalmıştır (Taşkın ve ark., 2020; Örük, 2021; Palamutoğlu ve ark., 2022). Tekirdağ ilinde, tüketicilere yönelik yapılan araştırmalar bulunurken (Meço İlhan, 2011; Yılmaz ve ark., 2012; Onurlubaş ve ark., 2018) üniversite öğrencilerinin kırmızı et tüketim alışkanlıklarının detaylı analizine rastlanmamıştır.

Çalışmanın temel amacı; Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi öğrencilerinin kırmızı et tüketim tercihlerini belirlemek ve bu tercihlerin demografik özelliklerle ilişkisini ortaya koymaktır. Tüketicilerin kırmızı et tüketim alışkanlıklarının belirlenmesi, sektöre pazarlama stratejilerinin geliştirilmesi ile pazardaki rekabet koşullarının doğru analiz edilebilmesi konusunda bilgi sağlarken, politika yapıcılar için de fiyat politikalarının belirlenmesine yönelik bilgiler sunması açısından önemlidir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada; Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi öğrencilerinden elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesinde toplamda 1436 öğrenci bulunmaktadır. Örnek hacminin belirlenmesinde oranlar için sınırlı ana kitle formülünden yararlanılmıştır (Newbold, 1995; Miran, 2002). Formülde %90 güven aralığı, %0,05 hata payı ve maksimum örnek hacmine ulaşabilmek için p=q=0,5 olarak alınmıştır.

$$n = \frac{N.p.q}{(N-1).\sigma_p^2 + p.q} \quad (1)$$

Örnekleme sonucunda Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi'nde tesadüfî olarak seçilen 229 öğrenci ile yüz yüze anket çalışması yapılmıştır.

2.1. En İyi En Kötü (Best Worst) Analizi

Öğrencilerin kırmızı et tüketme nedenleri ile kırmızı et satın alırken dikkat ettikleri faktörlerin belirlenmesinde En iyi–En kötü (Best-Worst) yönteminden yararlanılmıştır.

En İyi-En Kötü analizi, ilk kez Jordan Louviere ve arkadaşları tarafından 1987 yılında tanımlanan bir ayrık seçim modelidir (Louviere ve ark., 2015). En İyi-En Kötü analizi bireylere sunulan kriterler içerisinden en iyi ve en kötü (en önemli/en önemsiz, en çok dikkat edilen/en az dikkat edilen vb.) özellikleri seçmeleri istenerek öğelerin seçim frekansları elde edilerek yapılmaktadır. Louviere ve ark. (2015)'na göre, En İyi-En Kötü yöntemi, katılımcıların gösterilen setteki olası tüm öğe çiftlerini değerlendirdiğini ve tercih veya önem açısından maksimum farkı yansıtan çifti seçtiğini varsaymaktadır (Azak ve ark., 2016; Çiftçi, 2016). Bu nedenle En İyi-En Kötü yöntemi çiftli karşılaştırmalar yönteminin bir varyasyonu olarak düşünülebilir.

Çalışmada; öğrencilere kırmızı et tüketme nedenleri ile kırmızı et satın alırken dikkat ettikleri faktörler listelenmiş ve en önemli neden/faktör ile en az önemli nedeni/faktörü belirtmeleri istenmiştir. Elde edilen skorlar yardımıyla değerlendirmeler yapılmıştır.

2.2. Faktör Analizi

Çalışmada öğrencilerin kırmızı et tüketimi hakkında düşüncelerinin belirlenmesi amacıyla 11 adet yargıya 5'li likert ölçeği ile oluşturulmuş sorular yöneltilmiştir. Öğrencilerin kırmızı et tüketimiyle ilgili yargılara verdiği cevaplara önce güvenirlik analizi uygulanmış, daha sonra cevaplar faktör analizi ile incelenmiştir. Faktör analizi sonucunda elde edilen değişkenler daha az sayıda değişken grupları (faktörler) altında toplanmış ve isimlendirilmiştir.

Faktör analizi; çok sayıda değişken arasındaki ilişkilerden yola çıkarak, bu değişkenleri az sayıda bağımsız faktörde birleştirmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Faktör analizinin uygulanabilirliğini belirlemek için önce değişkenlerin kendi aralarındaki korelasyonlar incelenir (Nakip, 2003) ve Bartlett ile KMO testleri kullanılarak örneklem uygunluğu değerlendirilir (Hair ve ark., 1998; Akgül ve Çevik, 2003; Nakip, 2003). Faktör sayısının belirlenmesinde özdeğerler; serpilme diyagramı ve varyans oranı gibi yaklaşımlar benimsenebilir. Bu çalışmada faktör sayısının belirlenmesinde özdeğerler dikkate alınmıştır. Özdeğeri 1'in üzerinde olan değişken sayısı, faktör sayısını belirlemektedir. Faktörlerin daha kolay yorumlanmasını sağlamak amacıyla rotasyonlu faktör matrisi kullanılır. Son aşamada faktör yükü yüksek olan değişkenlerin konu/özellik ortaklığı gözetilerek elde edilen faktörlerin adlandırılması yapılır.

Güvenirlik Analizi sonucunda ölçeğin oldukça güvenilir (α =0,622) olduğu belirlendiğinden (Kalaycı, 2010) faktör analizi yapılarak öğrencilerin kırmızı et tüketimi ile yargıları ana başlıklar altında toplanarak verilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

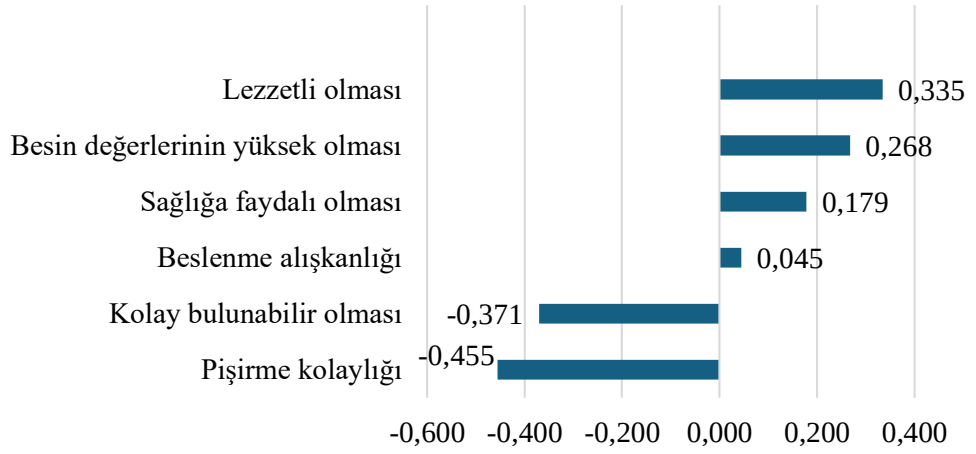
Öğrencilerin demografik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Öğrencilerin %47,60'ı kadındır ve önemli bir çoğunluğu (%89,08) 25 yaş altındadır. Ayrıca, öğrencilerin %92,14'ünün bekâr olduğu %88,21'inin ise herhangi bir işte çalışmadığı belirlenmiştir. Aylık gelir düzeyi bakımından öğrencilerin yaklaşık yarısının (%49,78) 10.000 TL ve altı gelire sahip olması, öğrencilerin büyük bir kısmının göreli olarak düşük gelir düzeyinde konumlandığını göstermektedir. Haftalık kırmızı et harcaması incelendiğinde, öğrencilerin %31,88'inin 250-500 TL, %24,02'sinin 100-250 TL, %24,02'sinin 500 TL ve üzeri düzeyde harcama yaptığı; geri kalan %20,09'unun ise 100 TL ve altında kaldığı anlaşılmaktadır. Buna ek olarak, katılımcıların %37,12'sinin öğrenci evinde, %27,51'inin aileyle birlikte ve %24,45'inin devlet yurdunda ikamet ettiği belirlenmiştir.

Tablo 1. Öğrencilerin demografik özellikleri

		Frekans	Yüzde (%)
Cinsiyet	Kadın	109	47,60
	Erkek	120	52,40
Yaş	25 yaş altı	204	89,08
	25-40 yaş	17	7,42
	40 ve üzeri	8	3,49
Medeni hal	Bekar	211	92,14
	Evli	18	7,86
Çalışma durumu	Çalışmıyor	202	88,21
	Part time	9	3,93
	Memur	11	4,80
	Özel sektör	7	3,06
Aylık gelir	10000 TL ve altı	114	49,78
	10000-20000 TL	59	25,76
	20000-30000 TL	19	8,30
	30000 TL ve üzeri	37	16,16
Haftalık kırmızı et harcaması	100 TL ve altı	46	20,09
	100-250 TL	55	24,02
	250-500 TL	73	31,88
	500 TL ve üzeri	55	24,02
Kaldığı yer	Özel yurt	25	10,92
	Devlet yurdu	56	24,45
	Öğrenci evi	85	37,12
	Aile ile yaşıyor	63	27,51

Öğrencilerinin %97,82'si kırmızı et tüketmektedir. Taşkın ve ark. (2020) Ege Üniversitesi öğrencilerinin %92,4'ünün, Palamutoğlu ve ark. (2022) Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi öğrencilerinin %87,1'inin kırmızı et tükettiğini tespit etmiştir. Çalışmada elde edilen oran, önceki çalışmalara kıyasla daha yüksek olup, Tekirdağ'daki öğrencilerin kırmızı et tüketim alışkanlığının oldukça yaygın olduğunu göstermektedir. Gaytancıoğlu (1999)'nun Tekirdağ'daki önceki çalışması da benzer şekilde yüksek bir oran (%95,9) göstermektedir.

En iyi en kötü yöntemi kullanılarak kırmızı et tüketen öğrencilerin tüketme nedenleri arasında en önemli neden lezzetli olması iken en önemsiz neden pişirme kolaylığı olarak belirlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Kırmızı et tüketen öğrencilerin tüketme nedenleri

Araştırma bulguları özellikle lezzet ve besin değeri faktörlerinin önemi açısından birçok çalışmayla paralellik göstermektedir (Karakuş ve ark., 2008; Yaylak ve ark., 2010, Lorcu ve Bolat, 2012; Kaygısız ve ark., 2021). Taşkın ve ark. (2020) tarafından yürütülen bir çalışmada da üniversite öğrencileri arasında kırmızı et tüketiminde lezzetin en belirleyici neden olduğunu, bunu besleyici özellik ve sağlıklı olma faktörlerinin takip ettiğini ortaya koymuştur. Akçay ve Vatansever (2013) besin değerini, Onurlubaş ve ark. (2018) ile Momin (2021) ise alışkanlık ve doyuruculuk gibi unsurların ön plana çıktığını belirtmişlerdir.

Kırmızı et tüketmeyen öğrencilerin tüketmeme nedenleri ise fiyatının yüksek olması (%40), kokusunu sevmeme (%40) ve tadını sevmeme (%20) olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar, kırmızı etin yüksek fiyatının, tüketimden kaçınmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Onurlubaş ve ark., 2018; Kaygısız ve ark., 2021). Bu bulgu, düşük gelirli bireylerin veya ekonomik sıkıntıların yaşandığı bölgelerde kırmızı etin erişilebilirliğinin kısıtlı olduğunu düşündürmektedir. Sağlık endişeleri, özellikle kolesterol ve kalp hastalıkları gibi sorunlar da bireylerin kırmızı et tüketiminden kaçınmasına neden olmaktadır (Kaygısız ve ark., 2021). Beslenme alışkanlıkları, vejetaryenlik gibi tercihler de kırmızı et tüketmeme nedenleri arasında yer almaktadır (Onurlubaş ve ark., 2018; Taşkın ve ark., 2020). Bazı bireyler ise kırmızı etin tadını veya kokusunu sevmedikleri için tüketmekten kaçınmaktadır (Onurlubaş ve ark., 2018). Ege Üniversitesi öğrencileri üzerinde yapılan bir çalışmada, beslenme alışkanlığı ve gelir düzeyinin tüketmeme nedenleri arasında ön sıralarda yer aldığı belirlenmiştir (Taşkın ve ark., 2020). Dicle Üniversitesi öğrencileri ile yapılan çalışmada ise kırmızı etin az tüketilmesinin nedenleri arasında fiyat %63,9 ile ilk sırada yer almıştır (Demirel ve ark., 2023).

Kırmızı et tüketimi ve bu tüketimin yeterliliği algısı, bireylerin beslenme alışkanlıkları ve sağlık bilinçleri açısından önemli bir konudur. Çalışmada kırmızı et tüketen öğrencilerin %39,29'u yeterli miktarda tükettiğini düşünürken, %34,38'i tüketiminin yetersiz olduğunu belirtmektedir. Yeterli miktarda kırmızı et tükettiğini düşünmeyen öğrencilerin %51,53'ü kırmızı et tüketimine alternatif besin aradıklarını belirtmişlerdir. Kırmızı et alternatifi olarak öğrencilerin %78,81'i kanatlı etini, %11,86'sı

bakliyatı ve %9,32'si balık ve deniz ürünlerini tercih ederken yapay et ve soya kıyması gibi alternatif et ürünlerini tercih eden öğrencilere rastlanmamıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Öğrencilerin kırmızı et tüketimine alternatif olarak tükettiği besinler

Alternatif	Sayı*	%
Kanatlı eti (hindi, tavuk vb.)	93	78,81
Bakliyat	14	11,87
Balık ve deniz ürünleri	11	9,32
Et alternatifleri (yapay et, soya kıyması vb.)	0	0,00
Toplam	118	100,00

*Tabloda kırmızı et tüketimine alternatif arayan öğrencilerin yanıtları verilmiştir.

Kırmızı et tüketim sıklığı, beslenme alışkanlıklarını ve tüketim kalıplarını anlamak için önemli bir göstergedir. Çalışmada öğrencilerin %58,04'ünün haftada 1-3 gün, %16,52'sinin ayda 1 ve %11,61'inin haftada 4-6 gün et tükettiği belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Öğrencilerin kırmızı et tüketim sıklıkları

Et Tüketim Sıklığı	Sayı	%
Haftada 1-3	130	58,04
Ayda 1	37	16,52
Haftada 4-6	26	11,61
Ayda 2-4	23	10,27
Her gün	4	1,79
Yılda 1-3	4	1,79
Toplam	224	100,00

Taşkın ve ark. (2020) Ege Üniversitesi öğrencilerinde kırmızı et tüketiminin haftalık %55,1 olduğunu bildirirken, Yılmaz ve ark. (2012) Tekirdağ'da katılımcıların %43,1'inin haftada bir, %24,6'sının ise haftada iki kez tükettiğini ortaya koymuştur. Meço İlhan (2011) ise Tekirdağ'da, katılımcıların %40,4'ünün haftada 1-3, %25,3'ünün ise ayda 1-3 defa tükettiğini belirtmiştir. Öğrencilik döneminde bütçe kısıtlamaları, zaman yönetimi ve sosyal etkileşimler gibi faktörlerin beslenme tercihlerinde etkili olması, tüketim sıklığında bazı farklılıklar yaratabilmektedir. Erkek öğrencilerin haftalık tüketimi daha yüksek oranda bulunmuştur ($\chi^2 = 16,21$; $p = 0,013<0,05$). Ancak, yaş, gelir düzeyi ve aile kökeni gibi demografik faktörlerin tüketim sıklığı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri tespit edilememiştir. Çalışmada kişi başı ortalama kırmızı et tüketimi 1,12 kg/ay olarak hesaplanmıştır. Ortalama kırmızı et tüketimi Siirt Üniversitesi öğrencilerinde 1,14 kg/ay (Örük, 2021) olarak belirlenmiştir. Gaytancıoğlu (1999)'nun çalışmasında ise kırmızı et tüketimi 1,3 kg/ay ile benzer bir düzeyde yer almaktadır. Ortalama kişi başı kırmızı et tüketim miktarı bölgesel farklılıklar göstermektedir. Lorcu ve Bolat (2012) Edirne'de kişi başı kırmızı et tüketimini 0,68/ay kg olarak bildirirken, Akçay ve Vatansever (2013) Kocaeli'de 0,87 kg/ay olarak tespit etmiştir. Buna karşın, Tapkı ve Demetgül (2021) Hatay'da 3,7 kg/ay, Kaygısız ve ark. (2021) Mersin'de 3-4 kg/ay arasında değiştiğini belirtmiştir. Bu veriler, kırmızı et tüketiminin coğrafi ve kültürel etkenlere bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Bulgulara göre hem yöresel beslenme alışkanlıkları hem de öğrencilik dönemine özgü ekonomik ve yaşam tarzı etmenlerinin, kırmızı et tüketim kalıplarında belirleyici rol oynadığı söylenebilir.

Öğrencilerin kırmızı et tüketim miktarının gelir düzeyi ($p=0,015<0,05$) ve cinsiyete ($p= 0,001<0,05$) göre anlamlı farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Gelir düzeyi arttıkça ortalama tüketim miktarının yükseldiği, kadınların aylık ortalama tüketiminin 0,89 kg, erkeklerin ise 1,34 kg olduğu saptanmıştır. Buna karşın, yaş grubu ($p = 0,333>0,05$) ve aile kökeni ($p = 0,116>0,05$) açısından anlamlı bir fark gözlenmemiştir.

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde kırmızı et gibi gıdaların gelir esnekliği yüksektir ve gelir değişimlerine tepki gösterdikleri bilinmektedir (Akçay ve Vatansever, 2013). Örük (2021) Siirt Üniversitesi öğrencileri arasında aile gelirinin artmasıyla tüketim miktarının yükseldiğini belirtirken, Gaytancıoğlu (1999) Tekirdağ verilerinde eğitim ve gelir düzeylerinin artmasıyla et tüketiminin arttığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Yılmaz ve ark. (2012), Lorcu ve Bolat (2012), Akçay ve Vatansever (2013) ve Soro ve Gültekin (2020), sosyoekonomik göstergelerden özellikle gelir ve eğitimin kırmızı et tüketimini belirlemede önemli rol oynadığını göstermiştir. Araştırma bulguları, öğrencilerin kırmızı et tüketim kalıplarının hem ekonomik faktörlerin hem de cinsiyet farklılıklarının etkisi altında şekillendiğini ve genel olarak sosyoekonomik özelliklerden gelir ve eğitimin tüketim davranışları üzerinde belirleyici rol oynadığını desteklemektedir.

Öğrencilerin kırmızı et satın alma yeri tercihleri içerisinde en yüksek payı kasaplar almaktadır (Tablo 4). Öğrencilerin %53,57'si kırmızı eti kasaptan satın almayı tercih ettiğini belirtirken, %20,09'u zincir marketleri tercih ettiğini ifade etmiştir. Bu sonuçlar, öğrencilerin çoğunluğunun kasapları tercih ettiğini, ancak marketlerin de önemli bir alternatif olduğunu göstermektedir. Üniversite öğrencileri arasında kırmızı et satın alma tercihleri incelendiğinde, kasapların öne çıktığı görülmektedir (Taşkın ve ark., 2020; Palamutoğlu ve ark., 2022; Demirel ve ark., 2023).

Tablo 4. Öğrencilerin kırmızı et satın aldıkları yerler

Satın alma yeri	Sayı	%
Kasap	120	53,57
Zincir market	45	20,09
Farketmez	42	18,75
Üretici	17	7,59
Toplam	224	100,00

Tekirdağ'da yapılan çalışmalar, kırmızı et satın alma tercihlerinde en çok kasapların tercih edildiğini göstermektedir (Meço İlhan, 2011; Yılmaz ve ark., 2012). Türkiye genelinde yapılan diğer çalışmalar da (Karakuş ve ark., 2008; Yaylak ve ark., 2010; Lorcu ve Bolat, 2012; Onurlubaş ve ark., 2018; Kaygısız ve ark., 2021; Momin, 2021; Acıbuca ve Kaya, 2023) kasapların hâlâ en çok tercih edilen satın alma kanalı olduğunu, ancak market ve süpermarketlerin de güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Kırmızı et satın alma yeri ile gelir düzeyi (χ^2=4,31; p=0,889), cinsiyet (χ^2=2,97; p=0,396), yaş grubu (χ^2=5,02; p=0,541) ve aile kökeni (χ^2=28,47; p=0,127) demografik değişkenleri arasında anlamlı bir farklılık bulunamamıştır. Bu sonuç, üniversite öğrencilerinin satın alma tercihlerini belirlemede söz konusu demografik faktörlerin etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

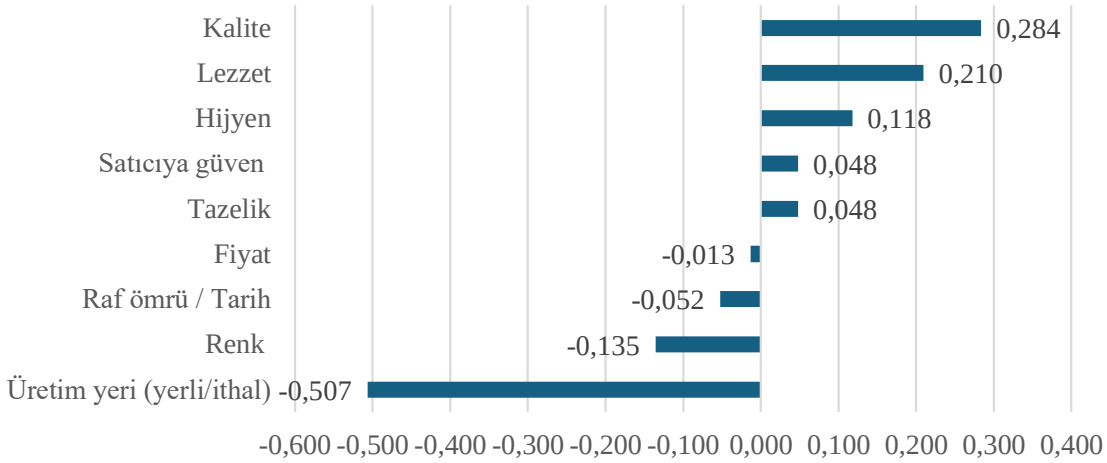
Öğrencilerin yarısından fazlasının (%54,46) kırmızı et satın alma yerlerini tercih ederken en çok güvenilirliği ön plana aldıkları belirlenmiştir (Tablo 5). Bu bulgu, gıda güvenliği, hijyen ve kaliteye duyulan inancın satın alma kararlarını şekillendirdiğini göstermektedir. Etin tazeliği (%15,63) ikinci en önemli faktör olarak öne çıkarken, lezzet (%8,93), ucuzluk (%6,25) ve alışkanlık (%4,91) gibi unsurlar da tercihleri etkilemektedir.

Tablo 5. Öğrencilerin kırmızı et satın alma yeri tercihinde etkili olan faktörler

Gerekçe	Sayı	%
Güvenilirlik	122	54,46
Tazelik	35	15,63
Lezzet	20	8,93
Ucuzluk	14	6,25
Alışkanlık	11	4,91
Temizlik	7	3,13
Çeşit fazlalığı	6	2,68
Kolay ulaşım	5	2,23
Kampanyalar	4	1,79
Toplam	224	100,00

Bulgular önceki çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Taşkın ve ark. (2020) Ege Üniversitesi öğrencileri arasında, hijyen (%82,6), tazelik (%82,3) ve temizlik (%81,8) gibi özelliklerin belirleyici olduğunu belirtmiştir. Kaygısız ve ark. (2021) ilk neden olarak satın alma yerinin güvenilirliğini (%71,1) vurgulamaktadır. Onurlubaş ve ark. (2018) güvenilirliği, kaliteyi, tazeliği, ucuzluğu ve alışkanlığı sırasıyla önemli bulmuştur. Bu çalışmalar, güvenilirlik, tazelik, hijyen ve kalite gibi faktörlerin kırmızı et satın alma yerlerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Öğrencilerin güvenilirliğe verdiği önem, gıda güvenliği konusundaki artan bilinç düzeyine işaret etmektedir.

Üniversite öğrencilerinin kırmızı et satın alırken dikkat ettikleri en önemli kriterlerin sırasıyla kalite, lezzet ve hijyen olduğu; üretim yerinin ise (ithal/yerli) en az önemli unsur olarak değerlendirildiği görülmüştür (Şekil 2). Öğrencilerin kalite, lezzet, hijyen ve tazelik gibi kriterlere öncelik vermesi, bu yaş grubunun sağlıklı ve güvenli gıda tüketimi konusundaki bilinç düzeyini yansıtabilir.



Şekil 2. Öğrencilerin kırmızı et satın alırken dikkat ettikleri kriterler

Taşkın ve ark. (2020) Ege Üniversitesi öğrencileri arasında tazelik (%87,5) ve hijyen (%66,9) gibi kriterlerin ön planda olduğu vurgulanırken, Meço İlhan (2011) Tekirdağ ilinde tüketicilerin kırmızı et seçiminde öncelikle tazeliğe önem verdiklerini, ardından fiyat, satıcı güveni, üretim yeri ve yağsızlık gibi faktörleri değerlendirdiklerini ortaya koymuştur. Türkiye'nin farklı bölgelerindeki çalışmalar da tüketici tercihleri açısından çeşitlilik göstermektedir. Sivas'ta kalite, fiyat ve markaya (Yüzbaşıoğlu ve ark., 2018) odaklanılırken, İzmir'de tazelik ve yağsızlık ön plana çıkmıştır (Yaylak ve ark., 2010). Kaygısız ve ark. (2021) ile Acıbuca ve Kaya (2023) satın alma yerinin hijyenik ve güvenilir olmasına dikkat çekmiş, Tapkı ve Demetgül (2021) ise Hatay'da tazelik, satış yeri ve fiyatı öne çıkan özellikler olarak belirtmiştir. Bu bulgular, gıda güvenliği ve kalite gibi kriterlerin önemini korurken, bölgesel ve demografik farklılıkların kırmızı et satın alma tercihlerini şekillendirdiğini göstermektedir.

Çalışmada kadınların hijyen ve kaliteye, erkeklerin ise fiyat ve lezzete daha fazla önem verme eğiliminde oldukları belirlenmiştir (χ^2=13,93; p=0,084<0,10). Kırmızı et satın alırken dikkate alınan kriterler ile yaş grubu açısından da anlamlı farklılıklar gözlemlenmiştir (χ^2=29,62; p=0,02). Genç öğrenciler (18-25) kalite ve lezzeti en önemli kriter olarak görürken, orta yaş grubundakiler (26-40) daha çok lezzet ve hijyen faktörüne odaklanmaktadır. 41 yaş ve üzerindeki bireyler ise satıcıya duyulan güveni en belirleyici unsur olarak değerlendirmektedir. Buna karşın, gelir grubu (χ^2=26,57; p=0,325) ve aile kökeni (χ^2=54,32; p=0,539) ile satın alma sırasında dikkate alınan faktörler arasında farklılık bulunmamıştır.

Öğrencilerin %53,57'si bir önceki yıla göre kırmızı et tüketim miktarlarında azalma olduğunu belirtirken, %43,75'i tüketim miktarının değişmediğini, %2,68'i tüketim miktarında artış olduğunu belirtmiştir. Tüketimdeki azalmanın en büyük nedeni olarak, öğrencilerin %67,50'si fiyat artışlarını göstermiş; diğer nedenler arasında gelirde azalma (%15,83) ve beslenme alışkanlıklarındaki değişim (%7,50) yer almıştır (Tablo 6). Benzer şekilde, Ege Üniversitesi öğrencilerini de %56,4 oranında tüketimde azalma bildirirken, %31,3'ü tüketiminin değişmediğini ifade etmiştir (Taşkın ve ark., 2020). Her iki çalışmada da kırmızı et tüketimindeki düşüşün temel nedeninin fiyat artışları olduğu

vurgulanmıştır; bu durum, öğrencilerin sınırlı bütçeleri nedeniyle fiyat artışlarına karşı duyarlı olduklarını göstermektedir.

Tablo 6. Önceki yıla göre kırmızı et tüketiminin azalma nedenleri

Tüketim azalma nedeni	Sayı	%
Fiyatlar önceki yıla göre arttı	81	67,50
Gelirim önceki yıla göre azaldı	19	15,83
Beslenme alışkanlığım değişti	9	7,50
Diğer	5	4,17
Kırmızı etin kalitesine güvenmiyorum	3	2,50
Sağlık nedenleriyle tüketimim değişti	2	1,67
Kırmızı et temin yerlerine güvenmiyorum	1	0,83
Toplam	120	100,00

Tekirdağ ilinde yapılan çalışmalarda Meço İlhan (2011) son bir yılda kırmızı et tüketiminin %32 oranında azaldığını, Yılmaz ve ark. (2012) ise son beş yılda tüketimin %62,6 oranında düştüğünü ve bu azalmanın ekonomik nedenlerden (%57,9), medya haberlerinden (%28,1) ve sağlık faktörlerinden (%14) kaynaklandığını belirtmiştir. Türkiye genelindeki çalışmalarda da (Yaylak ve ark., 2010; Özyürek ve ark., 2019; Soro ve Gültekin, 2020; Kaygısız ve ark., 2021; Acıbuca ve Kaya, 2023) kırmızı et tüketiminde genel bir azalma eğilimi olduğu ve fiyat artışları, gelir yetersizliği, ekonomik kriz, medya etkileri, sağlık sorunları ile hijyen ve güvenilirlik endişelerinin temel nedenler arasında yer aldığı belirtilmiştir. Bu bulgular hem öğrenciler hem de genel tüketici kitlesi arasında kırmızı et tüketiminin bir önceki yıla göre azaldığını, bunun ise ağırlıklı olarak fiyat artışlarının ve ekonomik faktörlerin etkisiyle gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Faktör analizi sonucunda KMO değeri 0,637 olarak hesaplanmıştır. Bu değer veri setinin faktör analizi için orta derecede uygun olduğunu göstermektedir. Bartlett testi sonucunun ($p=0,000<0,05$) anlamlı olduğu ve faktör analizi için yüksek korelasyon bulunduğu görülmektedir. Çalışmada faktör sayısının belirlenmesinde öz değerler dikkate alınmıştır. Öz değeri 1'den yüksek olan 4 faktör belirlenmiştir. Dönüşümlü faktör matrisi sonuçlarına göre elde edilen 4 faktör toplam varyansın %60,153'ünü açıklamaktadır (Tablo 7).

Faktör yükleri, her bir faktör için hesaplanmakta ve o faktör ile değişken arasındaki korelasyonu ifade etmektedir. Bu çalışmada en düşük faktör yükü 0,40 olarak kabul edilmiştir (Hair ve ark., 1998). Dönüşümlü faktör yüklerinden faydalanılarak faktörlerdeki maddelerin taşıdıkları anlam dikkate alınarak elde edilen boyutlara sırasıyla; fiyat, sağlık ve çevresel endişeler, tüketim tercihleri ve güvenlik isimleri verilmiştir.

Öğrencilerin kırmızı et tüketim tercihlerinde en önemli özellik "Fiyat" olarak belirlenmiştir ve bu faktör toplam varyansın %19,984'ünü açıklamaktadır. İkinci faktör varyansın %15,796'sını açıklayan "Sağlık ve çevresel endişeler", üçüncü faktör toplam varyansın %14,063'ünü açıklayan "Tüketim tercihleri" ve dördüncü faktör toplam varyansın %10,311'ini açıklayan "Güvenlik" olarak belirlenmiştir.

Fiyat, tüketim miktarını ve tercih edilen et türlerini belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır. İthal etin yerli ete göre daha düşük fiyatlı olması durumunda öğrenciler ithal ete yöneleceklerini belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek fiyatların öğrencilerin kıyma gibi ekonomik seçeneklere veya beyaz ete yönelimlerini arttıracağı belirtilmiştir.

Tablo 7. Öğrencilerin kırmızı et tüketim tercihlerinin faktör analizi sonuçları

	Faktör Yük Değerleri				Özdeğer	Varyans açıklama oranı
	Fiyat	Sağlık ve çevresel endişeler	Tüketim tercihleri	Güvenlik		
Fiyatı uygun olursa ithal et tüketirim	0,770				2,198	19,984
Fiyat, tüketeceğim kırmızı et çeşidini (kıyma, parça et vb.) etkiler	0,699					
Beyaz et fiyatındaki indirimler kırmızı et tüketimimi azaltır	0,689					
Fiyatı düşerse kırmızı et tüketim miktarımı artırırım	0,641					
Kırmızı et tüketimi sağlık sorunlarına yol açar		0,892			1,738	15,796
Kırmızı et üretimi çevresel sorunlara (sera gazı salınımı, vb.) neden olur		0,777				
Kırmızı et alırken yerli olmasını önemsiyorum			0,742		1,547	14,063
Kırmız et alırken ambalajlı ürünleri almayı tercih ediyorum			0,697			
Alternatif yöntemlerle elde edilmiş kırmızı eti (laboratuvar ortamında et üretimi vb.) tüketebilirim.			0,453			
Kırmızı et ile ilgili hijyen ve sağlık kontrolleri yeterlidir				0,659	1,134	10,311
Kırmızı et tüketimi ve üretimi konusunda etik (beslenme şartları, kesim şekli vb.) standartlar önemlidir				0,656		

Sağlık ve çevresel endişeler faktörü, öğrencilerin hem bireysel sağlıklarını hem de çevresel sürdürülebilirliği göz önünde bulundurarak kırmızı et tüketimlerini şekillendirdiğini göstermektedir. Öğrenciler arasında kırmızı etin sağlık açısından olumsuz etkiler yaratabileceği yönünde güçlü bir algının bulunduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, kırmızı et üretiminin çevresel etkileri de özellikle genç ve eğitimli tüketiciler açısından bir endişe kaynağıdır.

Tüketim tercihleri faktörü, öğrencilerin kırmızı etin kaynağı, üretim yöntemi ve işleme şekline duyarlı olduğunu göstermektedir. Yerli üretim kırmızı etin tercih edilmesi, yerli üretimin daha güvenilir ve sağlıklı olduğu yönündeki inançla açıklanabilir. Öğrencilerin ambalajlı ürünleri tercih etmesi, hijyen ve güvenlik açısından önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Ambalajlı kırmızı et ürünleri, üretim süreçlerinin daha kontrollü olması ve sağlık risklerinin minimize edilmesi nedeniyle tercih edildiği düşünülmektedir. Laboratuvar ortamında üretilen kırmızı ete yönelik ilgi ise henüz düşük olup, bu

durum yeni üretim teknolojilerine yönelik bilgi eksikliği veya geleneksel tüketim alışkanlıklarının devamı ile açıklanabilir.

Güvenlik faktörü, öğrencilerin kırmızı et satın alırken hijyenik üretim koşullarına, sağlık kontrollerinin etkinliğine ve etik standartlara önem verdiklerini belirtmektedir. Öğrencilerin kırmızı et tüketiminde hijyen ve sağlık kontrollerinin yeterli olup olmadığına dair inançları önemli bir rol oynamaktadır. Sağlık denetimlerinin şeffaf bir şekilde yürütülmesi ve tüketicilere güven verici bilgiler sunulması, kırmızı et tüketimi açısından önemli bir unsur olarak değerlendirilmelidir. Öğrencilerin kırmızı et üretimi ve tüketimiyle ilgili etik standartlara duyarlılığı da önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır. Hayvanların yetiştirilme koşulları, beslenme süreçleri ve kesim yöntemleri gibi unsurlar, öğrenciler tarafından değerlendirilmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi öğrencilerinin kırmızı et tüketim alışkanlıkları incelenerek, tüketim sıklığı, satın alma tercihleri ve tüketimi etkileyen faktörler belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, öğrencilerin kırmızı et tüketimini büyük ölçüde ekonomik koşulların şekillendirdiğini göstermektedir. Yüksek fiyatlar nedeniyle tüketim sıklığının azaldığı, öğrencilerin bir kısmının haftada bir veya daha az kırmızı et tükettiği ve alternatif protein kaynaklarına yöneldiği belirlenmiştir. Kırmızı et satın alma tercihleri açısından süpermarketler ve kasaplar en yaygın alışveriş noktaları olurken, hijyen ve gıda güvenliği konusundaki endişeler tüketicilerin tercihlerini şekillendiren önemli faktörler arasında yer almıştır.

Öğrencilerin kırmızı ete erişimini artırmak ve sağlıklı beslenme alışkanlıklarını desteklemek amacıyla çeşitli önlemlerin alınması gerekmektedir. Öncelikle, üniversite bünyesinde uygun fiyatlı kırmızı et içeren menüler oluşturularak, kırmızı etin daha erişilebilir hale getirilmesi sağlanmalıdır. Bunun yanı sıra, üretici birlikleri ve kooperatiflerle iş birliği yapılarak öğrencilerin daha uygun fiyatlarla sağlıklı ve güvenilir et tüketmesi desteklenebilir. Kampüs içerisinde yerel üreticilerin doğrudan satış yapabileceği alanların oluşturulması, hem öğrencilerin ekonomik olarak kırmızı ete erişimini kolaylaştıracak hem de yerel üreticilerin ekonomik olarak kazanç sağlamasını sağlayacaktır. Fiyat faktörünün kırmızı et tüketimi üzerindeki belirleyici etkisi göz önünde bulundurulduğunda, düşük gelir gruplarının kırmızı ete erişimini artırmaya yönelik sosyal destek politikaları, tüketicilerin beslenme tercihlerinde olumlu değişiklikler yaratabilir.

Öğrencilerin bireysel sağlıklarını ve çevresel sürdürülebilirliği dikkate alarak kırmızı et tüketim tercihlerini şekillendirdiği görülmüştür. Bu doğrultuda, kırmızı etin sağlıklı bir diyetin parçası olarak nasıl tüketilmesi gerektiğine dair farkındalık yaratmak amacıyla bilgilendirme kampanyaları düzenlenmelidir. Aynı zamanda, sürdürülebilir hayvancılık uygulamalarının yaygınlaştırılması, sera gazı salınımı ve su tüketimini azaltan çevre dostu üretim tekniklerinin desteklenmesi, çevresel duyarlılığı yüksek öğrenciler için önemli bir kriter olacaktır.

Marketlerde ve kasaplarda ambalajlı et seçeneklerinin artırılması, açık et satışlarında hijyen ve denetim kurallarının sıkılaştırılması, öğrencilerin güvenli ve sağlıklı ürünlere erişimini kolaylaştıracaktır. Ayrıca, laboratuvar ortamında üretilen et gibi alternatif üretim yöntemlerine yönelik algının geliştirilmesi amacıyla şeffaf bilgilendirme ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Üniversite öğrencileri gibi genç tüketicilerin beklentilerine uygun ürün çeşitliliğinin artırılması, pazar stratejilerinin yeniden şekillendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Gıda güvenliği konusundaki endişelerin giderilmesi için mevcut gıda güvenliği standartlarının daha sıkı denetlenmesi ve bu denetim süreçlerine ilişkin bilgilerin tüketicilere şeffaf bir biçimde sunulması sağlanmalıdır. Gıda denetim raporları ve kalite kontrol süreçlerinin kamuoyuyla paylaşılması, tüketici güvenini artıracaktır. Aynı zamanda, hayvan refahını ön planda tutan yetiştirme uygulamalarının teşvik edilmesi, organik ve serbest dolaşım sertifikalarının yaygınlaştırılması, tüketicilerin bilinçli tercih yapmalarına katkı sağlayacaktır. Gıda güvenliği, et üretim süreçleri ve hijyen standartları hakkında düzenlenecek bilgilendirici kampanyalar ve medya çalışmaları, tüketici bilincini artırarak gıda güvenliği konusundaki doğru bilginin yaygınlaştırılmasını destekleyecektir.

Bulgular, öğrencilerin kırmızı ete erişimini artırmak için ekonomik ve yapısal iyileştirmelere ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Öğrencilerin sağlıklı beslenmelerini desteklemek adına ekonomik olarak erişilebilir, hijyenik ve güvenilir kırmızı et tedarik zincirlerinin oluşturulması, eğitim programlarının genişletilmesi ve yerel üreticilerle iş birliklerinin artırılması gerekmektedir. Bu çerçevede atılacak adımlar, öğrencilerin yeterli ve dengeli beslenmesini sağlayarak hem bireysel sağlık hem de genel beslenme politikaları açısından önemli kazanımlar sunacaktır.

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: Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulunun T2024-2218 sayılı kararınca etik kurul kararı alınmıştır.

Kaynakça

Acıbuca V., Kaya A. Mardin ili Artuklu ilçesinde tüketicilerin kırmızı et tüketim tercihi ve alışkanlıkları. Çukurova Tarım Gıda Bilimleri Dergisi 2023; 38(2): 244-253.

Akçay Y., Vatansever Ö. Kırmızı et tüketimi üzerine bir araştırma: Kocaeli ili kentsel alan örneği. Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2013; 4(1): 43-60.

Akgül A., Çevik O. İstatistiksel analiz teknikleri. Ankara: Emek Ofset 2003.

Azak Ş., Miran B., Günden C., Atış E., Sasalı E., Şimşek B. Alternatif üretim teknikleriyle üretilmiş domateste tüketicilerin dikkate aldığı özelliklerin karşılaştırmalı analizi, XII. Ulusal Tarım Ekonomisi Kongresi, 25-27 Mayıs 2016, sayfa no: 363-372, Isparta.

Çiftçi K. Çiftçi hedeflerine uygun optimum plan önerileri ve uygulanabilirliklerinin analizi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no: 114, İzmir, Türkiye 2016.

Demirel DŞ., Tatar AM., Demirel R. Üniversite öğrencilerinin hayvansal protein tüketim eğilimlerinin belirlenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(Ek Sayı): 355-371.

Gaytancıoğlu S. Tekirdağ Merkez ilçede kanatlı eti tüketim düzeyinin incelenmesi. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ, sayfa no: 27, Türkiye 1999.

Gürbüz İB., Er S., Kadağan Ö. Bursa ilinde tüketicilerin kırmızı et tüketim tercihlerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2023; 37(2): 365-386.

Hair JF., Anderson RE., Tahtam RL., Black WC. Multivariate data analysis. New Jersey: Prentice Hall 1998.

Kalaycı Ş. SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri. Ankara: Asil Yayın 2010.

Karakuş K., Aygün T., Alarslan E. Gaziantep ili Merkez ilçede kırmızı et tüketim alışkanlıkları. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi 2008; 18(2): 113-120.

Kaygısız A., Tatlıyer Tunaz A., Arslan O. Tüketicilerin kırmızı et tüketimi ve hayvan refahı konusundaki bilinç düzeylerinin araştırılması. Atatürk University Journal of Agricultural Faculty 2022; 53(1): 24-30.

Kızıloğlu S., Kızıloğlu R. Erzurum Merkez ilçede et ve ithal et tüketme durumunu inceleyen bir araştırma. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2013; 3(1): 61-68.

Lorcu F., Bolat BA. Edirne ilinde kırmızı et tüketim tercihlerinin incelenmesi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi 2012; 9(1): 71-85.

Louviere JJ., Flynn TN., Marley AAJ. Best-worst scaling: Theory, methods and applications. United Kingdom: Cambridge University Press 2015.

Meço İlhan G. Tekirdağ ilinde kırmızı et tüketim alışkanlıklarının analizi. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 62, Tekirdağ, Türkiye, 2011.

Miran B. Temel istatistik. İzmir: Ege Üniversitesi Basımevi 2002.

Momin Y. İstanbul ili Avrupa yakası halkının kırmızı et ve ürünleri tüketim alışkanlıkları ve bilincinin belirlenmesi. İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 84, İstanbul, Türkiye 2021.

Nakip M. Pazarlama araştırmaları, teknikler ve (SPSS destekli) uygulamalar. Ankara: Seçkin Yayıncılık 2003.

Newbold P. Statistics for business and economics. New Jersey: Prentice-Hall International 1995.

OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. Meat Consumption. https://www.oecd.org/en/data/indicators/meat-consumption.html?oecdcontrol-523be2d55c-var6=CPC_EX_BV%7CCPC_EX_SH%7CCPC_EX_PK. Erişim tarihi: 17.02.2025.

Onurlubaş E., Doğan HG., Gözener B. TR 21 bölgesinde tüketicilerin kırmızı et tüketimini etkileyen faktörlerin belirlenmesi. Sosyal Bilimler Dergisi 2018; 5(23): 159-174.

Örük G. Üniversite öğrencilerinin hayvansal ürün tüketim alışkanlıkları: Siirt Üniversitesi örneği. Hayvansal Üretim 2021; 62(2): 45-51.

Özyürek S., Çebi K., Türkyılmaz D., Esenbuğa N., Dağdelen Ü., Yaprak M. Erzincan ilinde kırmızı et tüketim alışkanlıkları ve tüketicilerin ithal kırmızı ete bakış açılarının değerlendirilmesi. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2019; 12(1): 263-273.

Palamutoğlu R., İnce Palamutoğlu M., Kantar AG., Çorapçı B., Kazak M., Kasnak C. Üniversite öğrencilerinin et tüketimi ve gıda neofobisinin değerlendirilmesi. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2022; 6(3): 144-153.

Soro NY., Gültekin U. Red meat consumption structure and consumer behavior in the urban area of Adana Province. Çukurova Tarım Gıda Bilimleri Dergisi 2020; 35(2):143-150.

Tapkı N., Demetgül Z. Hatay ili kentsel alanda tüketicilerin et ve et ürünleri tüketiminde satın alma tercihleri. Journal of Social and Humanities Sciences Research 2021; 8(72): 1779-1788.

Taşkın T., Engindeniz S., Gbadamonsi AA., Kandemir Ç., Koşum N. Gençlerin kırmızı et tüketim tercihlerinin analizi: Ege Üniversitesi öğrencileri örneği, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2020; 57(1): 63-71.

Yaylak E., Taşkın T., Koyubenbe N., Konca Y. İzmir ili Ödemiş ilçesinde kırmızı et tüketim davranışlarının belirlenmesi üzerine bir araştırma. Hayvansal Üretim 2010; 51(1): 21-30.

Yılmaz E., Oraman Y., Yılmaz İ. Ekonomik krizin Tekirdağ ilinde tüketicilerin et ve et ürünleri tüketim tutum ve davranışlarına olan etkileri. 10. Ulusal Tarım Ekonomisi Kongresi, 5-7 Eylül 2012, sayfa no: 887-893, Konya.

Yüzbaşıoğlu R., Kızılaslan H., Kızılaslan N., Kurt E. Gıda güvenilirliği açısından tüketici davranışlarının incelenmesi: Sivas kentsel ve kırsal kesimde kırmızı et tüketimi. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi 2018; 7(3): 49-60.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1768-1779, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1768-1779, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Ceratophyllum Submersum'un Antioksidan, Antikolinesteraz ve Antiproliferatif Aktivitelerinin Değerlendirilmesi

Nuh KORKMAZ[1*]

[1]Department of Biology, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Osmaniye Korkut Ata University, Osmaniye, Türkiye

[1]https://orcid.org/ 0000-0001-8299-910X
*Corresponding author: korkmazhun@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 06.04.2025
Kabul tarihi: 28.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Ceratophyllum submersum
Antioksidan aktivite
Antikolinesteraz aktivite
Antiproliferatif etki
Oksidatif stres
Biyoaktif bileşikler

ÖZ

Bu çalışmada *Ceratophyllum submersum* L. etanol özütünün antioksidan, antikolinesteraz ve antiproliferatif aktivitelerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Antioksidan aktivite, toplam antioksidan seviyesi (TAS), toplam oksidan seviyesi (TOS) ve oksidatif stres indeksi (OSI) parametreleri ile belirlenmiştir. *C. submersum*'un TAS değeri 4.271±0,126 mmol/L, TOS değeri 10.505±0.147 µmol/L ve OSI değeri 0.246±0.004 olarak belirlenmiştir. Düşük OSI değeri bitkinin güçlü bir antioksidan savunma sistemine sahip olduğunu göstermektedir. Antikolinesteraz aktivitesi açısından, *C. submersum* özütü asetilkolinesteraz (AChE) ve bütirilkolinesteraz (BChE) enzimlerine karşı sırasıyla 139.68±2.40 µg/mL ve 171.99±1.81 µg/mL seviyelerinde inhibisyon göstermiştir. Bu değerler standart inhibitör galantamin ile karşılaştırıldığında düşük olsa da özütün potansiyel biyoaktif bileşikler içerdiğini göstermektedir. A549 akciğer kanseri hücre hattında antiproliferatif aktivite değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuçlar *C. submersum* etanol özütünün artan konsantrasyonlarda hücre canlılığını önemli ölçüde azalttığını ve antiproliferatif etki gösterdiğini göstermiştir. Elde edilen bulgular *C. submersum*'un biyolojik olarak aktif bileşikler içerdiğini ve oksidatif stresle mücadelede etkili bir bitki türü olduğunu göstermektedir. Ancak bu bitkinin biyoyararlanımı, moleküler mekanizmaları ve terapötik potansiyelini daha iyi anlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Evaluation of Antioxidant, Anticholinesterase and Antiproliferative Activities of *Ceratophyllum Submersum*

Research Article

Article History:
Received: 06.04.2025
Accepted: 28.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Ceratophyllum submersum
Antioxidant activity
Anticholinesterase activity
Antiproliferative effect
Oxidative stress
Bioactive compounds

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the antioxidant, anticholinesterase and antiproliferative activities of *Ceratophyllum submersum* L. ethanol extract. Antioxidant activity was determined by the parameters of total antioxidant level (TAS), total oxidant level (TOS) and oxidative stress index (OSI). TAS value of *C. submersum* was determined as 4.271±0.126 mmol/L, TOS value as 10.505±0.147 µmol/L and OSI value as 0.246±0.004. Low OSI value indicates that the plant has a strong antioxidant defense system. In terms of anticholinesterase activity, *C. submersum* extract showed inhibition against acetylcholinesterase (AChE) and butyrylcholinesterase (BChE) enzymes at 139.68±2.40 µg/mL and 171.99±1.81 µg/mL levels, respectively. Although these values are low compared to the standard inhibitor galantamine, they indicate that the extract contains potential bioactive compounds. Antiproliferative activity assessment was performed on A549 lung cancer cell line. The results showed that *C. submersum* ethanol extract significantly reduced cell viability at increasing concentrations and showed antiproliferative effect. The findings obtained show that *C. submersum* contains biologically active

compounds and is an effective plant species in combating oxidative stress. However, further studies are needed to better understand the bioavailability, molecular mechanisms and therapeutic potential of this plant.

To Cite: Korkmaz N. Evaluation of Antioxidant, Anticholinesterase and Antiproliferative Activities of *Ceratophyllum submersum*. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1768-1779.

1. Introduction

Seaweed has important medicinal properties thanks to the bioactive compounds it contains. It is increasingly gaining attention in the field of health because it is rich in polysaccharides, proteins and phenolic compounds that have antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory and anticancer effects (Ganesan et al., 2019; Rengasamy et al., 2020; El-Beltagi et al., 2022; Matos et al., 2024; Sadeghi et al., 2024; Sevindik et al., 2025). Phenolic compounds can prevent cellular damage, especially by neutralizing free radicals (Akgul et al., 2020). These components are also widely found in medicinal plants and are known for their oxidative stress-reducing effects (Pehlivan et al., 2021; Uysal et al., 2023). Phenolic substances obtained from seaweed may have a synergistic effect when used together with herbal compounds. Therefore, algae and medicinal plants are important in health support products developed using natural compounds (Sevindik et al., 2023; El-Gammal et al., 2024).

Ceratophyllum submersum L. is an aquatic plant species, usually found in freshwater environments such as lakes and ponds. *C. submersum* is an aquatic plant with branched stems that are usually free-floating. Its leaves have a thin and branched structure arranged in rings of 6-12. Its fruits can be hard, wingless, and have spiny edges. Male and female flowers are usually found in different nodes. Male flowers contain many stamens, while female flowers contain a single ovary (Lowden, 1978; Wilmot-Dear, 1985). *C. submersum* is common in habitats with low light transmittance, chlorophyll, and coloured waters (Martínez-Taberner and Moya, 1993; Nagengast and Gąbka, 2017). It has low salt tolerance and is more common in nitrate-rich waters (Nagengast and Gąbka, 2017). Recent studies have further emphasized the biomedical potential of aquatic plants such as *C. submersum* L. due to their content of sulfated polysaccharides. In a pioneering study, Hoang et al. (2022) isolated and characterized fucoidan from *C. submersum* for the first time, reporting significant antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory, anticoagulant, and anticancer activities, particularly against MCF-7 breast cancer cells. This fucoidan showed strong radical scavenging activity and exhibited structural features similar to those of bioactive marine-derived fucoidans. In another comparative study, Jebamalar and Sumathy (2016) evaluated the antioxidant capacity of *C. submersum* and *Chaetomorpha antennina*, supporting the view that freshwater plants like *C. submersum* can serve as alternative sources of antioxidant compounds. In a similar study by Jebamalar and Sumathy (2018), polysaccharides extracted from *C. submersum* and *C. antennina* were compared in terms of yield and structural characteristics. Although the study did not assess biological activity, previous literature indicates that sulphated polysaccharides from various aquatic sources may possess pharmacological properties such as anticoagulant, antioxidant, anti-inflammatory, and antiviral effects. Therefore, the polysaccharide content of *C. submersum* makes it a promising candidate for further biomedical investigation.

Therefore, the present study aimed to investigate the antioxidant, anticholinesterase, and antiproliferative activities of *C. submersum* L. in order to evaluate its potential for future applications in pharmaceutical and functional food industries.

2. Material and Methods

C. submersum plant samples used in this study were obtained from Osmaniye, Turkey. Collected samples were dried in a laboratory environment and prepared following analysis. Within the scope of the extraction process, 10 grams of dried plant material was processed using the Soxhlet extraction method. During this process, 250 mL of ethanol was preferred as the solvent, and the extraction process was continued at 50 °C for approximately 6 hours. The obtained crude extracts were concentrated and completely freed from the solvent using a Buchi R100 Rotary Evaporator at 40 °C. Finally, the extracts were stored at 4 °C until experimental analyses were performed.

2.1. Antioxidant Activity Test

Rel Assay determined the total antioxidant capacity (TAS) and total oxidant level (TOS) of the ethanolic extract used in the study using commercial kits. Analyses were performed by the protocols recommended by the kit manufacturer. Trolox was used to calibrate TAS measurements, and hydrogen peroxide was used as a calibrator in TOS analyses. The TAS and TOS values were expressed in mmol/L and μmol/L units, respectively (Erel, 2004; Erel, 2005). Oxidative Stress Index (OSI) was calculated by converting TOS and TAS values to the same units and then dividing TOS by TAS, and the results were reported as percentages (Sevindik, 2019).

2.2. Anticholinesterase Activity Test

In this study, the anticholinesterase activity of the ethanolic extract was analysed based on the Ellman method (Ellman et al., 1961). Inhibitory effects against acetylcholinesterase (AChE) and butyrylcholinesterase (BChE) enzymes were evaluated, and galantamine was used as a reference inhibitor for comparative analysis. Before the experiment, extracts were diluted to 200 to 3.125 μg/mL concentrations, and stock solutions were prepared. During the analysis process, 130 μL of 0.1 M phosphate buffer (pH 8.0), 10 μL of extract solution, and 20 μL of the enzyme (AChE or BChE) were added to the microplate wells, respectively, and incubated at 25 °C in the dark for 10 min. After incubation, 20 μL of DTNB [5.5'-dithiobis-(2-nitrobenzoic acid)] solution and 20 μL of substrate (acetylcholine iodide or butyrylcholine iodide) were added to the wells, respectively, to initiate the enzymatic reaction. Spectrophotometric measurements determined enzyme activity at 412 nm wavelength. The enzyme inhibition potential of the extracts was evaluated by calculating IC50 values (μg/mL), and each analysis was performed with three independent replicates.

2.3. Antiproliferative Activity Test

In this study, the cytotoxic effects of ethanolic extract on the A549 lung cancer cell line were investigated using the MTT (Cell Viability Test) method. Before the experiment, stock solutions were prepared at 25, 50, 100, and 200 μg/mL concentrations. After the cells were 70-80% confluent, the cells were detached from the surface with 3.0 mL of Trypsin-EDTA solution (Sigma-Aldrich, MO, USA). The detached cells were added to culture plates and incubated for 24 hours. After the incubation period, plant extracts at different concentrations were applied to the cells, and the cells were incubated for another 24 hours. After the process, the supernatant medium was removed, 1 mg/mL MTT solution was added, and the cells were incubated at 37 °C. After the purple formazan crystals formed with the MTT solution were observed, dimethyl sulfoxide (DMSO) (Sigma-Aldrich, MO, USA) was added to dissolve the precipitate. The viability of the cells was measured at a wavelength of 570 nm using an Epoch spectrophotometer (BioTek Instruments, Winooski, VT, USA) (Ünal et al., 2025).

3. Results and Discussion

3.1. Antioxidant Activity

Aquatic plants contain various bioactive components that are important in combating oxidative stress. Phenolic compounds, flavonoids, and carotenoids can reduce cellular damage by neutralizing reactive oxygen species (ROS) (El-Chaghaby et al., 2024). Oxidative stress occurs when free radical formation in cells increases due to environmental pollution, ultraviolet rays, and other stress factors (Gürgen & Sevindik, 2022; Bal et al., 2023). Antioxidant compounds can delay cellular aging and protect the health of biological systems by neutralizing these free radicals (Islek et al., 2021; Saridogan et al., 2021). In addition, using extracts from these plants in medical and pharmaceutical fields offers a promising approach to prevent oxidative stress-induced diseases (Pradhan et al., 2020). In this study, the antioxidant potentials of *C. submersum* were evaluated. The obtained data are presented in Table 1.

Table 1. TAS, TOS and OSI values of *Ceratophyllum submersum*

Sample	TAS mmol/L	TOS μmol/L	OSI
C. submersum	4.271±0.126	10.505±0.147	0.246±0.004

- Values are presented as mean±SD

In this study, total antioxidant level (TAS), total oxidant level (TOS), and oxidative stress index (OSI) values of *C. submersum* species were determined. According to the obtained data, TAS value was determined as 4.271±0.126 mmol/L in *C. submersum* sample. This result reveals the presence of natural components such as phenolic compounds, flavonoids, and ascorbic acid that show antioxidant properties in plant tissue and the capacity of these components to neutralize free radicals effectively. Indeed, various studies conducted on aquatic plants with high antioxidant capacity have reported that these species develop protective biochemical mechanisms against environmental stress conditions (Silvestre,

2020; Mishra et al., 2023). TOS value was determined as 10.505±0.147 µmol/L. This value indicates the level of potentially pro-oxidant compounds and reactive oxygen species (ROS) in the plant. High TOS values indicate oxidative processes occurring under biotic and abiotic stress conditions (Krupodorova and Sevindik, 2020). However, the OSI value determined in this study is 0.246±0.004, which is relatively low. OSI is a parameter obtained by dividing TOS by TAS and quantitatively expressing the level of oxidative stress in the system. The low OSI value shows that the antioxidant defense system of *C. submersum* effectively suppresses the existing oxidant compounds and can maintain the oxidative balance. The findings are also remarkable when compared with the values of some land-based plant species reported in the literature. For example, TAS values for *Mentha longifolia*, *Echium italicum*, *Centaurea rigida*, *Alcea kurdica*, and *Sinapis arvensis* species were reported as 6.094, 6.056, 3.522, 3.298, and 5.232 mmol/L, respectively. In the same studies, TOS values were reported as 14.050, 19.107, 15.424, 8.312, and 7.564 µmol/L, respectively; OSI values were reported as 0.231, 0.316, 0.440, 0.252, and 0.146 (Kına et al., 2021; Uysal et al., 2021; Mohammed et al., 2022; Mohammed et al., 2023; Sevindik et al., 2024). In this context, the TAS value of *C. submersum* is higher than *C. rigida* and *A. kurdica* but lower than *M. longifolia*, *E. italicum*, and *S. arvensis*. The TOS value is lower than *M. longifolia*, *E. italicum*, and *C. rigida* and higher than *A. kurdica* and *S. arvensis*. When evaluated regarding OSI value, *C. submersum* exhibits a higher oxidative stress level than *M. longifolia* and *S. arvensis* but lower than *E. italicum*, *C. rigida*, and *A. kurdica*. In conclusion, *C. submersum* can be considered an aquatic plant species that can cope with oxidative stress. Its strong antioxidant defence system has developed resistance to environmental stress conditions. These properties may constitute an important reference point in future biological activity and environmental adaptation studies.

3.2. Anticholinesterase Activity

Aquatic plants attract attention with their antioxidant properties and their bioactive components that exhibit anticholinesterase activity. Alkaloids, phenolic compounds, and flavonoids found in these plants can slow down the destruction of acetylcholine, which plays a role in neurotransmission, by inhibiting the activity of acetylcholinesterase (AChE) and butyrylcholinesterase (BChE) enzymes (Olasehinde et al., 2021). While excessive activity of cholinesterase enzymes is associated with Alzheimer's and other neurodegenerative diseases, natural compounds that inhibit these enzymes are evaluated as potential therapeutic agents (Sabik et al., 2024). Extracts obtained from aquatic plants are of interest in pharmaceutical research, mainly due to their neuroprotective effects, and are among the promising natural resources for treating cognitive dysfunctions (Grina et al., 2020). In this study, the anticholinesterase activity of *C. submersum* was investigated, and the results are presented in Table 2.

Table 2. Anti-AChE and anti-BChE values of *Ceratophyllum submersum*

Sample	AChE µg/mL	BChE µg/mL
C. submersum	139.68±2.40	171.99±1.81
Galantamine	9.49±0.29	15.36±0.33

* The values were studied with 3 repetitions and the std values are given.

This study evaluated the inhibitory effects of *C. submersum* against acetylcholinesterase (AChE) and butyrylcholinesterase (BChE) enzymes. AChE and BChE enzymes play a role in the regulation of acetylcholine levels, and excessive activity of these enzymes plays a role in the pathophysiology of various neurodegenerative diseases, especially Alzheimer's disease (Gürgen & Sevindik, 2025). Therefore, inhibitors of these enzymes are important pharmacological agents used in treating Alzheimer's disease today. In the study, the AChE inhibition value of *C. submersum* was determined as 139.68±2.40 µg/mL and the BChE inhibition value as 171.99±1.81 µg/mL. These values indicate that they are quite low compared to the activity of galantamine (AChE: 9.49±0.29 µg/mL; BChE: 15.36±0.33 µg/mL) used as the positive control. This situation shows that the enzyme inhibition activity of *C. submersum* is weak. However, it should be considered that crude plant extracts have lower bioavailability compared to purified pharmaceutical agents. Therefore, isolating specific active compounds found in plant extracts and evaluating the biological activities of pure fractions separately is important for a more accurate understanding of the inhibitory activity. Compared with similar studies, it is reported that AChE inhibition values of different extracts of *Ulva lactuca*, an aquatic macroalgae, ranged between 37.66–43.82 µg/mL, and BChE inhibition values ranged between 48.04–58.14 µg/mL (Korkmaz, 2025). These results reveal that *U. lactuca* has a more substantial inhibitory effect on cholinesterase enzymes than *C. submersum*. However, the fact that *C. submersum* showed a particular inhibitory activity, albeit at higher concentrations, suggests that the extract contains potentially active compounds.

In conclusion, it was observed in our study that *C. submersum* exhibited a specific inhibitory effect against AChE and BChE enzymes. However, this effect was limited compared to standard inhibitors such as galantamine. However, considering the plant extract's complex structure and metabolite diversity, the possibility of obtaining more potent inhibitors by examining isolated compounds should not be ignored.

3.3. Antiproliferative Activity

Aquatic plants are among the natural resources that attract attention in cancer research by exhibiting antiproliferative activity thanks to the bioactive compounds they contain. Phenolic compounds, flavonoids, alkaloids, and terpenoids found in these plants can prevent excessive proliferation of cancer cells and trigger apoptotic mechanisms (Martínez et al., 2022). Thanks to their antiproliferative effects, extracts obtained from aquatic plants are evaluated as potential chemopreventive agents by suppressing cell division in various types of cancer, especially breast, lung, and colon cancer. In addition, the roles of these plants in combating oxidative stress can reduce the risk of tumor formation by preventing DNA damage. Therefore, studies on the biological activities of aquatic plants provide important findings that can contribute to developing new-generation anticancer drugs (Mridha et al., 2020). In this study, the effects of *C. submersum* on A549 lung cancer cells were examined, and the results obtained are presented in Figure 1 as µg/mL.

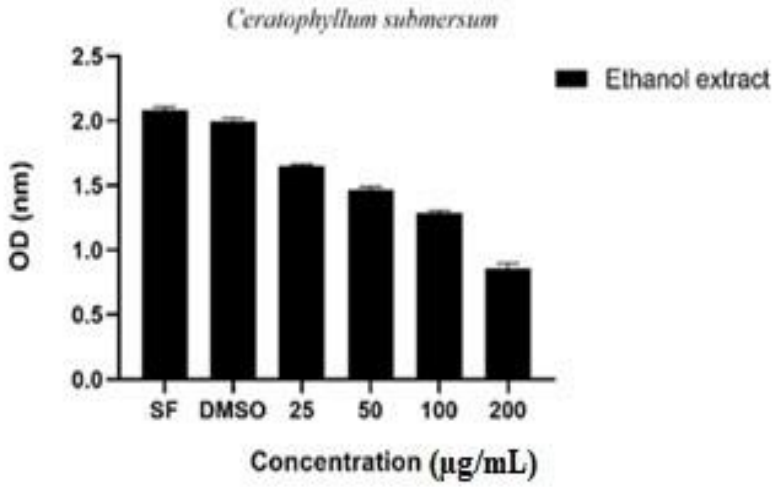


Figure 1. Antiproliferative activity of *Ceratophyllum submersum*

In this study, the antiproliferative activity of *C. submersum* ethanol extract was evaluated via optical density (OD) values reflecting cell viability. The results show that increasing extract concentrations caused a significant decrease in cell viability. The highest OD values were observed in the serum-free medium (SF) group, which was used as the negative control group, and in the DMSO group, which was used as the solvent control. This confirms that the cells proliferated healthily in both conditions. On the other hand, it was found that OD values decreased gradually in the ethanol extract-applied groups. This decrease reveals the antiproliferative effect of the extract. Mainly, a significant decrease in OD values was observed at concentrations of 100 and 200 µg/mL. This finding shows that *C. submersum* ethanol extract significantly inhibited cell proliferation at high doses.

Although it is not yet fully known how the bioactive compounds contained in the plant suppress cellular growth, it is thought that this effect may be due to phenolic compounds, flavonoids, or other secondary metabolites (Efenberger-Szmechtyk et al., 2021; Esmeeta et al., 2022). There are studies in the literature supporting the antiproliferative effects of *Ceratophyllum* species. For example, it has been reported that *C. demersum* exhibited antiproliferative activity against the HT-29 human colon cancer cell line (Awati et al., 2021). This suggests that the *Ceratophyllum* genus may generally have inhibitory properties against cancer cell proliferation. Similarly, it has been reported that the macroalgae *Ulva lactuca* is effective against the A549 lung cancer cell line (Korkmaz, 2025). These data indicate that aquatic plants and algae may contain potential bioactive compounds for cancer treatment. In this context, the antiproliferative activity observed in our study is thought to be due to the biologically active components of *C. submersum*. However, further research is needed to determine the molecular mechanisms of this effect. In the future, investigating the effects on cell cycle regulation, apoptotic markers, and signalling pathways may clarify this plant's potential use areas. In conclusion, the antiproliferative effect of *C. submersum* ethanol extract is consistent with similar studies in the literature, indicating that this plant

may be a potential source of natural compounds that can be evaluated in cancer research. However, further in vitro and in vivo studies should confirm its efficacy and safety.

4. Conclusion

This study evaluated the antioxidant, anticholinesterase, and antiproliferative activities of *C. submersum* species using ethanol extract. The results revealed that this aquatic plant contains biologically active compounds that may have various pharmacological potentials. High antioxidant capacity, low oxidative stress index, and certain levels of cholinesterase enzyme inhibition indicate that the plant is remarkable regarding neuroprotective and anti-aging effects. In addition, the antiproliferative effect observed on the A549 lung cancer cell line suggests that *C. submersum* may have anticancer potential. However, the obtained data are at a basic level, and advanced studies are required to provide a more detailed understanding of the molecular mechanisms of biological activity. In future studies, the isolation and characterization of secondary metabolites such as phenolic compounds, flavonoids, and alkaloids found in this plant should be a priority. In addition, supporting in vitro findings with in vivo models, performing toxicological evaluations, and determining pharmacokinetic profiles will clarify the potential use of this species in medical or pharmaceutical fields. In conclusion, *C. submersum* is a valuable aquatic plant species that should be considered in natural product research and new-generation therapeutic agent development studies of its resistant structure to environmental stress factors and versatile biological activities.

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Author's Contributions

The author declares that he has contributed 100% to the article.

References

Akgul H., Korkmaz N., Dayangaç A., Sevindik M. Antioxidant potential of endemic *Salvia absconditiflora*. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology 2020; 8(10): 2222–2224.

Awati SS., Singh SK., Wadkar KA. In vitro antioxidant potential and anticancer activity of *Ceratophyllum demersum* Linn. extracts on HT-29 human colon cancer cell line. Research Journal of Pharmacy and Technology 2021; 14(1): 28-36.

Bal C., Eraslan EC., Sevindik M. Antioxidant, antimicrobial activities, total phenolic and element contents of wild edible mushroom *Bovista nigrescens*. Prospects in Pharmaceutical Sciences 2023; 21(2): 37–41.

Efenberger-Szmechtyk M., Nowak A., Czyzowska A. Plant extracts rich in polyphenols: Antibacterial agents and natural preservatives for meat and meat products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 2021; 61(1): 149–178.

El-Beltagi HS., Mohamed AA., Mohamed HI., Ramadan KM., Barqawi AA., Mansour AT. Phytochemical and potential properties of seaweeds and their recent applications: A review. Marine Drugs 2022; 20(6): 342.

El-Chaghaby GA., Mohammed FS., Rashad S., Uysal I., Koçer O., Lekesiz Ö., Doğan M., Şabik AE., Sevindik M. Genus *Hypericum*: General properties, chemical contents and biological activities. Egyptian Journal of Botany 2024; 64(1): 1–26.

El-Gammal MI., Abou-Dobara MI., Ibrahim HA., Abdulhafith SA., Okbah MA. Polyphenols in selected marine algae and aromatic herbs with antimicrobial properties: A comparative study. Egyptian Journal of Aquatic Research 2024; 50(1): 71–77.

Ellman GL., Courtney KD., Andres JrV., Featherstone, RM. A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. Biochemical Pharmacology 1961; 7(2): 88–95.

Erel O. A novel automated direct measurement method for total antioxidant capacity using a new generation, more stable ABTS radical cation. Clinical Biochemistry 2004; 37(4): 277–285.

Erel O. A new automated colorimetric method for measuring total oxidant status. Clinical Biochemistry 2005; 38(12): 1103–1111.

Esmeeta A., Adhikary S., Dharshnaa V., Swarnamughi P., Maqsummiya ZU., Banerjee A., Pathak S., Duttaroy AK. Plant-derived bioactive compounds in colon cancer treatment: An updated review. Biomedicine & Pharmacotherapy 2022; 153: 113384.

Ganesan AR., Tiwari U., Rajauria G. Seaweed nutraceuticals and their therapeutic role in disease prevention. Food Science and Human Wellness 2019; 8(3): 252–263.

Grina F., Ullah Z., Kaplaner E., Moujahid A., Eddoha R., Nasser B., Terzioğlu P., Yılmaz MA., Ertaş A., Öztürk M., Essamadi A. In vitro enzyme inhibitory properties, antioxidant activities, and phytochemical fingerprints of five Moroccan seaweeds. South African Journal of Botany 2020; 128: 152-160.

Gürgen A., Sevindik M. Application of artificial neural network coupling multiobjective particle swarm optimization algorithm to optimize *Pleurotus ostreatus* extraction parameters. Journal of Food Processing and Preservation 2022; 46(11): e16949.

Gürgen A., Sevindik M. Single and multi-objective optimization of the red pine mushroom *Lactarius deliciosus* (Agaricomycetes) Extraction conditions using artificial intelligence methods and biological activities of optimized extracts. International Journal of Medicinal Mushrooms 2025; 27(2): 59–73.

Hoang NN., Nguyen TK., Vo TH., Nguyen NH., Nguyen DH., Tran DL. Isolation, characterization, and biological activities of fucoidan derived from *Ceratophyllum Submersum* L. Macromolecular Research 2022; 30(2): 136-145.

Islek C., Saridogan BGO., Sevindik M., Akata I. Biological activities and heavy metal contents of some *Pholiota* species. Fresenius Environmental Bulletin 2021; 30(6): 6109–6114.

Jebamalar J., Sumathy VJH. A Comparative analysis of the antioxidant potential of *Chaetomorpha antennina* and *Ceratophyllum submersum*. International Journal of Current Research in Multidisciplinary 2016; 5(2): 06-11.

Jebamalar J., Sumathy VJH. A comparative analysis of the anticoagulant property of *Chaetomorpha Antennina* and *Ceratophyllum Submersum*. Journal of Biotechnology and Biochemistry 2018; 4(5): 06-14.

Kına E., Uysal İ., Mohammed FS., Doğan M., Sevindik M. In-vitro antioxidant and oxidant properties of *Centaurea rigida*. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology 2021; 9(10): 1905-1907.

Korkmaz N. Extract optimization of *Ulva lactuca* L. and biological activities of optimized extracts. BMC Biotechnology 2025; 25(1): 21.

Krupodorova T., Sevindik M. Antioxidant potential and some mineral contents of wild edible mushroom *Ramaria stricta*. AgroLife Scientific Journal 2020; 9(1): 186–191.

Lowden RM. Studies on the submerged genus *Ceratophyllum* L. in the neotropics. Aquatic Botany 1978; 4: 127–142.

Martínez KA., Saide A., Crespo G., Martín J., Romano G., Reyes F., Lauritano C., Ianora A. Promising antiproliferative compound from the green microalga *Dunaliella tertiolecta* against human cancer cells. Frontiers in Marine Science 2022; 9: 778108.

Martínez-Taberner A., Moya G. Submerged vascular plants and water chemistry in the coastal marsh Albufera de Mallorca (Balearic Islands). Hydrobiologia 1993; 271: 129-139.

Matos J., Cardoso C., Serralheiro ML., Bandarra NM., Afonso C. Seaweed bioactives potential as nutraceuticals and functional ingredients: A review. Journal of Food Composition and Analysis 2024; 106453.

Mishra N., Jiang C., Chen L., Paul A., Chatterjee A., Shen G. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. Frontiers in Plant Science 2023; 14: 1110622.

Mohammed FS., Sevindik M., Uysal I. Total phenolic, flavonoid, protein contents and biological activities of wild mustard. Acta Alimentaria 2023; 52(3): 449-457.

Mohammed FS., Sevindik M., Uysal I., Sevindik E., Akgül H. A natural material for suppressing the effects of oxidative stress: biological activities of *Alcea kurdica*. Biology Bulletin 2022; 49: S59-S66.

Mridha A., Gopal PK., Paul S. Screening data reveals that *Spirogyra triplicata*, a fresh water alga induces robust anti-proliferative activity against A549 cells. Pharmacognosy Journal 2020; 12(3): 569–577.

Nagengast B., Gąbka M. Apparent niche partitioning of two congeneric submerged macrophytes in small water bodies: The case of *Ceratophyllum demersum* L. and *C. submersum* L. Aquatic Botany 2017; 137: 1–8.

Olasehinde TA., Olaniran AO., Okoh AI. Cholinesterase inhibitory activity, antioxidant properties, and phytochemical composition of *Chlorococcum* sp. extracts. Journal of Food Biochemistry 2021; 45(3): e13395.

Pehlivan M., Mohammed FS., Şabik AE., Kına E., Dogan M., Yumrutaş Ö., Sevindik M. Some Biological activities of ethanol extract of *Marrubium globosum*. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology 2021; 9(6): 1129–1132.

Pradhan B., Nayak R., Patra S., Jit BP., Ragusa A., Jena M. Bioactive metabolites from marine algae as potent pharmacophores against oxidative stress-associated human diseases: A comprehensive review. Molecules 2020; 26(1): 37.

Rengasamy KR., Mahomoodally MF., Aumeeruddy MZ., Zengin G., Xiao J., Kim DH. Bioactive compounds in seaweeds: An overview of their biological properties and safety. Food and Chemical Toxicology 2020; 135: 111013.

Sabik AE., Sevindik M., Mohammed FS., Dogan M. A new natural source against a549 lung cancer cells *anthemis cotula* and its Biological Activities and Phenolic Contents. Pharmaceutical Chemistry Journal 2024; 1–7.

Sadeghi A., Rajabiyan A., Nabizade N., Nezhad NM., Zarei-Ahmady A. Seaweed-derived phenolic compounds as diverse bioactive molecules: A review on identification, application, extraction and purification strategies. International Journal of Biological Macromolecules 2024; 266: 131147.

Saridogan BGO., Islek C., Baba H., Akata I., Sevindik M. Antioxidant antimicrobial oxidant and elements contents of *Xylaria polymorpha* and *X. hypoxylon* (Xylariaceae). Fresenius Environmental Bulletin 2021; 30(5): 5400–5404.

Sevindik M. The novel biological tests on various extracts of Cerioporus varius. Fresenius Environmental Bulletin 2019; 28(5): 3713–3717.

Sevindik M., Gürgen A., Krupodorova T., Uysal İ., Koçer O. A hybrid artificial neural network and multi-objective genetic algorithm approach to optimize extraction conditions of *Mentha longifolia* and biological activities. Scientific Reports 2024; 14(1): 31403.

Sevindik M., Mohammed FS., Uysal I. Autism: plants with neuro-psychopharmacotherapeutic potential. Prospects in Pharmaceutical Sciences 2023; 21(3): 38–48.

Sevindik M., Krupodorova T., Sevindik E., Koçer O., Uysal I., Ünal O. *Elaeagnus angustifolia* L.: A comprehensive review of its biological activities, phenolic and chemical constituents, and applications. Applied Fruit Science 2025; 67(2): 70.

Silvestre F. Signaling pathways of oxidative stress in aquatic organisms exposed to xenobiotics. Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology 2020; 333(6): 436–448.

Uysal İ., Mohammed FS., Şabik AE., Kına E., Sevindik M. Antioxidant and oxidant status of medicinal plant *Echium italicum* collected from different regions. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology 2021; 9(10): 1902-1904.

Uysal I., Koçer O., Mohammed FS., Lekesiz Ö., Doğan M., Şabik AE., Sevindik E., Özbas-Gerçeker F., Sevindik M. Pharmacological and nutritional properties: Genus *Salvia*. Advances in Pharmacology and Pharmacy 2023; 11(2): 140–155.

Ünal O., Gürgen A., Krupodorova T., Sevindik M., Kabaktepe Ş., Akata I. Optimization of *Phellinus hartigii* extracts: Biological activities, and phenolic content analysis. BMC Complementary Medicine and Therapies 2025; 25: 113.

Wilmot-Dear M. *Ceratophyllum* revised: a study in fruit and leaf variation. Kew Bulletin 1985; 243–271.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1780-1794, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1780-1794, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

n-In_2S_3/p-Si Tabanlı Heteroeklem Fotodedektörlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Esra ASLAN[1*]

[1]Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 63300, Şanlıurfa

[1]https://orcid.org/0000-0002-3987-1570
*Sorumlu yazar: esrapalaliaslan@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 16.01.2025
Kabul tarihi: 04.05.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Fotodedektör
Heteroeklem
In_2S_3
İnce film
Silisyum

ÖZ

In_2S_3, uygun yasak bant aralığı nedeniyle optoelektronik uygulamalarda tercih edilen bir yarıiletkendir. Bu çalışmada, In_2S_3 filmler kimyasal çözelti yöntemiyle farklı S/In molar oranlarda hazırlanmış ve yapısal, morfolojik ve optiksel özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, p tipi silisyum altlıklar üzerine In_2S_3 ince filmler spin kaplama tekniği ile kaplanarak n-In_2S_3/p-Si yapısında heteroeklem fotodedektör cihazlar hazırlanmıştır. X-ışını kırınımı sonuçlarına göre tüm filmler tetragonal yapıda kristalleşmektedirler. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri filmlerin tanecikli yapıda olduğunu göstermektedir. Filmlerin yasak bant aralıkları 2.84 eV ile 2.94 eV aralığında S/In oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Karanlık ortamda yapılan ölçümlere göre cihazlar pn eklem diyot karaktersitik yapıdadırlar. Görünür ışık altında yapılan ölçümler ise cihazların ışığa tepki verdiğini göstermektedir. 5 mW/cm^2 görünür ışık altında cihazların fotohassasiyetleri 3396 gibi yüksek bir değere ulaşmaktadır. Maksimum fotoyanıt ve spesifik tespit ise 9×10^{-3} A/W ve 6.2×10^{10} Jones olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte, bu cihazların yükselme ve bozulma süreleri 1 saniyenin altında değerlere sahiptir. S/In oranı ayarlanarak cihazların karanlık akımları 3.7×10^{-10} A değerine kadar düşürülmüştür. Bu kadar düşük karanlık akım da cihazların spesifik tespit değerlerini 6.2×10^{10} Jones değerine kadar yükseltmiştir. Bu çalışma sonuçları In_2S_3 yarıiletkenin p tipi silisyum ile pn eklem yapı oluşturmak için son derece uygun bir malzeme olduğunu göstermektedir. Ayrıca In_2S_3 yarıiletkeni hazırlanırken çözeltideki S/In oranındaki değişim filmlerin hem fiziksel özelliklerini hemde cihazların parameterlerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Fabrication and Characterization of n-In_2S_3/p-Si Based Heterojunction Photodetectors

Research Article

Article History:
Received: 16.01.2025
Accepted: 04.05.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Heterojunction
In_2S_3
Photodetector
Silicon
Thin film

ABSTRACT

In_2S_3 is a preferred semiconductor in optoelectronic applications due to its favorable bandgap. In this study, In_2S_3 films were prepared at different S/In molar ratios by chemical solution method and their structural, morphological and optical properties were examined. In addition, heterojunction photodetector devices with n- In_2S_3/p-Si structure were prepared by coating In_2S_3 thin films on p-type silicon substrates with the spin coating technique. According to X-ray diffraction results, all films crystallize in a tetragonal structure. Scanning electron microscope images show that the films have a granular structure. The band gaps of the films vary between 2.84 eV and 2.94 eV depending on the S/In ratio. According to the measurements made in the dark environment, the devices have a *pn* junction diode characteristic structure. Measurements made under visible light show that the devices respond to light. Under 5 mW/cm^2 visible light, the photosensitivity of the devices reaches a high value of 3396. The maximum photoresponsivity and specific detectivity were recorded as 9×10^{-3} A/W, and 6.2×10^{10} Jones.

Moreover, these devices have rise and decay times of less than 1 second. By adjusting the S/In ratio, the dark current of the devices was reduced to 3.7×10^{-10} A. This low dark current also increased the specific detectivity values of the devices up to 6.2×10^{10} Jones. The results of this study clearly show that, In_2S_3 semiconductor is a highly compatible material for forming pn junction structure with p-type silicon. In addition, while preparing the In_2S_3 semiconductor, the change in the S/In ratio in the solution significantly affects both the physical properties of the films and the parameters of the devices.

To Cite: Aslan E. Fabrication and Characterization of n-In_2S_3/p-Si Based Heterojunction Photodetectors. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1780-1794.

1. Introduction

Semiconductor materials are the cornerstone of optoelectronic applications. Their interaction with light has led to the frequent use of such materials in applications such as solar cells, photocatalytics and photodetectors (Ahmad et al., 2023; Aslan et al., 2024). Photodetectors that detect light can generally be classified into two categories according to their working principles: metal-semiconductor-metal (MSM) and pn junction type. On the other hand, MSM-type photodetectors are divided into two subcategories: ohmic contact and Schtokky contact. Ohmic contact and Schottky contact structure can be determined according to the work functions of metals and semiconductors. In ohmic contact photodetectors, when light is absorbed by the semiconductor, an electron-hole pair is formed. Under an external voltage, this pair separates from each other and creates photocurrent. This external voltage usually varies between 5 and 20 V (Kumar and Kumar, 2019; Qin et al., 2019). In such devices, the need for these high external voltage values to observe the change in current under light is considered a disadvantage. Besides that, in Schottky contact and pn junction-type photodetectors, the electron-hole pairs produced by photon absorption are separated from each other due to the potential difference in the junction region without an external voltage, creating photocurrent. Therefore, this type of photodetectors is more advantageous as they provide their own energy. Such devices are also called self-powered devices. Such devices are needed, especially in places where energy is difficult to deliver. Therefore, the development of such devices is also essential. Studies on self-powered photodetectors are increasing rapidly. For example, perovskite-based photodetectors are attracting much attention (Wang et al., 2022). However, although perovskite structures have excellent properties, there are serious problems with their instability. Therefore, alternative heterostructures need to be investigated. Silicon semiconductor, with its 1.12 eV bandgap, forms the basis of all electronic technology. It is possible to produce p and n-type silicon depending on the doping type. Junctions obtained with p-type silicon and n-type silicon are called homojunctions. However, it is also possible to obtain a pn junction with two different semiconductors. Such structures are called heterojunctions. Heterojunction structures have been obtained by coating many different semiconductors on p-type silicon as a photodetector. Examples include p-Si/n-ZnO, p-Si/n-ZnS, p-Si/n-TiO_2 and p-Si/n-CdS heterojunctions (Al-Ani et al., 2006; Zhang et al., 2020; Agrohiya et al., 2022; Moger and Mahesha, 2023). Generally, wide band gap semiconductors are preferred for such structures. For instance, the band gaps of ZnO, ZnS, TiO_2 and CdS are 3.3, 3.8, 3.6 and 2.6 eV,

respectively (Hankare et al., 2009; Wei et al., 2013; Khan et al., 2017; Muchuweni et al., 2017). CdS is an excellent semiconductor for both photodetectors and solar cells. However, its use is restricted because it contains heavy metals that are harmful to the environment. Therefore, scientists have researched materials that could be alternatives to this material. One of the materials investigated is In_2S_3. This material has attracted attention due to its suitable band gap and high sensitivity to light. It has been widely researched as an n-type material, especially in solar cells (Robin and Rahaman, 2016). In_2S_3 semiconductor is a sulfur compound and the amount of sulfur in its structure can affect many of its physical properties, especially the band gap. In this study, heterojunction photodetectors were prepared by coating n-type In_2S_3 semiconductor on p-type silicon by chemical solution method. The sulfur ratio in the In_2S_3 material was changed depending on the molar ratio of the sulfur-containing chemical added to the solution. Structural, morphological, optical and photodetector properties of films prepared with solutions of different molar ratios were examined in detail. According to the results, the amount of sulfur in the solution significantly affects both the physical properties and photodetector parameters of In_2S_3.

2. Material and Methods

2.1. Preparation of In_2S_3 solutions and thin films

Indium (III) chloride hydrate ($InCl_3 \cdot \times H_2O$), thiourea (CH_4N_2S), 2-methoxyethanol ($C_3H_8O_2$), and ethanolamine (C_2H_7NO) chemicals were used for the preparation of In_2S_3 solutions and thin films. After dissolving 0.8847 g of indium (III) chloride hydrate in 17 ml of 2-methoxyethanol at room temperature, 0.1523 g of thiourea was added to this solution. The S/In ratio in this solution is 2/4. Finally, ~ 0.1 ml of ethanolamine base was added to the solution after mixing on a magnetic stirrer for 30 minutes. After 24 hours of mixing, transparent light yellow solutions were obtained. Along with this solution, three more solutions with S/In ratios of 6/4, 10/4 and 14/4 were prepared. These solutions were prepared similarly. The pH value of all solutions was measured to be ~ 4.7. Using these solutions, coated films were formed 7 times on glass substrates by dipping method at 300 ^oC. These films were then annealed in a vacuum environment at 350 ^oC for 30 minutes.

2.2. Preparation of p-Si/n-In_2S_3/Ag photodetectors

Commercially available p-type and (100) oriented silicon substrates were used. The conventional hydrofluoric acid cleaning process was applied to remove the native SiO_2 layer formed on Silicon (Zhang et al., 2020; Moger and Mahesha, 2023). After the cleaning process of the substrates, carbon paste was applied to the underside (unpolished side), and kept at 150 ^oC for 5 minutes on a hot plate. Then, silver paste was applied on the carbon layer, and the same heat treatment was repeated. In_2S_3 films were coated on the polished surface of a silicon wafer using the spin coating technique at 3000 rpm. In_2S_3 films were coated 5 times, and kept at 300 ^oC for 3 minutes after each coating. Finally, silver contacts were formed by the thermal evaporation method using a mask on the In_2S_3 layer. Figure 1 shows the schematic structure of the prepared photodetectors.

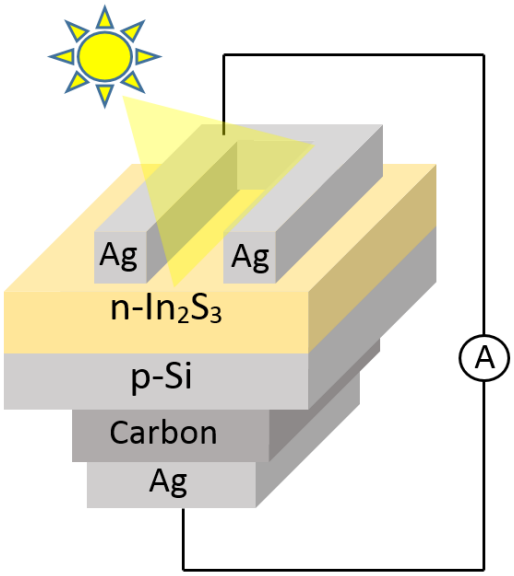


Figure 1. Schematic representation of the prepared self-powered photodetectors

2.3. Characterization

X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and UV-Vis spectrometry methods were used for structural, morphological and optical measurements, respectively. A Keithley 2400 source-meter and white light-emitting LED were used for the characterization of photodetectors. The intensity of the light was adjusted to 5 mW/cm^2 using a Newport power meter. All measurements were carried out at room temperature, and in a closed box.

3. Results and Discussion

In order to determine the crystal structures of In_2S_3 samples, measurements were made with the XRD device, with 2θ angles between 10 and 70^o, in steps of 0.03^o. Figure 2 shows the XRD spectra of all samples. The peaks appearing at 14.61^o, 27.65^o, 33.39^o, 43.79^o, and 47.82^o belong to the (103), (213), (220), (309), and (400) planes of In_2S_3, which has a tetragonal crystal structure, respectively (Lin et al., 2014). In films with a S/In ratio of 2/4, XRD peaks belonging to the In_2O_3 phase appeared along with the In_2S_3 phase (see Fig. 2a). As seen in the figure, the peak appearing at ~ 31 degrees belongs to In_2O_3 with the Miller indice of (222) (Wang et al., 2024). This may be due to the low sulfur content in these films. When there is not enough sulfur in the structure, indium metal may tends to oxidize. This is an expected result. However, as the sulfur content increases, the intensity of the XRD peak of (222) crystalline plane decreases significantly. This result shows how the sulfur content in the films affects the formation of different phases such as In_2O_3. On the other hand, according to XRD results, the In_2S_3 phase was formed in all films.

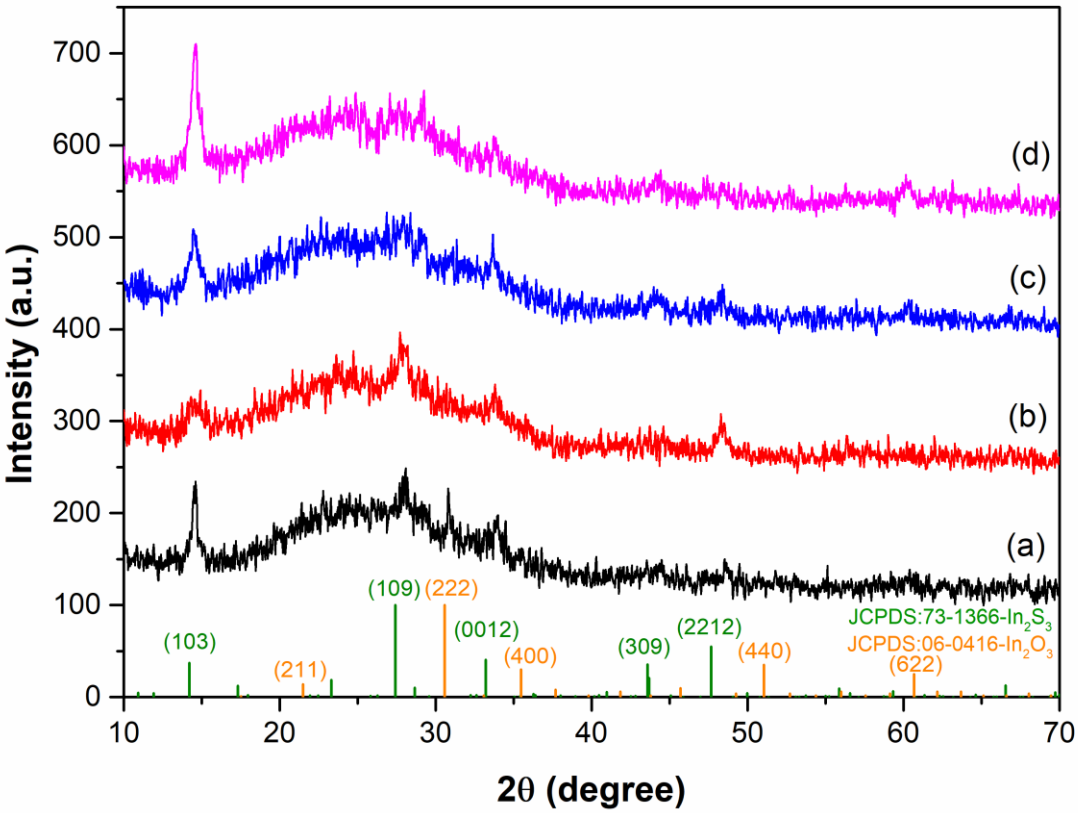


Figure 2. XRD patterns of samples with S/In ratio of (a) 2/4, (b) 6/4, (c) 10/4, (d) 14/4

The crystallite size of the samples was also calculated using the Sherrer relation below.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta\cos(\theta)} \quad (1)$$

In this equation, λ represents the X-ray beam wavelength (1.54 Å), D is the crystallite size, β is the full width at half maximum (FWHM), θ is the Bragg angle, and 0.9 is the shape factor (Bchiri et al., (2021). The crystallite sizes for the intense (109) XRD peak were calculated. FWHM and crystallite sizes of films with S/In ratios of 2/4, 6/4, 10/4, and 14/4 are determined as (0.4171, 18.9 nm), (0.9799, 8.1 nm), and (0.8326, 9.5 nm), and (0.6106, 13.1 nm), respectively. According to the results, the crystallite sizes of the films vary between 8.1 and 18.9 nm depending on the S/In ratio. As the sulfur content in the solution increases, the crystallite size first decreases and then increases again. SEM images were used to examine the effects of the sulfur ratio on the surface structures of the films. Figure 3 shows the SEM results of the films prepared by changing the sulfur ratios.

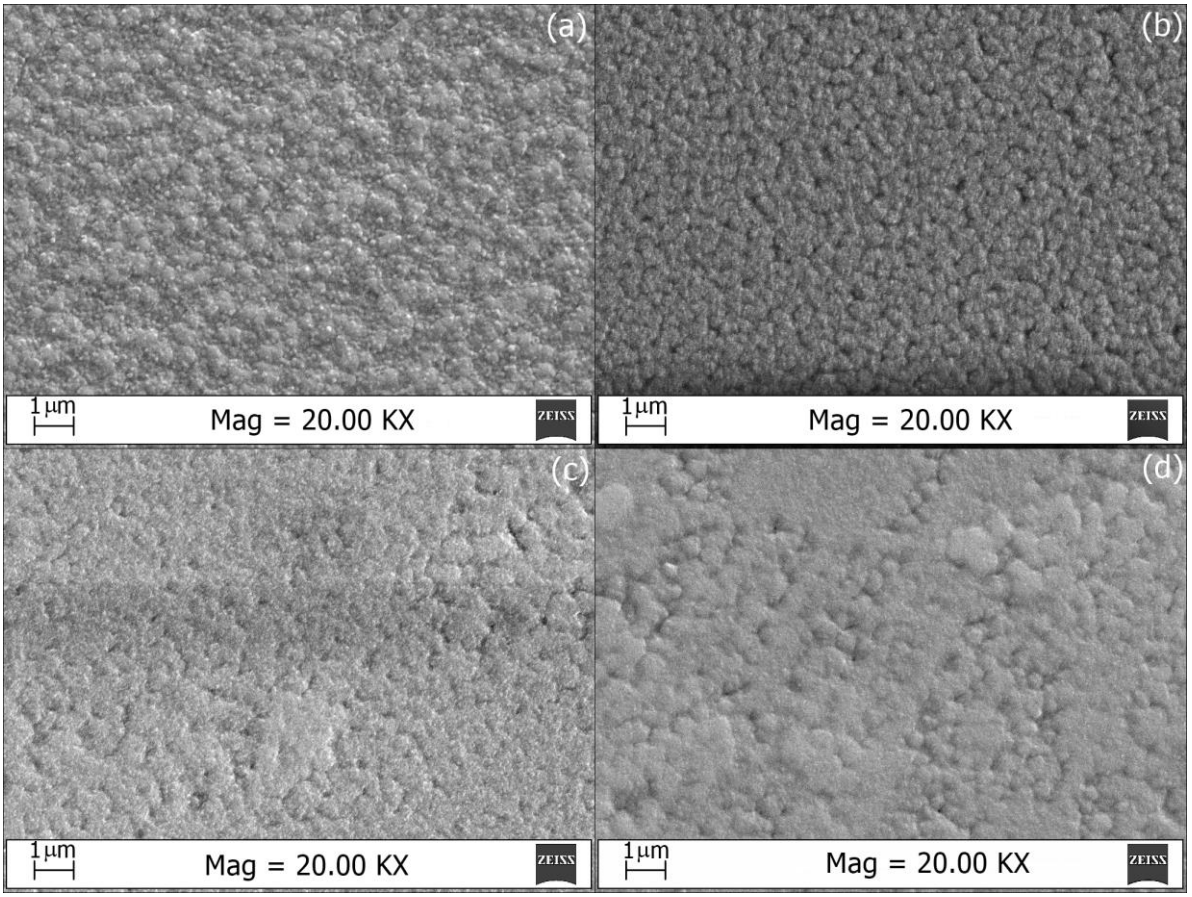


Figure 3. SEM images of samples with S/In ratio of (a) 2/4, (b) 6/4, (c) 10/4, (d) 14/4

According to the SEM images, the surfaces of the films have a granular structure. As the sulfur content increases, the surface structures of the films change. It has been observed in the literature that the amount of sulfur in other sulfur compounds changes the surface structure of the films. For example, SEM images of CZTS films prepared by the sol–gel method showed that a higher amount of sulfur content resulted in a compact, and smooth surface compared to samples sulfurized at lower sulfur concentrations (Ashfaq et al., 2021). A similar result was also observed for $CuInS_2$ thin films. As the sulfuration time increased, a denser structure was observed (Ligang et al., 2015). Therefore, the results obtained are compatible with the literature. In order to determine the optical properties of the prepared thin films, optical transmittance spectra were obtained with UV-Vis spectrometry in the wavelength range of 200 to 1100 nm. Figure 4 shows the optical transmittance spectra of all samples.

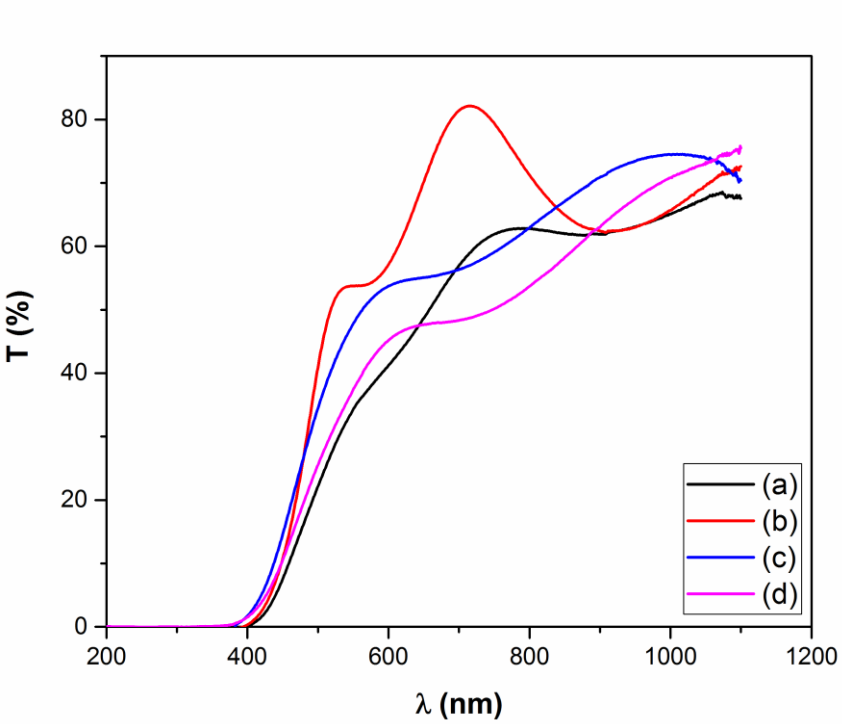


Figure 4. Transmittance spectrum of samples with S/In ratio of (a) 2/4, (b) 6/4, (c) 10/4, (d) 14/4

According to the spectra in Figure 4, it is observed that the optical transmittance over the 700 nm wavelength is 60 % on average in films with an S/In ratio of 2/4. When the S/In ratio is 6/4, there is a significant increase in optical transmittance in the visible region. There are optical studies in the literature based on sulfur content or sulfurization time. Generally, as the sulfurization time increases in sulfur compounds, the optical transmittance of the films also increases. For instance, when the sulfurization time in the SnS semiconductor prepared by the magnetron sputtering method is increased from 10 minutes to 60 minutes, the optical transmittance in the visible region increases from 30 % to 50 % (Gurubhaskar et al., 2018). However, when the S/In ratio exceeds a specific value, the optical transmittance decreases again (Fig.4d). One of the most important information that can be obtained from the optical spectrum is the α absorption coefficient of the films. The absorption coefficient can be determined by the following relation (Chapi et al., 2020).

$$\alpha = \frac{2.303\ A}{d} \tag{2}$$

where A is the absorbance and d is the film thickness. Measurements made with an ellipsometer show that the thickness of the films is approximately 300 nm. On the other hand, it is also possible to determine the forbidden band gaps of films using the Tauc relation below, using the α absorption coefficient (Chapi et al., 2020).

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n \tag{3}$$

In this relation, B is a constant, h is the Planck constant, α is the absorption coefficient, v is the frequency, E_g is the forbidden band gap and $n = ½$ for direct allowed transitions. The slope of the graph of $(\alpha hv)^2$ versus hv in this relation corresponds to the forbidden band gap. Figure 5 shows the slopes of the graph drawn according to this relation.

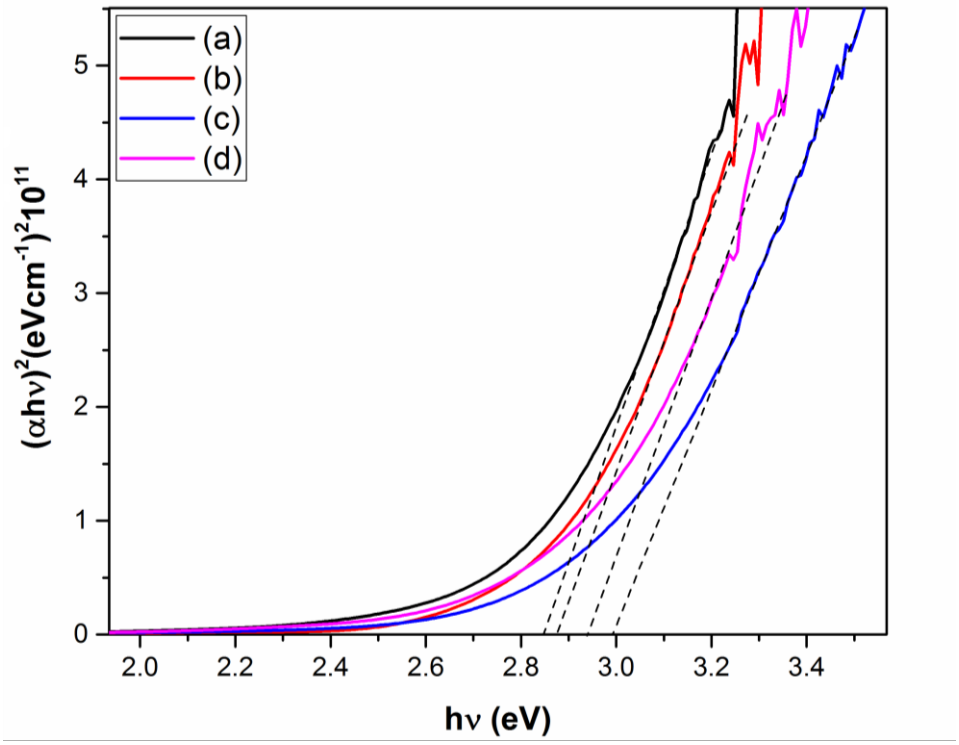


Figure 5. Forbidden band gaps of samples with S/In ratio of (a) 2/4, (b) 6/4, (c) 10/4, (d) 14/4

According to the slopes of the graphs in the figure, the forbidden band gaps of films with S/In ratios of 2/4, 6/4, 10/4, and 14/4 are determined as 2.84, 2.88, 2.99, and 2.94 eV, respectively. It has been observed that the forbidden band gap increases with a certain sulfur content and then decreases again. The widening of the forbidden band gap with increasing sulfur content in sulfur compounds has been recorded in many studies. For example, in the research conducted by Ebrahimi et al. (2017), depending on the Zn/S ratio in ZnS films prepared by the spray pyrolysis method, they showed that, the band gap increased from 3.43 to 3.72 eV as the sulfur ratio increased. Another example of sulfur compounds is the Sb_2S_3 semiconductor. In Sb_2S_3 films prepared by magnetron sputtering method, it was observed that by increasing the sulfurization time, the band gap increased from 1.61 to 1.69 eV and then decreased again (Uc-Canché et al., 2024). Therefore, the change observed in the forbidden band gap depending on the sulfur content in this study is well compatible with the literature. In order to examine the effect of the prepared films on photodetectors, devices with Ag/C/p-Si/n-In_2S_3/Ag structure were prepared. Here, it has been observed that the contacts obtained by first applying carbon paste and then silver on p-type silicon are ohmic. Semi-logarithmic IV curves recorded in the dark environment of the devices prepared by coating In_2S_3 films on the polished surface of silicon are given in Figure 6.

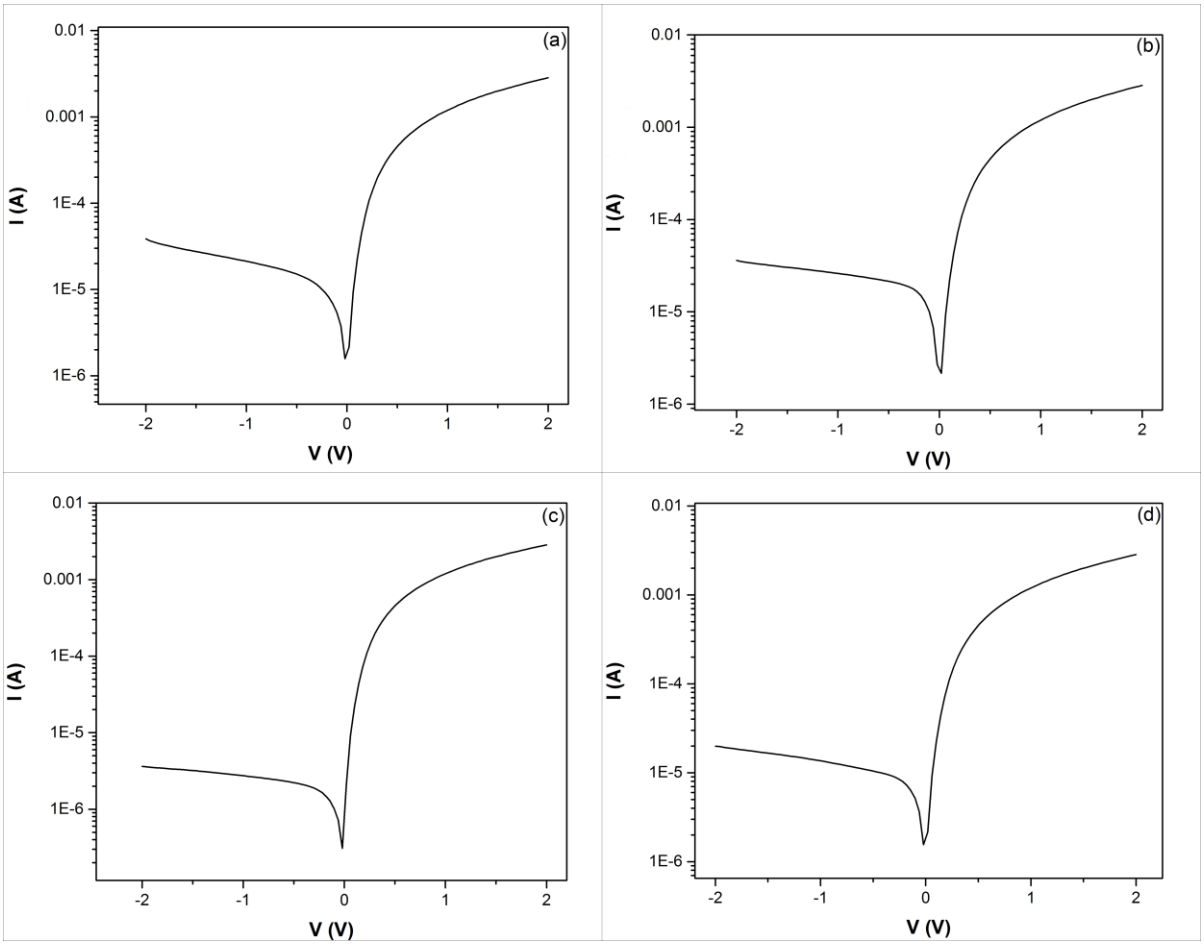


Figure 6. Semi-logarithmic IV curves of devices with S/In ratio of (a) 2/4, (b) 6/4, (c) 10/4, (d) 14/4

As seen in Figure 6, all devices show diode characteristics. According to this result, In_2S_3 films form a pn junction structure with p-type silicon. In order to observe the reactions of these devices under light, an LED source emitting white light of 5 mW/cm^2 was used. In Figure 7, the change graph of the current of the prepared photodetectors depending on time in the dark, and light environment at zero external voltage is given.

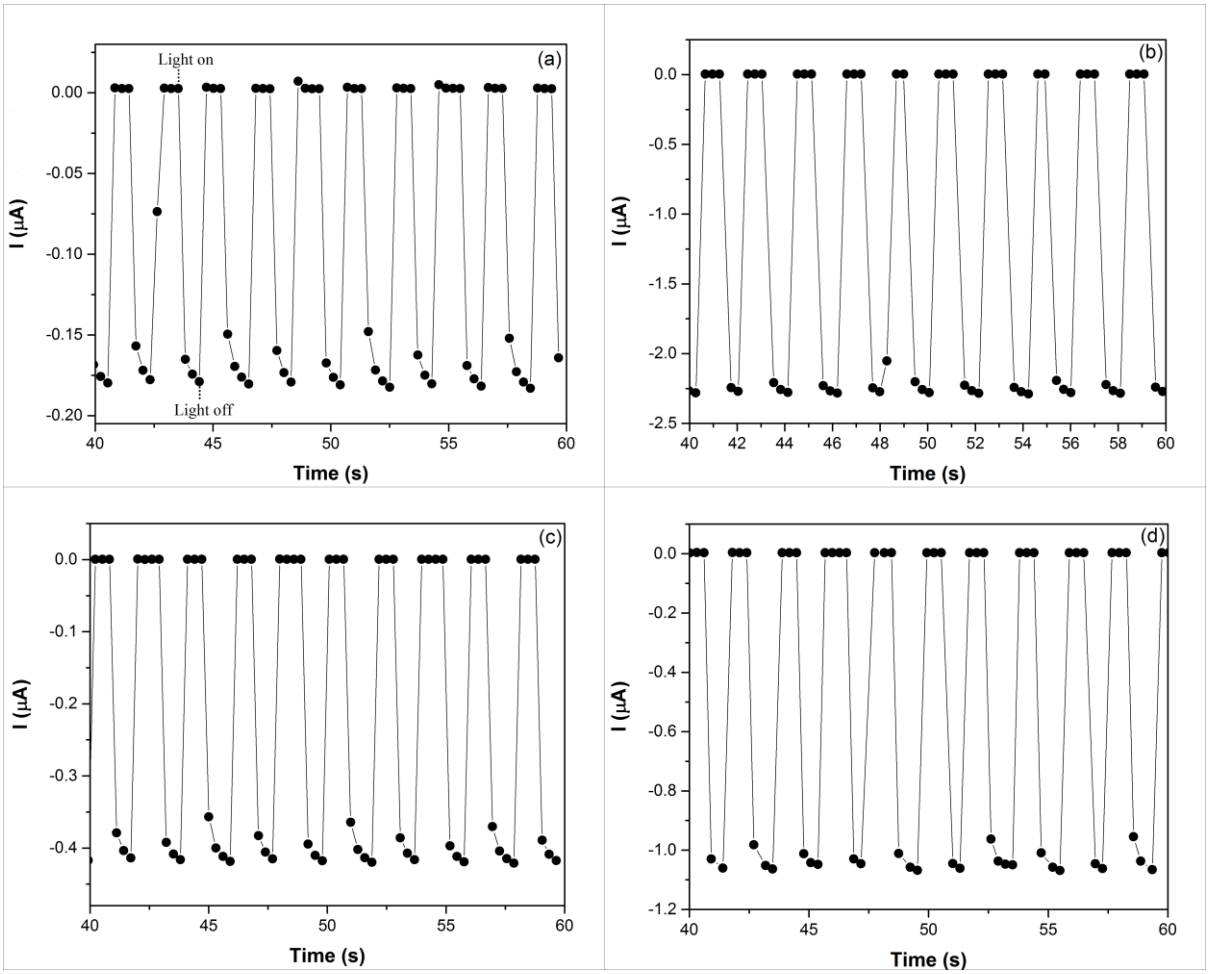


Figure 7. Current-time graph of devices with S/In ratio of (a) 2/4, (b) 6/4, (c) 10/4, (d) 14/4

As seen in the figure, when the light is turned on, current passes through the circuit quickly and when the light is turned off, it quickly returns to its previous value. The is because that light falls on the *pn* junction region formed between the p-Si semiconductor and the n-In_2S_3 semiconductor and excites the electrons in that region and turns them into photocurrent. To scale this rate of change in current, rise and decay time parameters are measured in photodetectors. When the light is turned on, the rise time of a photodetector is the amount of time it takes for the photocurrent to increase from 10% to 90%. Alternatively, decay time is the amount of time it takes for the current to drop from 90% to 10% when the light is switched off. (Kumar et al., 2019). Figure 8 shows the time parameters of photodetectors prepared with films with a S/In ratio of 2/4. As seen in Figure 8, the rise and decay times for these devices were recorded as 0.25 and 0.23 s, respectively. These response times are quite short for a photodetector. It means that the device responds quickly to light. The time parameters of other devices with S/In ratios of 6/4, 10/4 and 14/4 are calculated as (0.41 s, 0.30 s), (0.24 s, 0.22 s), and (0.24 s, 0.39 s), respectively. The time parameters of all devices are approximately in the same order.

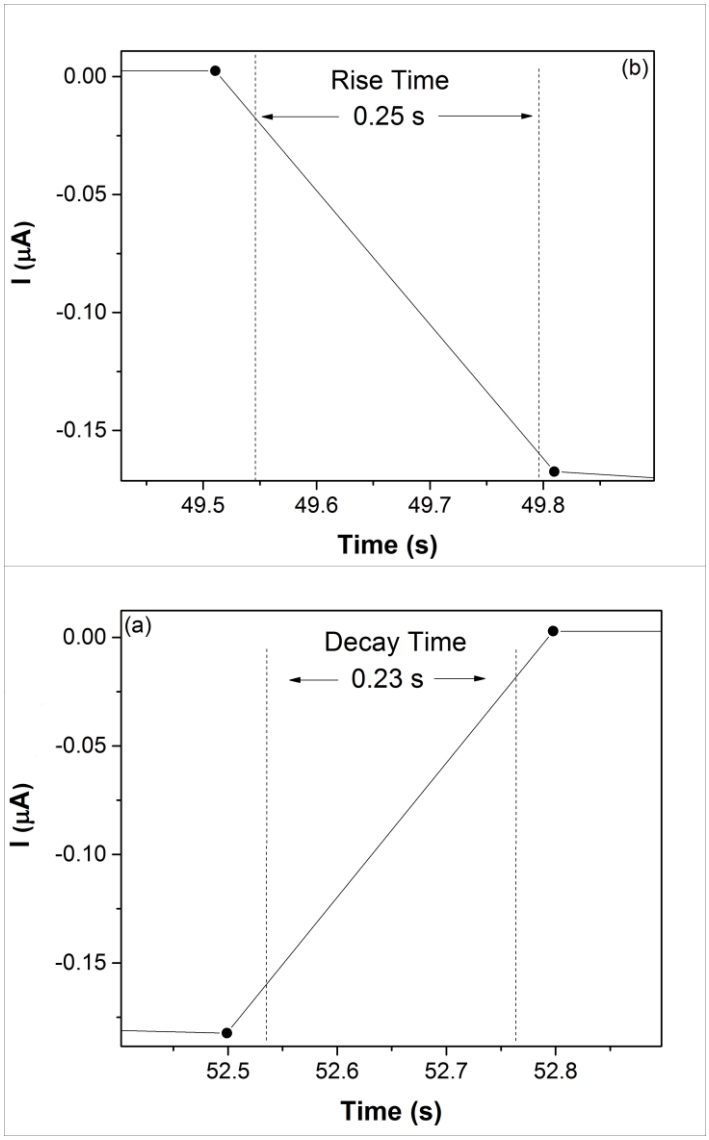


Figure 8. (a) Rise and (b) decay times of device with S/In ratio of 2/4

Kumar and his colleagues (2019) recorded rise and decay times of 3.75 and 3.68 seconds under visible light in MSM type photodetectors obtained with In_2S_3 films prepared by thermal evaporation method. Therefore, the values obtained in this study are quite low compared to those of similar studies in the literature. On the other hand, the dark currents of the prepared devices are determined as 2.7×10^{-9} A, 3.5×10^{-9} A, 3.7×10^{-10} A, and 3.4×10^{-9} A, respectively. These dark current values are also quite low. It is preferred for photodetectors to have low dark current. The maximum current values that can be obtained from the devices when the light is turned on are 1.8×10^{-7} A, 2.3×10^{-6} A, 4.0×10^{-7} A, and 1.0×10^{-6} A, respectively. It can be seen that the current changes significantly under light for all devices. The following formulas are used to calculate the photodetector's photosensitivity (Aslan et al., 2024).

$$I_P = I_I - I_D \tag{4}$$

$$S = \frac{I_P}{I_D} \tag{5}$$

where, S is the photosensitivity, I_p is the photo-current, I_D is the dark current, and I_I is the current under the light. For devices with S/In ratios of 2/4, 6/4, 10/4 and 14/4, photosensitivity is calculated as 177, 2296, 3996, and 293, respectively. According to these results, the S/In ratio in In_2S_3 films significantly affects the interaction of the devices with light. Maximum photosensitivity was observed in samples with an S/In ratio of 10/4. The values obtained in this study are higher than similar studies in the literature. For instance, Salam et al. (2024) observed a photosensitivity of 177 under visible light with In_2S_3-based heterojunction photodetectors prepared by spray the pyrolysis method. The photoresponsivity and specific detectivity parameters of the prepared photodetectors were calculated with the following equations (Gong et al., 2023).

$$R = \frac{I_P}{P_{in}A_o} \tag{6}$$

$$D = R\left(\frac{A_o}{2qI_D}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

where, R is the photoresponsivity, P_{in} is the light power density, A_o is the active surface area of the device, and q is the elementary charge. The active surface areas of the samples were measured as approximately 0.05 cm^2. The parameters calculated using these equations are given in Table 1.

Table 1. Parameters of the prepared photodetectors and comparison with other studies

Device structure	Rise time (s)	Decay time (s)	Sensitivity (S)	Responsivity (A/W)	Detectivity (Jones)	Ref.
n-In_2S_3/p-Si	0.25	0.23	177	7×10^{-4}	5.3×10^{9}	This study
n-In_2S_3/p-Si	0.41	0.30	2296	9×10^{-3}	6.0×10^{10}	This study
n-In_2S_3/p-Si	0.24	0.22	3996	2×10^{-3}	6.2×10^{10}	This study
n-In_2S_3/p-Si	0.24	0.39	293	4×10^{-3}	2.7×10^{10}	This study
n-In_2S_3/glass	0.7	0.7	2.45	3.1×10^{-3}	1.2×10^{9}	Kumar et al., (2019)
n-In_2S_3/glass	19	71	0.96	3.7×10^{-6}	7.5×10^{7}	Bchiri et al., (2021)
n-In_2S_3/F-SnO_2	9.2	17.5	177	1.2×10^{-3}	4.0×10^{10}	Salam et al., (2024)

As seen in the table, photoresponsivity values of the samples can go up to 9×10^{-3} A/W. The highest specific detectivity determination was 6.2×10^{10} Jones. As seen in the table, these results are higher than those of similar studies in the literature. The obtained time parameters also show that the devices respond to light in a short time. Especially the low decay time indicates that the electrons excited at the In_2S_3 and silicon interface are not trapped significantly in the forbidden band gap while returning to the valence band. For example, in his detailed study on CdS and CdSe semiconductor-based photoconductors, Skarman (1965) showed that the trap density in the forbidden band region significantly affects the decay time. He emphasized that, decay time could be 50 times lower in materials with low trap density. Therefore, when compared to other studies in the literature, it can be thought that, the lower time

parameters of the devices prepared in this study are due to less dense trapping centers. This is the preferred situation for photodetectors.

4. Conclusion

In this study, In_2S_3 semiconductor films were produced by the solution method. By changing the amount of chemicals in the solution, four different films were prepared depending on the S/In molar ratio. XRD results show that the films crystallize in a tetragonal crystal structure. XRD results also show that oxide phases are formed in films with low sulfur content. The band gaps of the samples vary between 2.84 and 2.94 eV. SEM images reveal that the samples have a granular structure. Furthermore, In_2S_3 films were coated on p-type silicon and heterojunction structures were obtained. The formation of pn junction structures was confirmed by IV curves. According to the results of the analysis performed under visible light, the samples create photocurrent under zero voltage. The rise and decay times of the prepared photodetectors are under 1 second. The highest photosensitivity, photoresponsivity, and specific detectivity values were recorded as 3996, 9×10^{-3} A/W, and 6.2×10^{10} Jones, respectively. As a result, In_2S_3 films are an extremely suitable semiconductor for obtaining heterojunction structures with p type silicon semiconductors. Additionally, this study shows that the S/In ratio plays a critical role in the In_2S_3 material.

Conflict of interest

The author declare that have no competing interests.

Consent for publication

The author declares that she has contributed 100% to the article.

Abbreviations

MSM: Metal-semiconductor-metal
XRD: X-ray diffraction
SEM: Scanning electron microscopy
LED: Light emitting diode
R: Photoresponsivity
D: Specific detectivity
P_{in}: Light power density
A_o : Active surface area
q: Elementary charge
S: Photosensitivity,
I_p: Photo-current,
I_D : Dark current, and
I_I : Current under light
h: Planck constant,
α: Absorption coefficient,
v: Frequency,
E_g : Forbidden band gap
A : Absorbance
d : Film thickness

References

Agrohiya S., Kumar V., Rawal I., Dahiya S., Goyal PK., Kumar V., Punia R. Fabrication of n-TiO_2/p-Si photo-diodes for self-powered fast ultraviolet photodetectors. Silicon 2022; 14: 11891–1190.

Ahmad I., Zou Y., Yan J., Liu Y., Shukrullah S., Naz MY, Hussain H., Khan QW., Khalid NR. Semiconductor photocatalysts: A critical review highlighting the various strategies to boost the photocatalytic performances for diverse applications. Advances in Colloid and Interface Science 2023; 311: 102830.

Al-Ani SKJ., Ismail RA., Al-Ta'ay HFA. Optoelectronic properties n:CdS:In/p-Si heterojunction photodetector. J Mater Sci: Mater Electron 2006; 17: 819–824.

Ashfaq A., Jacob J., Mahmood K., Mehboob K., Ikram S., Ali A., Amin N., Hussain S., Rehman U. Effect of sulfur amount during post-growth sulfurization process on the structural, morphological and thermoelectric properties of sol-gel grown quaternary chalcogenide Cu_2ZnSnS_4 thin films. Physica B: Condensed Matter 2021; 602: 412497.

Aslan E., Kaya D., Karadağ K., Harmancı U., Aslan F. Enhancing performance of SnS_2 based self-powered photodetector and photocatalyst by Na incorporation. Ceramics International 2024; 50(15): 27626-27634.

Bchiri Y., Tiss B., Bouguila N., Souissi R., Kraini M., Vázquez-Vázquez C., Khirouni K., Alaya S. Electrical investigation of sprayed In_2S_3 film. Materials Science in Semiconductor Processing 2021; 121: 105294.

Chapi S. Optical, electrical and electrochemical properties of PCL5/ITO transparent conductive films deposited by spin-coating – Materials for single-layer devices. Journal of Science: Advanced Materials and Devices 2020; 5(3): 322-329.

Ebrahimi S., Yarmand B., Naderi N. Effect of the sulfur concentration on the optical band gap energy and urbach tail of spray-deposited ZnS Films ACERP 2017; 3(4): 6-12.

Gong K., Li L., Yu W., Mu H., Yuan J., Hao R., Liu B., Mei Z., Mei L., Li H., Lin S. High detectivity and fast response avalanche photodetector based on GaSe/$PtSe_2$ p–n junction. Materials & Design 2023; 228: 111848.

Gurubhaskar M., Thota N., Raghavender M., Chandra GH, Prathap P., Subbaiah YPV. Influence of sulfurization time on two step grown SnS thin films. Vacuum 2018; 155: 318-324.

Hankare PP., Chate PA., Sathe DJ. CdS thin film: Synthesis and characterization. Solid State Sciences 2009; 11(7): 1226-1228.

Khan MI., Bhatti KA., Qindeel R., Althobaiti HS., Alonizan N. Structural, electrical and optical properties of multilayer TiO_2 thin films deposited by sol–gel spin coating. Results in Physics 2017; 7: 1437-1439.

Kumar B., Kumar MC. Indium sulfide based metal-semiconductor-metal ultraviolet-visible photodetector. Sensors and Actuators A: Physical 2019; 299: 111643.

Kumar H., Shaji B., Kumar MC. Fabrication of visible light photodetector using co-evaporated Indium Sulfide thin films. J Mater Sci:Mater Electron 2019; 30: 17986–17998.

Ligang W., Yanlai W., Wei Y., Jun Z., Jingang X. Effect of sulfurization time on the formation of $CuInS_2$ thin films. Rare Metal Materials and Engineering, 2015; 44(4): 805-807.

Lin P., Lin S., Cheng S., Ma J., Lai Y., Zhou H., Jia H. Optical and electrical properties of Ag-doped In_2S_3 thin films prepared by thermal evaporation. Advances in Materials Science and Engineering 2014; ID 370861.

Moger SN., Mahesha MG. Spectroscopic and electrical analysis of p–Si/n-ZnS_xSe_{1-x} ($0.0 \leq x \leq 1.0$) heterostructures for photodetector applications. J Mater Sci: Mater Electron 2023; 34: 958.

Muchuweni E., Sathiaraj TS., Nyakotyo H. Synthesis and characterization of zinc oxide thin films for optoelectronic applications. Heliyon 2017: 3(4): e00285.

Robin MSR., Rahaman MM. A comparative performance analysis of CdS and In_2S_3 buffer layer in CIGS solar cell, 2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE*)*. Rajshahi, Bangladesh 2016; 1-4, doi: 10.1109/ICECTE.2016.7879639.

Salam JA., Anand AM., Raj A., Nath A., Jayakrishnan R. Self-powered response in β-In_2S_3 thin films. Journal of Science: Advanced Materials and Devices 2024; 9(1): 100671.

Uc-Canché S., Camacho-Espinosa E., Mis-Fernández R., Loeza-Poot M., Ceh-Cih F., Peña JL. Influence of sulfurization time on Sb_2S_3 synthesis using a new graphite box design. Materials 2024; 17: 1656.

Wang H., Sun Y., Chen J., Wang F., Han R., Zhang C., Kong J., Li L., Yang JA. Review of perovskite-based photodetectors and their applications. Nanomaterials (Basel) 2022; 12(24): 4390.

Wang N., Bai Y., Zhao F., Yang X., Gu F., Wang S., Li J., Fu H., An X. Hydrothermal synthesis of La-doped In_2O_3 nanosheets-assembled microflowers for sensing n-butanol. J Mater Sci 2024; 59: 15408–15421.

Wei A., Liu J., Zhuang M., Zhao Y. Preparation and characterization of ZnS thin films prepared by chemical bath deposition. Materials Science in Semiconductor Processing 2013; 16(6): 1478-1484.

Qin Y., Long S., Dong H., He Q., Jian G., Zhang Y., Hou X., Tan P., Zhang Z., Lv H., Liu Q., Liu, M. Review of deep ultraviolet photodetector based on gallium oxide. Chinese Physics B 2019; 28(1): 018501.

Zhang Y., Hu M., Wang Z. Enhanced performances of p-Si/n-ZnO self-powered photodetector by interface state modification and pyro-phototronic effect. Nano Energy 2020; 71: 104630.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1795-1815, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1795-1815, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

A Child-Centered Approach to User-Oriented Design in Restricted Areas: The Case of Osmaniye Temporary Shelter

Elife BÜYÜKÖZTÜRK[1*]

[1]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mimarlık Tasarım ve Güzel Sanatlar Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 80010, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0001-8616-3641
*Sorumlu yazar: ebuyukozturk@osmaniye.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 04.01.2025
Accepted: 04.05.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Temporary shelters
User centered design
children
Osmaniye temporary accommodation center

ABSTRACT

When a user-oriented design in restricted temporary shelter areas is interpreted through children, the idea that such a relationship may create a paradox emerges. Considering that these areas are generally used after disasters, it is natural that the sudden, rapid, and unplanned construction process cannot be carried out with a participatory design approach. In this article, the feasibility of designing while considering children's needs in a post-earthquake temporary shelter center, which defines an inward-oriented and limited space in the city of Osmaniye, is questioned.Based on this, data were collected and analyzed using two methods identified for revealing children's demands in the process of developing a user-oriented design: passive observation and interviews conducted with parents.In line with the findings obtained, design proposals covering the interior and exterior spaces of containers specific to the Osmaniye temporary shelter area have been developed.

Sınırlandırılmış Alanlarda Kullanıcı Odaklı Tasarıma Çocuk Merkezli Bir Yaklaşım: Osmaniye Geçici Barınma Alanı Örneği

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 04.01.2025
Kabul tarihi: 04.05.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Geçici barınma merkezleri
Kullanıcı merkezli tasarım çocuklar
Osmaniye geçici barınma merkezi

ÖZ

Sınırlandırılmış geçici barınma alanlarında kullanıcı odaklı bir tasarımın çocuklar üzerinden okuması yapıldığında böyle bir ilişkinin paradoks oluşturabileceği düşüncesi ortaya çıkar. Bu alanların genellikle afet sonrası kullanımını da göz önünde bulunduracak olursak; ani, hızlı ve plansız inşa sürecinin katılımcı tasarım pratiği ile yürütülememesi olağandır. Bu makalede, Osmaniye kentinde yer alan ve içe dönük, sınırlı bir alanı tarifleyen deprem sonrası geçici barınma merkezinde, çocukların ihtiyaçları gözetilerek tasarım yapmanın mümkünlüğü sorgulanmaktadır. Buradan hareketle, çalışmada kullanıcı odaklı bir tasarım geliştirme sürecinde, çocukların taleplerini ortaya çıkarmanın iki yöntemi olarak belirlenen pasif gözlem ve ebeveynlerle yürütülen mülakatlar aracılığıyla veriler toplanmış ve analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda; Osmaniye geçici barınma alanı özelinde konteynerlerin iç ve dış mekânlarını kapsayan tasarım önerileri geliştirilmiştir.

To Cite: Büyüköztürk E. A Child-Centered Approach to User-Oriented Design in Restricted Areas: The Case of Osmaniye Temporary Shelter. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1795-1815.

1. Introduction

The earthquakes centered in Kahramanmaraş and Hatay that occurred in February 2023 caused destruction in 11 provinces and led to the loss of many lives. After the search and rescue and emergency

relief phases, disaster victims whose homes were severely damaged and rendered uninhabitable were relocated to temporary shelter facilities to continue their lives. One of the important issues to be addressed after the earthquake is the period that people go through until they are able to settle into permanent housing. During this period, in which disaster victims aim to recover from the material and emotional impacts of the earthquake and return to their daily routines, the shelters they reside in have a significant impact on their lives. Despite nearly two years having passed since the earthquake, many victims still continue to live in these temporary shelter areas.

Petti (2015) stated that these types of shelter areas, considered a form of temporary accommodation, generally consist of containers and are inhabited by people from various demographic backgrounds living within limited spaces. In order to meet the housing needs of those affected by the earthquake simultaneously, a large number of temporary housing units must be produced and set up rapidly, which necessitates urgent management of the process and often leads to certain complications. When the literature on temporary shelter areas is examined, it becomes apparent that the functional layouts are often similar, and the container units are typically derived from standard design templates. Although each geography and region has its own inherent conditions, the use of standardized designs for these structures has been critically addressed in various academic studies. Additionally, there is literature highlighting the inadequacy and poor quality of socialization spaces within container settlements. While still not at a sufficient level, some initiatives do exist in this regard. One such example is the Super Adobe Library (XXI, 2024), designed within a temporary shelter area in Kahramanmaraş, the epicenter of the 2023 earthquake.

There are numerous academic studies on temporary shelter centers. Especially following the 2023 Pazarcık earthquake, temporary shelter centers have been examined from various perspectives in the literature. Avlar et al. (2023) explored the potential use of modular and cross-braced systems, developed design parameters, and accordingly designed a CLT E-BOX. Genç and Yılmaz (2024) emphasized the importance of not overlooking recreational spaces in the design of temporary shelter areas. Ünal and Akın (2023) examined temporary disaster housing in terms of user satisfaction. Büyüköztürk and Oral (2023) investigated site selection for temporary settlement areas after the earthquake using the Delphi method from the perspective of experts, and also conducted a user satisfaction analysis. They found that both analyses revealed similar problems and solutions. Giyik (2024) evaluated the temporary shelter practices in Nurdağı, Gaziantep in terms of adequacy, functionality, and quality. Ayvaz and Arpacıoğlu (2024) analyzed a container model proposal developed by students for post-disaster temporary housing areas. İlhan et al. (2024) conducted an ergonomic analysis of temporary shelter centers. Kalkan et al. (2024) examined the adequacy of emergency gathering areas in Malatya following the February 6, 2023 earthquake. Abanoz and Vural (2023) conducted a comparative analysis of temporary disaster housing used in Turkey and around the world and developed a new model proposal. Vural Arslan and Gülay (2023) experimented with the production of different container models in the post-earthquake process.

However, the existing literature is limited in terms of looking at the temporary shelter process from the point of view of the child user. On the other hand, in practice, designing with children in mind is limited to playgrounds made of plastic materials and libraries that serve as storage. Moreover, the accommodation process in temporary shelters, which is defined as a healing process, requires more caution towards children. In their study, Limoncu and Atmaca (2018) state that this issue should be approached more sensitively by stating that “the fact that children's life experiences are less than adults leads to the need to treat them more carefully”.

In this context, the study focuses on how to design spaces with consideration for child users, and proposes design solutions encompassing both interior and exterior spaces, based on the example of a temporary shelter area in the province of Osmaniye. In light of these proposals, the aim is to create functional and effective spaces by approaching the design of post-earthquake temporary shelter areas from the perspective of children.

2. Conceptual Framework

Under this heading, a review of the existing literature on temporary shelters and user-oriented design approaches for children was conducted.

2.1. Temporary Accommodation Areas

Temporary housing refers to permanent and non-permanent housing that can be transported by a vehicle or is itself a vehicle. This term includes caravans, prefabricated housing, modular housing and disaster housing. This type of housing can be used by low-income people for vacation purposes (Sigfusson, 1997) as well as during disasters, migration and war (Tuncel, 2007).

Temporary accommodation units, which have been encountered for different reasons and uses in the process, first emerged as an indicator of the nomadic lifestyle. In the 17th century, horse-drawn carriages with working and sleeping areas were encountered (Günay and Engin, 2023). During the Second World War, temporary dwellings were allocated for the part-time accommodation of the labor group (Sigfusson, 1997). In the 20th century, mobile homes, which were widely used as secondary housing in areas with recreactive appeal, are now on the agenda with different areas of use.

2.2. The Place of the Child in User-Centered Design

As the user, the human being is at the center of space design. Schulz expresses this phenomenon where human is the focus of design as follows: “The location of the human being is the center of the 'Human Centered Design Approaches' space and the space is shaped according to human actions” (Schulz, 1971). In this respect, designers sometimes play the role of an interpreter who transfers user ideas to the project design process, and in some cases, they are in the role of producing the construction processes together with the users (Dereli, 2009). This design approach became widespread after Elizabeth Sanders pointed out in her article published in 1992 that the reason for the failure of the products on sale to meet expectations was that they were designed without taking users into account (Toros, 2020).

Since 1992, designing projects with a holistic understanding of the functional, physical and emotional needs of users has been one of the most discussed topics in design (Kuru, 2015). Law and Van Schaik (2010) state that creating user-centered design guidelines has become important for design research in this design approach that models the “user's experience”. This method, which includes the user in the research, addresses the underlying causes of the problem and makes it possible to discover current and valid designs.

This approach, which emerged as a reaction to methods that focus on the human and prioritize functionality (Steen et al., 2007), aims to design by seeing things from the user's perspective and developing a holistic understanding of product and space use (Kensing and Blomberg, 1998). In addition to making users a part of the design process, the user-centered design approach considers design together with its context in order to achieve unique designs (Toros, 2020). Thus, the process starts with context research and comprehensive observation/exploration. It then aims to develop design proposals (Design Council, 2020). In this process, it is necessary to analyze the user profile and needs correctly in order to obtain an innovative design with effective use.

In recent years, approaches in which children are both the subject and the object of design have come to the forefront (Christensen and James, 2008). Çukur (2009) conducted a study on the design of play areas inside and outside residential spaces for children. Nooraddin (2020) examined urban transformation projects carried out in Scandinavian countries with consideration for the needs of children aged 12-17. Many studies have been conducted on this topic, which has been the focus of attention for academics and some private architecture firms. Architecture firms such as Superpool and Şehir Dedektifi have made significant contributions in this field. These interdisciplinary firms aim to create child-friendly cities by observing and understanding the relationship children establish with urban spaces (Şevli, 2024).Şahin and Türkün Dostoğlu (2012), in their studies on kindergartens, emphasized the importance of incorporating children's opinions about the spaces they use into the design process. Zenter et al. (2024) initiated a discussion on child-friendly cities in a design studio setting after the February 6 earthquake, examining the topic within the scope of special education campuses. Gallacher (2016) explored young children's perceptions of their environments and highlighted their active role in shaping their surroundings. Büyükçınar and Özemir (2022) conducted a pilot study involving children in the organization of their own educational environments. Süner and Erbuğ (2018) investigated how child users are positioned within the design process. Arın and Özsoy (2015) addressed child participation in urban design processes in their study. Gülay Taşçı (2014) examined urban planning processes within the framework of children's right to participate. Başaran Uysal (2015) discussed the experiences of a volunteer women's group that came together to improve children's playgrounds in a medium-sized city. Curaoğlu and Çobanlar (2020) researched the role of children as stakeholders in space and furniture design through a case study conducted during the pandemic. These studies particularly emphasize that childhood—a crucial period for laying the foundation for learning—is often overlooked, and this group is frequently disregarded. Child-centered approaches support designs that take children's interests and

needs into account, enabling them to recognize and develop their own abilities (Büyükçınar and Özemir, 2022).

In this design approach, surveys and interviews conducted with children and parents play a significant role. Guha et al. (2004) point out two ways to uncover children's needs during the development phase of a user-centered design. The first approach suggests that ideas can be drawn from children's limited writing skills, verbal expressions, and drawings. The second emphasizes focusing on parents who are closely involved with their children. Both methods are frequently used in child-centered design research. Moreover, there are numerous studies that address the participation of children and parents in the "design decisions" of child-specific spaces (Sheat and Beer, 1989; Clark, 2005; Koralek and Mitchell, 2005; Hofmann, 2013; Bedell et al., 2011; Şahin and Türkün Dostoğlu, 2012).

In this study, it is aimed to develop design proposals by taking into account the opinions and suggestions of children regarding playgrounds and living spaces in the temporary shelter area.

3. Material And Method

3.1.Characteristics of the Study Area

The study sample area is the temporary shelter center in Osmaniye province, which is located in the Fakıuşağı Neighborhood in the city center, adjacent to the southern ring road, in the Karaçay stream bed.

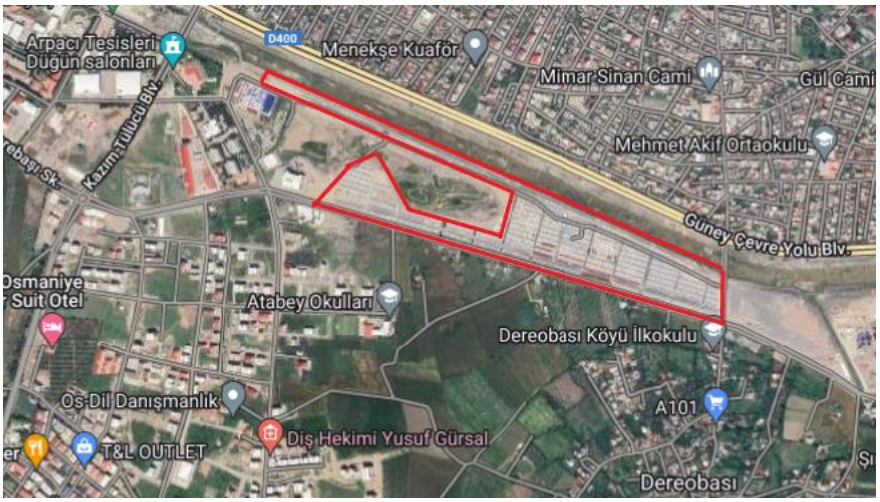


Figure 1. Osmaniye Temporary Accommodation Area (Büyüköztürk and Oral, 2023)

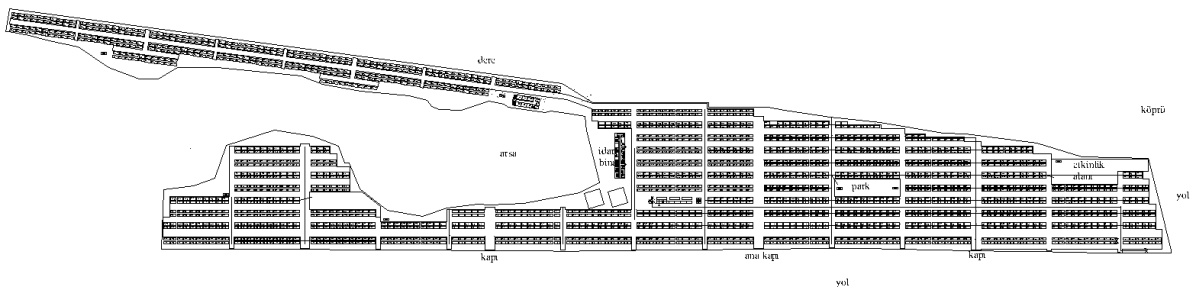


Figure 2. Site Plan of Osmaniye Temporary Settlement Area (Büyüköztürk and Oral, 2023).

The area, which has been in use for nearly two years, is surrounded by wire fencing and is subject to strict monitoring and control mechanisms. Within the site, there are 2,063 container units, arranged along horizontal and vertical axes divided by roads measuring between 8 to 15 meters in width. The Osmaniye temporary shelter center, located within a 182-decare (Büyüköztürk and Oral, 2023) fenced area, includes several child-focused spaces: a library container, a daycare center, a Turkish Red Crescent children's tent, a youth center container, and a single children's playground.

The interior of the containers, produced using standardized designs, includes seating areas, a kitchen counter, a bathroom, and a bedroom (Büyüköztürk and Oral, 2023).

3.2. Method

The method of the study is designed based on a qualitative research design. The key feature of qualitative research is its ability to examine situations within their natural environments. This study is structured as a case study, which is one of the qualitative research approaches. A case study is used to investigate a situation that occurs in daily life or a context that develops within that situation (Creswell, 2020). It is believed that evaluating an extraordinary situation such as a disaster through on-site observation and interview techniques will contribute to producing more accurate results, and the flowchart provided in Figure 3 has been followed in the study.

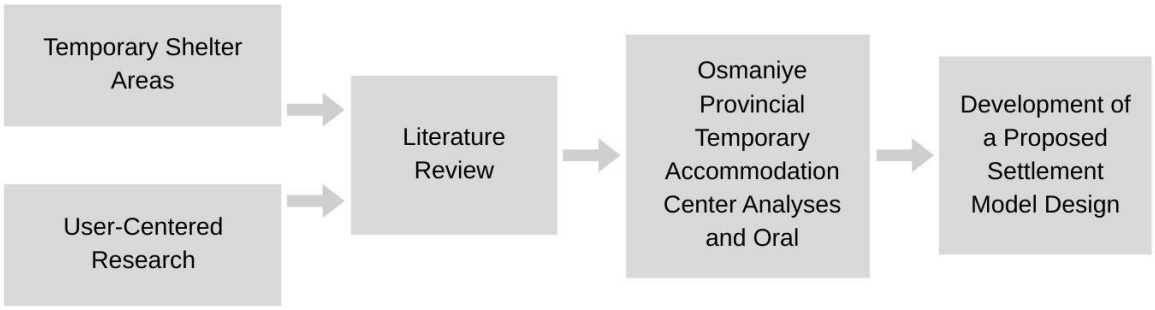


Figure 3. Work Flow Chart

In the first step of the study, national and international academic documents were reviewed, and the data obtained were used to form the theoretical framework of the study. After the literature review, observation and interview techniques were employed to collect data about the child user profile at the Osmaniye temporary shelter center. These data were then analyzed and evaluated. The field site was visited multiple times during different seasons and at various times of the day to analyze the children's use of the space. During the observations in the area, the passive observation technique was used, and no intervention was made in the children's activities. In this phase of the study, the method of interviewing parents, described by Guha et al. (2004) as a way to understand children's needs and demands, was preferred. Semi-structured interviews were conducted with 13 parents of children aged 0-10 years who agreed to participate in the research (Table 1).

Table 1. Information about the interviewees

	Gender	Number of Children
Interviewer 1	Woman	1
Interviewer 2	Woman	2
Interviewer 3	Woman	6
Interviewer 4	Woman	7
Interviewer 5	Woman	2
Interviewer 6	Woman	2
Interviewer 7	Woman	3
Interviewer 8	Woman	2
Interviewer 9	Woman	4
Interviewer 10	Male	5
Interviewer 11	Woman	2
Interviewer 12	Woman	1
Interviewer 13	Male	1

In the research, data was recorded only by taking notes with pen and paper, and no audio or video recording was made. Participants were generally asked questions to understand the shortcomings and wishes of children in the interior and exterior of the temporary shelter area. The interviews and observations provided the opportunity to actually enter into the events and develop empathy with the users of the space. In the last stage, the data obtained were deciphered and an improvement project was prepared in Osmaniye temporary accommodation center and evaluated by the interviewed families. From this point of view, design suggestions have been developed on the temporary accommodation areas established after the disaster in order to prevent similar problems in other disasters.

4.Results

At this stage of the study, the data obtained from the observations and interviews conducted during the field survey were analyzed under two main headings: interior and exterior space. The first section traces the adequacy of the interior space of the containers and the extent to which it allows for children's activities, while the second section aims to examine the exterior space of the temporary accommodation center from the perspective of child users.

4.1. Container Interior Analysis

In the temporary accommodation center, there are families with a single child as well as families with six or seven children. One of the frequently criticized issues specific to this area is that all families are provided with containers of the same size, without considering their demographic structure in terms of layout and dimensions. Field observations have revealed that families with a higher number of children lay mattresses or floor cushions on the ground for sleeping and store these beds on bunk beds during the day.

During interviews, participants stated that the interior space of the containers is extremely limited, making it difficult to find space for their belongings and preventing them from creating a dedicated area for their children.

"Unfortunately, there is nothing belonging to the child inside..." (Interviewee 1).

"There is a coffee table and they both study together" (Interviewee 2).

"There are beds, furniture everywhere, you can look..." (Interviewee 3).

"There is nothing extra, standard..." (Interviewee 12).

Container residents have described children's lives, especially during the winter months, as being "like a prison." During interviews, parents frequently expressed their concern about their children spending most of their time in front of the TV and tablet.

"There are two seats in a room. What are the children going to spend time with, the TV is always on..." (Interviewee 11).

"When the weather is nice, children can play outside. But when it rains, they are inside, they have nothing to do..." (Interviewee 7).

4.2. Container Exterior Analysis

According to the observation and interview reports of the study, it was determined that parents generally had a low level of satisfaction with the playground. Parents described their dissatisfaction with the playground, which does not allow for different activities, as follows:

"The area is very big, but the games that children can play are limited..." (Interviewee 1).

"Instead of building such a park, if it were empty, children would at least play ball..." (Interviewee 10).

"Children cannot release their energy, the area is large but its use is wrong..." (Interviewee 11).

In addition, the presence of factory-produced, fixed, standard playground equipment, which is frequently discussed with critical readings in many studies, limited children in play production and was criticized by parents in the interviews.

"Plastic playground, the same as everywhere..." (Interviewee 12).

"It is the same as the park everywhere..." (Interviewee 13).

In the oral interviews conducted at the temporary accommodation center, when parents were asked about their suggestions for the playgrounds established in the area, it was revealed that families generally described spaces where their children could play freely. Some parents stated that it would be more appropriate to use materials found in nature and easily available in the post-earthquake period instead of plastic materials.

"Tracks where children could jump and jump easily could have been established. Three wooden wheels can be set up side by side, and children would enjoy it more..." (Interviewee 2).

"Playgrounds that would develop children's sense of discovery and curiosity would attract their attention more..." (Interviewee 4).

"Children love growing plants and playing with soil. Such an area could have been created very easily..." (Interviewee 12).

Another issue emphasized by the interviewees in the area is the designs made without taking climate data into account. In the city where the summer months have hot and arid climatic data, the exposure of

the playground to direct sunlight restricts the use of the area. During the observations made in the area, it was determined that the playground is used only in the evening hours in the summer months. Especially in the winter months, the lack of a semi-open space where children can socialize, considering the infrastructure problem of this area located in the creek bed, causes children to be confined to the container interior with a limited space. The photographs in Figure 4 also point to similar problems such as traffic, climate data, etc.

"Open and closed areas could have been created where they could play in all seasons..." (Interviewee 3).

"Rather than a playground, the climate is not considered at all in the open area, so children cannot play at all..." (Interviewee 5).

"Children actually set up the game themselves with their friends. If there was an area suitable for playing in all seasons..." (Interviewee 6).

If there was a cover over the playground, children would play in all seasons... (Interviewee 7).

In their narratives, the interviewees described the security problem that children experience in the area due to vehicle traffic as follows:

"Children want to play ball on the street, but they can't play because cars pass by all the time..." (Interviewee 8).

"The biggest problem is traffic, cars are the reason why children cannot be free both around and inside the area..." (Interviewee 9).



Figure 4. Visuals of the field area (by the author, 7 October 2024)

5. Developing a Sample Design for Osmaniye Temporary Shelter Area

In this section, a sample design approach focused on child users was developed based on the data obtained from the observations and interviews conducted at the Osmaniye temporary shelter center. During the design process, the problems and requests emphasized by the parents in the face-to-face interviews were highlighted, and a user-centered proposal was aimed (Table 2). In this way, before developing an approach as a designer, the views and requests of the users were identified.

Table 2. Problems identified in the study

	Problem	**Demand**	**Proposal Design Approach**
Problem 1	Climate	Playground	Top cover design for container front gardens and top cover design on children's playground
Problem 2	Lack of special space for children	Study area	1.A flexible furniture design has been developed that can be placed in the interior of the container, where children can both study and use as storage space. 2. Closed units integrated into the top cover surrounding the children's playground have been created and library and workshop areas have been designed within these volumes.
Problem 3	Not considering all age groups in children's playgrounds	Playground arrangement	A trail design proposal has been developed that will allow participation of all age groups.

In the study, an attempt was made to address the topics highlighted in the table, and based on the developed design, the goal was to draw general conclusions through the sample area.

- Field studies, analyses, and interviews have revealed that designs created without considering the local climate pose significant issues. This situation particularly restricts the use of children's play areas and the outdoor spaces of containers. In response, two proposals have been developed in this study. First, it is suggested to design 1-meter-wide overhead coverings for the front yards of the containers. This space is planned to serve as both a play and seating area. In the design of the overhead covering, a play area has been created by adding climbing ropes and swing ropes to the side surfaces of the semi-open space to attract children's interest (Figure 5).
- The second proposed approach, designed with climate factors in mind, is a children's play area that accommodates various activities, allows year-round use, and can be easily assembled and disassembled. In the developed play area scenario, family suggestions were taken into account, and it was decided to design a course that facilitates children's interaction with others while incorporating open and enclosed spaces suited to the region’s climatic conditions (Figure 6). In the activities planned within the play area, factors such as climate, cost, and the needs of children of different age groups were considered in the design process. Accordingly, the play area was envisioned as a spatial structure that enables participation from both individual children and large groups. It includes various play activities such as climbing and jumping, providing both entertainment and opportunities for creative play. To enhance accessibility and address the lack of enclosed play areas, prefabricated play units elevated 2.5 meters above the ground were designed around the play area. These enclosed units are intended to serve multiple functions, including study spaces, a psychological counseling room, workshops, a library, and meeting rooms, all tailored to children's needs. The placement of the library and workshops was specifically designed at ground level to ensure accessibility for children with disabilities. Additionally, in the surrounding area, child-friendly restrooms, a nursing room, and accessible toilets were designed to meet ergonomic needs. These facilities were strategically positioned to

ensure they do not obstruct participation in the play area, prioritizing accessibility and ease of use. The enclosed workshop areas were designed without window openings on the facades facing the play area to minimize noise. Furthermore, glass wool insulation was used on the facades to provide both sound and thermal insulation.



Figure 5. Container Outdoor Top Cover Design Proposal (by the author)



Figure 6. Container Outdoor Top Cover Design Proposal (by the author)

- To address the frequently criticized issue of heavy traffic, it has been proposed to remove vehicle traffic from the area and establish a separate parking zone. The traffic-free zone will allow children to easily access all parts of the temporary accommodation center and provide space for various activities to be organized in these areas.
- The climate's suitability for water play allows for the creation of a new play area at no additional cost. In this context, it is considered that spaces integrating water as a design element could be incorporated within the temporary accommodation center.
- During the interviews, families expressed that there was not enough space for children inside the containers. In response, a flexible furniture design serving multiple functions was developed for the container's interior. It was proposed to relocate the washing machine from under the kitchen counter to the bathroom, allowing this space to accommodate a multifunctional unit tailored to various needs (Figure 7).



Figure 7. Container Interior Flexible Furniture Design Proposal (by the author)

- The design product was created to meet various needs by combining different usage variations within a single furniture unit. Adaptable to different configurations, this unit can function as a drawing station, table, coffee table, and storage cabinet, making it suitable for children aged 1-10 (Figure 8).



Figure 8. Container Interior Flexible Furniture Design Proposal (by the author)

- The presence of vegetables planted in tin cans serving as makeshift pots, as noted in observation reports, suggests a potential design input for the area. In this regard, considering the climate's suitability for vegetable cultivation, a hobby garden has been proposed within the space (Figure 9).



Figure 9. Plant growing area design

The proposed designs realized at this stage of the study were projected and presented to 13 parents and the opinions of the participants were taken. The interviewees were asked to weight these designs, which they generally found positive, between 1-10. The score weights given by the interviewees are shown in Table 3.

Table 3. Information about the interviewees

	Interior Flexible Furniture Design	Children Playground	Container Front Semi-Open Space Design
Interviewer 1	8	10	10
Interviewer 2	7	10	10
Interviewer 3	9	8	10
Interviewer 4	5	8	10
Interviewer 5	7	8	9
Interviewer 6	8	8	9
Interviewer 7	9	7	10
Interviewer 8	10	8	10
Interviewer 9	10	7	10
Interviewer 10	8	8	10
Interviewer 11	7	9	10
Interviewer 12	7	9	10
Interviewer 13	7	9	10
Mean	7,8	8,4	9,8

6. Conclusions and Recommendations

In this study, the possibility of developing a design concept by considering the child user in temporary accommodation centers, which are the result of rapid production in the post-earthquake process, is examined through the Osmaniye Temporary Accommodation Center, which was established after the Kahramanmaraş and Hatay earthquakes. Before the design development stages, data was collected through observation and interview techniques, and thus, it was aimed to bring permanent solutions to the problems by directly addressing the demands and opinions of the user profile in the field. The study focuses on uncovering and improving the potential of temporary shelter areas, rethinking them with their

users, and exploring how they can be adapted to the needs of the youngest age group. The goal is to draw general conclusions through the case study of the Osmaniye temporary accommodation center.

In this context, passive observations were conducted in the Osmaniye Temporary Accommodation Center, and interviews were carried out with 13 parents to identify user expectations and the problems experienced within the area. Users frequently criticized the designs that were implemented without considering the local climate, the heavy traffic within and around the site, and the lack of dedicated spaces for children inside the containers.

Based on interview narratives, proposed design approaches were developed to create a space where children, within the fenced-off area, could experience a freer, traffic-free life and engage in various activities throughout the year. A piece of furniture and two spatial projects designed according to these approaches were evaluated by the interviewed parents. According to Table 2, all 13 users generally viewed the designs positively, with average ratings as follows: interior furniture design – 7.8, children's play area design – 8.4, and semi-open space design – 9.8. Among the proposed design approaches, the semi-open space design in front of the container was the most favored by participants, while the flexible furniture design for the interior raised concerns due to the limited space available. In conclusion, even in temporary accommodation centers based on rapid production processes, user-centered and participatory design approaches that consider user needs can lead to successful outcomes.

6.1. Suggested Design Approaches Specific to Child Users in Temporary Shelter Areas

Temporary accommodation centers are the primary living spaces where individuals continue their lives in the post-disaster period, even for a certain period of time. These living spaces where disaster victims reside for a certain period of time, even if they are not fully residential, need to be designed with the user in mind or some of the problems that arise in the construction process should be improved in the process. In this context, in this study, the proposed design approaches developed in the interior and exterior spaces of containers in temporary accommodation centers for child users are as follows:

- The spaces where children take refuge after an earthquake should provide an environment that allows them to engage in both active and passive activities. Design approaches in temporary accommodation centers should prioritize this consideration.
- In this post-earthquake period, various activities that prioritize the interests, needs and expectations of children and enable them to realize their own interests and abilities should be organized and trainings should be provided on this subject.
- In the interior of a container, which consists of a sleeping and living area, spaces should be designed to provide a sense of belonging for the child and to accommodate basic activities such as sleeping, playing, and studying at a minimum level. In these confined spaces, furniture should be designed to offer multifunctional use and align with the principle of flexibility, allowing for space-saving and enhanced usability.

- For the child, play is not a means but an end, a question of existence. The child begins to play as soon as he/she exists and embodies life in play. Therefore, it is necessary to increase the value of play in spatial arrangements for play, which is one of the basic life needs of children. From this point of view, children's playgrounds in temporary shelters should be improved by taking into consideration their psychological therapeutic effect after a disaster.
- Rather than designing uniform play spaces within the area, incorporating open and flexible spaces that allow children to design their own play environments is the most effective approach. Children can create their own social play areas and transform existing spaces through participatory practices and workshops. This, in turn, provides them with the opportunity to become active participants in shaping their own lives.
- The adaptability of these spaces to a lifestyle that directly interacts with the outdoors, combined with the removal of vehicle traffic, can be seen as an opportunity to revive the lost street play culture. In this way, temporary accommodation centers are envisioned as a means to raise awareness against the increasing isolation of play from nature and its confinement within indoor spaces in recent years.
- In temporary shelter areas established after disasters, play spaces should be designed with open and semi-open areas, taking the region's climatic conditions into account. Additionally, incorporating small-scale hobby gardens within the area is expected not only to provide food supply but also to offer children a unique opportunity for exploration.
- Children with disabilities should not be ignored during design and inclusive design principles should be adopted.

In this context, it is thought that these suggestions developed in this context can be informative and guiding from the perspective of child users in post-earthquake temporary shelter areas, and can provide a comprehensive perspective and awareness in similar practices.

Conflict of Interest Statement

The author declares that there is no conflict of interest.

Summary of Researchers' Contribution Rate Declaration

The author declares that she has contributed 100% to the article

Ethics Committee Decision

Osmaniye Korkut Ata University Science, Scientific Research and Publication Ethics Committee's decision dated 11/10/2024 and numbered E.2015558 was taken within the framework of the decision of the ethics committee.

References

Abanoz FB., Vural N. Comparative analysis of temporary disaster houses used in the world and Turkey and model proposal. Axis Dokuz Eylül University Faculty of Architecture Journal 2023; 4(1): 132-153.

Arın S., Özsoy A. Child participation in urban space design. Idealkent Journal 2015; 6(17): 182-201.

Avlar E., Limoncu S., Tızman D. Temporary accommodation unit after earthquake: CLT E-BOX. Gazi University Journal of Engineering and Architecture 2023; 38(1): 471-482. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1027894.

Ayvaz E., Arpacıoğlu ÜT. Development of container model suggestions for temporary accommodation areas after disasters. Journal of Architecture and Life 2024; 9(1): 169-193.

Başaran Uysal A. A local participation experience in the development of children's playgrounds. Megaron Journal 2015; 10(3): 423-439.

Bedell GM., Khetani MA., Cousins MA., Coster WJ., Law MC. Parent perspectives to ınform development of measures of children's participation and environment. Arch Phys Med Rehabil 2011; 92(5): 765-773.

Büyükçınar A., Özemir FP. A pilot study on a design-based research with children in preschool education environment: reggio emilia approach. UTAK National Design Research Conference, Middle East Technical University Culture and Congress Center Ankara: 2022; 362-383.

Büyüköztürk E., Oral M. Assessment of temporary shelter areas after dısaster usıng the delphhı method: the case of Osmaniye. Online Journal of Art and Design 2023; 11(5): 550-563.

Christensen P., James A. Çocukları ve çocukluğu araştırmak: İletişim kültürleri. P. Christensen ve A. James (Ed.), Çocuklarla Araştırma: Perspectives and Practices (2. baskı 1-8), Oxon: Routledge; 2008.

Creswell JW. Qualitative research methods. Ankara: Siyasal Kitabevi; 2020.

Curaoğlu F., Çobanlar GA. The child as a stakeholder designer in space and furniture design: a field study based on the experience of the pandemic process. 2020. https://www.academia.edu/94793967/Mek%C3%A2n_ve_Mobilya_Tasar%C4%B1m%C4%B1nda_Payda%C5%9F_Tasar%C4%B1mc%C4%B1_Olarak_%C3%87ocuk_Pandemi_S%C3%BCreci_Deneyimine_Ba%C4%9Fl%C4%B1_Bir_Alan_%C3%87al%C4%B1%C5%9Fmas%C4%B1.

Çukur D. The importance of play in terms of children's recreation and spatial arrangements that increase the value of play in residential neighborhoods. Ege Architecture 2009. https://egemimarlik.org/cevirim-ici-okuma/69/1062.

Dereli HC. What can we learn about participation, traditional architecture and persistence from the toy house project that ınvolves primary school students and teachers in the design process by building games. Ege Mimarlık 2009. https://egemimarlik.org/cevirim-ici-okuma/97/1337.

Design Council. 2020. Available at: https://www.designcouncil. org.uk/news-opinion/what-framework-innovation-design-councils-evolved-double-diamond.

Ergin Ş. Çocuk'da oyun gereksinimi ve İzmir/Alsancak semtinde çocukğa yönelik açık/yeşil mekân olanaklarının artırılması üzerine bir araştırma. Ege University Associate Professorship Thesis, no: 41, İzmir, Türkiye, 1982.

Gallacher LA. Theorizing young children's spaces. A. Farrell, SL. Kagan ve E. K. M. Tisdall, (Ed.), The Sage Handbook of Early Childhood Research 2016; 118-132. London: Sage Publications.

Genç N., Yılmaz G. The ımportance of temporary recreation areas in the rehabilitation process after the earthquake. International Journal of Holistic Health, Sports and Recreation 2024; 3(1): 17-38.

Giyik C. Temporary accommodation practices after the february 6, 2023 earthquake: the case of Gaziantep Nurdağı. Journal of Natural Disasters and Environment 2024; 20(1): 113-124.

Guha ML., Druin A., Chipman G., Fails JA., Simms S., Farber A. Mixing ideas: A new techniquefor working with young children as design partners. University of Maryland, USA 2004; June 1-3: 35-42.

Gülay Taşçı B. Examining children's architectural works in the context of children's right to participate in planning and design processes. Güney Mimarlık 2014; 16: 44-47.

Günay RG., Engin N. "Tiny houses" as a mobile housing type and their structural properties. Yapı Dergisi 2023; 488: 90-95.

Hofmann S. From follows kid`s fiction methods of participation: working with children 2. Capresi, V. and Pampe, B. (eds.) Learn Move Playground, How to Improve Playgrounds Through Participation. Berlin, jovis Verlag GmbH 2013; 36-41.

Irvin RA., Stansbury Clark A. Talking and listening to children. Mark Dudek (ed.) Children`s Spaces. Oxford: Elsevier Architectural Press 2005; 1-13.

İlham N., Aykal D., Erbaş Özil M. Ergonomic analysis of temporary shelter units used after earthquake in the context of settlement layout. Journal of Architectural Sciences and Applications 2024; 9: 245-269.

Kalkan M., Özçetin Z., Doğan MC., Ay M. Acil durum toplanma alanlarının yeterliliğinin 6 şubat 2023 depremleri sonrasında araştırılması: Malatya ili örneği. Türk Deprem Araştırma Dergisi 2024; 6(1): 46-59.

Kensing F., Blomberg J. Katılımcı tasarım: issues and concerns. Computer Supported Cooperative Work 1998; 7(3-4): 167-185.

Koralek B., Mitchell M. The schools we'd like: young people`s participation in architecture. Mark Dudek (ed.) Children`s Spaces. Oxford, Elsevier Architectural Press 2005; 114-153.

Kuru A. Teknolojik ürünlerde kullanıcı deneyimi üzerine bütünsel bir model. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2015; 3(3): 567-574.

Law ELC., Van Schaik P. Editoryal: modelling user experience-an agenda for research and practice. Interacting with Computers 2010; 22(5): 313-322.

Limoncu S., Atmaca SB. Çocuk merkezli afet yönetimi. Megaron 2018; 13(1): 132-143.

Nooraddin H. Children city architecture. Advances in Social Sciences Research Journal 2020; 7(7): 768-796.

Norberg-Schulz C. Existence, space and architecture. London: Studio Vista; 1971.

Petti A. Camp/mülteci: decolonizing architecture in spaces of conflict. Journal of Design Culture 2015; 60-67.

Sheat LG., Beer AN. User participation-a design methodology for school grounds design and environmental learning. Children's Environmental Quarterly 1989; 2(3): 15-30.

Sigfusson G. This wonderful world of mobıle home living. 1997. Available at: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/10401/37554049-MIT.pdf?sequence=2andisAllowed=y.

Steen M., Kuijt-Evers L., Klok J. Early user ınvolvement in research and design projects: a review of methods and practices. Paper for the 23rd EGOS Colloquium 2007; July 5-7: 1-21.

Süner S., Erbuğ Ç. A compilation study on child representations in design. UTAK 2018; 395-407. http://utak.metu.edu.tr/utak-2018. Date of access: 1.11.2024.

Şahin BE., Türkün Dostoglu N. The importance of preschoolers' experience in kindergarten design. METU JFA 2012; 29(1): 301-320.

Şevli E. The role of young designers in the construction of cities. Yapı Dergisi 2024; 494: 46-62.

Toros S. User centered design and concept development: Toy design case study. Design Theory 2020; 16(30): 109-123.

Ünal B., Akın E. Evaluation of temporary disaster housing from the user perspective: Van earthquake container houses. Online Journal of Art and Design 2023; 5(4): 71-88.

Vural Arslan T., Gülay M. Design of temporary accommodation areas after disaster. Turkey Healthy Cities Association 2023: 1-15. Access address: https://www.skb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/04/gecici-barinma-alanlari-tasarimi.pdf. Access date: 1.11.2024.

Zenter Ö. Özmen EF., Yıldırım MT. Architectural design experience of post-earthquake special education settlement for children. Journal of Architectural Sciences and Applications 2024; 9 (Special Issue): 270-292.

XXI, Post-Disaster Sustainable Library from Architecture for All. 2024. Access address: https://xxi.com.tr/i/herkes-icin-mimarliktan-afet-sonrasi-surdurulebilir-kitaplik.

APPENDICES

INTERVIEW QUESTIONS

1. Is there a special area for your child in the container interior, or have you made such an arrangement?

2. Is it possible for your child to do activities such as studying/playing etc. in the container interior?

3. Do you think the children's playground in the temporary accommodation center is sufficient? Does your child spend time here?

4. Can you describe what kind of activity area your child needs in the temporary shelter center?

5. What is the most important deficiency of your child in the area, including indoor and outdoor areas?

6. Could you please state your opinions about the suggestions for improvement of the temporary shelter center shown in the figure?

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1816-1828, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1816-1828, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Kesir Türevli Diferansiyel Denklemlerin Kollokasyon Yöntemi ile Çözümü

Birkan DURAK[1], Mehmet Şirin DEMİR[2*], Hasan Ömür ÖZER[3]

[1]İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye
[2]İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, Türkiye
[3]İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, İstanbul, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-8196-5407
[2]https://orcid.org/0000-0002-3965-4760
[3]https://orcid.org/0000-0002-6388-4638
*Sorumlu yazar: demirms@iuc.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 30.01.2025
Kabul tarihi:12.05.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Sayısal çözüm
Kollokasyon yöntemi
Lineer kesirli diferansiyel denklemler
Lineer olmayan kesirli diferansiyel denklemler

ÖZ

Mühendislik problemlerini ve doğa olaylarını bir diferansiyel denklem aracılığıyla matematiksel bir formda yazmak ve ardından bu denklemi çözerek olgu hakkında bazı sonuçlara ulaşmak bilimsel uğraşının önemli bir kısmıdır. Özellikle değişimin göz önüne alındığı olayların incelemesinde tam sayılı veya kesir türevli denklemler kullanılır. Kesir türevli denklemleri içeren bazı çalışmalar termoelastisite, titreşim ve difüzyon süreçleri, biyomühendislik konularında verilmiştir. Ayrıca fizik, genetik, biyoloji, ekonomi ve istatistik gibi bilim dallarındaki çeşitli problemler bu tip denklemlerle incelenmiştir. Kesir türevli denklemler, sönümün frekansa bağlı olduğu malzemeli modelleri tahmin etmekte ve ayrıca gerçek fiziksel sistemlerin hareketini tanımlamada, viskoz bir akışkan içine daldırılmış rijit bir plakanın veya bir akışkan içindeki bir gazın hareketinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu tür denklemlerin yaklaşık çözümlerinin bulunması hala önemli bir çalışma sahasıdır. Bu çalışmada ağırlıklı kalanlar yöntemlerinden olan kollokasyon, kesir türevli denklemlerin yaklaşık çözümünü bulmak amacıyla önerilmiştir. Yöntem sayesinde incelenen problemlerin çözümleri indirgendikleri denklem sisteminin çözümüyle bulunmuştur. Kollokasyon ile seçilen test problemlerine basit işlem ve programlama adımlarıyla yaklaşık çözümler bulunmuştur. Yöntemin çalışma algoritması verilerek, lineer olan veya olmayan, sınır ve başlangıç değer problemlerine uygulanması tartışılmıştır. Kollokasyonla bulunan değerler ile diğer araştırmacıların sonuçları arasında uyum yöntemin basit ve etkili bir yaklaşık çözüm yöntemi olduğunu göstermektedir.

Solution of Fractional Differential Equations by Collocation Method

Research Article

Article History:
Received: 30.01.2025
Accepted: 12.05.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Numerical solution
Collocation method
Linear fractional differential equations
Nonlinear fractional differential equations

ABSTRACT

The formulation of engineering problems and natural phenomena in terms of differential equations and the subsequent solution of these equations to obtain information is a major activity of the scientific effort. Such problems, especially in which variations have to be considered, are analyzed utilizing integer-order or fractional-order differential equations. Applications involving fractional order differential equations have been related to thermoelasticity, vibration analysis, diffusion processes, and biomedical engineering. Aside from that, some problems across the wide multidisciplinary of physics, genetics, biology, economics, and statistics have also been addressed via fractional kinds of equations. Fractional order differential equations perfectly fitting in considering certain frequency-dependent damping materials modeling and more accurate detailing of the real physical phenomenon, say,

the mechanical motion of a rigid plate immersed into the viscous medium, or the realistic collective behavior of gas particles submerged in the liquid. The quest to find approximate solutions for such equations remains a hot area of research. This paper proposes the collocation method, one of the weighted residual techniques, to determine approximate solutions for fractional-order differential equations. Using this method, the solutions to the examined problems are obtained by solving the reduced systems of equations. Approximate solutions to some test problems have been obtained by the collocation method using some simple computational and programming steps. The working algorithm of the method is given, as well as its application to linear or non-linear, boundary value and initial value problems. The agreement between the present results and those of other researchers shows that the method is simple and effective for generating approximate solutions.

To Cite: Durak B., Demir MŞ., Özer HÖ. Kesir Türevli Diferansiyel Denklemlerin Kollokasyon Yöntemi ile Çözümü. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1816-1828.

1. Giriş

Birçok bilim alanında ve mühendislikte, karşılaşılan bir problemi ifade etmek ve bu problemle ilgili başlangıç ve sınır şartlarını ortaya koyabilmek gerekmektedir. Söz konusu şartların sağlandığı fonksiyonlar bulunarak çözüme gidilir. Problemi ifade etmekte yararlanılan söz konusu fonksiyonlar, bir veya daha yüksek mertebeden türevler ya da kesirli türevler içerebilir.

Bir veya daha fazla değişkenin kesirli türevlerini içeren denklemlere kesirli diferansiyel denklem denir. Kesirli diferansiyel denklemler, tam sayı türevleri yerine, kesirli türevlere sahip olan diferansiyel denklemlerdir (Benghorbal, 2004).

Kesirli diferansiyel denklemler, matematik, fizik ve kimya gibi temel bilimlerde kullanılmasının yanı sıra diğer bilim dallarında da araştırmalarda yer bulmaktadır. Sivalingam ve ark. (2023) kesirli diferansiyel türevler için sinir ağları tabanlı nümerik bir çözüm geliştirmişlerdir. Cardone ve Conte (2020) söz konusu denklemler için kararlılık analizini irdelemiştir. Wang ve ark. (2020) otomatik siber güvenlik konusunda bulanık mantık içeren kesirli diferansiyel denklemler uygulamasını incelemişlerdir. Günümüze gelene kadar bazı matematikçiler çok farklı kesir türevli diferansiyel denklem tanımları veya yaklaşımları yapılmıştır. Karcı (2015) çalışmasında bunlardan üç tanesi olan Euler, Riemann-Liouville ve Caputo yaklaşımlarının yetersizliklerini tartıştıktan sonra bu denklemlere kendi tanımını vermiştir.

Γ (Gama) fonksiyonunu göstermek üzere literatürde sıklıkla karşılaşılan iki adet kesir türev tanımı Khalil ve ark. (2014) tarafından verilmiştir. Bunlardan birincisi olan Riemann-Liouville tanımına göre kesir türev,

$$D_a^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(x)}{(t-x)^{\alpha-n+1}} dx \tag{1}$$

olarak verilirken, Caputo tarafından verilen tanım ise;

$$D_a^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(x)}{(t-x)^{\alpha-n+1}} dx \tag{2}$$

şeklindedir. Her iki tanımda α türevin mertebesini göstermek üzere [n-1,n) aralığındadır.

Kesir türevli diferansiyel denklemlerin çözümlerini bulmak için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Arıkoğlu ve Özkol (2007) Kesir Türevli Diferansiyel Dönüşüm (FDTM) yöntemini, Momani ve Odibat (2007) Adomian Ayrıklaştırma Yöntemini (ADM), Odibat ve Momani (2008) Uyarlanmış Homotopi Pertürbasyon Yöntemini, Hosseinnia ve ark. (2008) İyileştirilmiş Homotopi pertürbasyon Yöntemini, Cang ve ark. (2009) Homotopi Analiz Yöntemini, Li ve Sun (2011) Genelleştirilmiş Blok Darbe İşlem Matrisi Yöntemini, Li ve ark. (2014) Haar Dalgacık İşlem Matrisi Yöntemini, Albadarneh ve ark. (2016) Kesirli Sonlu Farklar Yöntemini, Zhijunve ark. (2018) Legendre polinomlarını, Daraghmeh ve ark. (2020) Homotopi Pertürbasyon ve Matris yaklaşımı yöntemlerini, Fathy ve Abdelgaber (2022) Galerkin yöntemini, kullanarak çeşitli kesir türevli denklemleri çözmüşlerdir.

Bu çalışmada ise kollokasyon yöntemi kullanılarak, lineer ve lineer olmayan yedi farklı kesir türevli diferansiyel denklemin sayısal çözümleri bulunmuş ve literatürde mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar, kollokasyon yönteminin kesir türevli diferansiyel denklemlerin çözümü için etkili, güvenilir ve yüksek doğruluk sağlayan bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

2. Materyal ve Metot

Kesir türevli bir sınır değer problemi $f(x)$ homojenliği bozan terimler olmak üzere,

$$D^{\alpha}\, y(x) - f(x) = 0$$
$$y(x_1) = a \qquad (3)$$
$$y(x_2) = b$$

şeklinde gösterilebilir. Burada D^{α} kesir türev operatörüdür. Bu denklemin yaklaşık çözümü;

$$\hat{y}(x) = \sum_{n=1}^{N} C_n\, x^n \qquad (4)$$

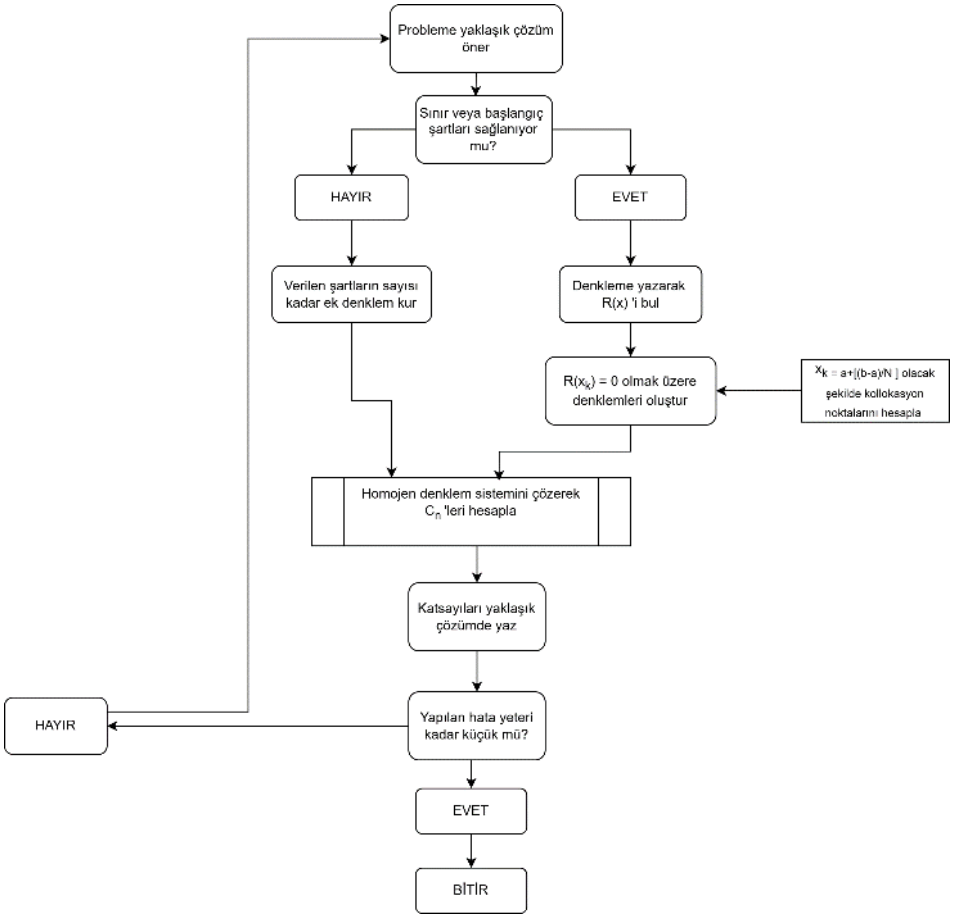
şeklinde olsun. Denklem (4), denklem (3)' te yerine yazılarsa kalan (residual) $R(x)$ ifadesini veren denkleme ulaşılır.

$$R(x) = D^{\alpha}\, \hat{y}(x) - f(x) = D^{\alpha}\, [\textstyle\sum_{n=1}^{N} C_n\, x^n\,] - f(x). \qquad (5)$$

Kollokasyon yönteminde, $R(x)$ kalan ifadesi belirlenen ve kollokasyon noktası olarak adlandırılan noktalarda sıfıra eşitlenerek çözümü denklem (5)'teki bilinmeyen katsayıları verecek olan bir denklem sistemi kurulur. x_k kollokasyon noktaları olmak üzere bu sistem,

$$R(x_k) = D^{\alpha}\, \hat{y}(x) - f(x_k) = D^{\alpha} \left[\sum_{n=1}^{N} C_n\, x_k^n \right] - f(x_k) = 0 \;, \quad k = 1,2,3, \dots, n \qquad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer incelenen problem bir başlangıç değer problemi ise benzer işlem adımları uygulanacaktır. Ancak kollokasyon noktaları probleme uygun seçilmelidir. Şekil 1'de kollokasyon yönteminin bir sınır veya başlangıç değer problemine uygulanma algoritması gösterilmiştir.



Şekil 1. Kollokasyon yönteminin algoritması

Birinci test problemi olarak Arıkoğlu ve Özkol (2007) tarafından Kesirli Diferansiyel Dönüşüm Yöntemiyle çözülen problem ele alınsın,

$$D^{0,5}y(x) = -y(x) + x^2 + \frac{2}{\Gamma(2.5)}x^{1,5}, \qquad y(0) = 0. \tag{7}$$

(7) denklemi ile verilen problemin analitik çözümü $y(x) = x^2$'dir. Verilen sınır şartı dikkate alınırsa (7) denkleminin yaklaşık çözümü

$$y(x) = \sum_{n=1}^{3} C_n x^n \tag{8}$$

olarak alınabilir. Bu yaklaşık çözüm (7) denkleminde yerine yazılırsa kalan:

$$R(x) = -1{,}504505556x^{1.5} - x^2 + xC_1 + x^2C_2 + x^3C_3 + \frac{2\sqrt{x}\left(15C_1 + 4x(\,5C_2 + 6xC_3\,)\right)}{15\sqrt{\pi}} \tag{9}$$

olarak bulunur. (9) denkleminde bilinmeyen katsayılar; C_1, C_2, C_3 değerlerini bulmak için, öncelikle kollokasyon noktaları; $x \in [0,1]$ olduğu kabul edilmiş ve üç kollokasyon noktası $x_0 = 0{,}25$, $x_1 = 0{,}50$ ve $x_2 = 0{,}75$ olarak seçilmiştir. Bu değerler sırasıyla denklem (9)' a yazılarak her bir denklem ayrı ayrı sıfıra eşitlenirse;

$$\begin{aligned} &0{,}25C_1 + 0{,}0625C_2 + 0{,}015625C_3 + 0{,}037612638903183574(15C_1 + 5C_2 + 1{,}5C_3) \\ &\qquad = 0{,}2505631945159188 \\ &0{,}5C_1 + 0{,}25C_2 + 0{,}125C_3 + 0{,}05319230405352436\big(15C_1 + 2(5C_2 + 3C_3)\big) \\ &\qquad = 0{,}7819230405352436 \\ &0{,}75C_1 + 0{,}5625C_2 + 0{,}421875C_3 + 0{,}06514700157705598 \\ &\qquad + \big(15C_1 + 3(5C_2 + 4{,}5C_3)\big) = 1{,}53970502380584 \end{aligned} \tag{10}$$

denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminin çözümüyle aranan yaklaşık çözüm için bilinmeyen katsayılar, $C_1 = 2{,}987 \times 10^{-16}$, $C_2 = 1$ ve $C_3 = 6{,}541 \times 10^{-16}$ olarak bulunur. Çok küçük olan katsayılar ihmal edilerek denklem (8)' e yazılırsa (7) denklemi ile verilen problemin yaklaşık çözümü;

$$y(x) = x^2 \tag{11}$$

olarak bulunur. Bu çözüm verilen problemin analitik çözümüdür.

İkinci test problemi olarak Kesirli Sonlu Farklar Yöntemiyle (FFDM) çözülen ve kesin çözümü $y(x) = x^2$ olan,

$$D^2 y(x) + D^{1,5} y(x) + y(x) = x^2 + 2 + 4\sqrt{\frac{x}{\pi}}, \quad y(0) = 0 \tag{12}$$

problemi olarak seçelim (Albadarneh ve ark., 2016). Bu problemin yaklaşık çözümü denklem (8) deki gibi üçüncü dereceden bir polinom olarak seçilmiş olsun. $R(x)$ kalan ifadesi oluşturulup $x_0 = 0{,}25$, $x_1 = 0{,}50$ ve $x_3 = 0{,}75$ olan kollokasyon noktalarında sıfıra eşitlenirse, aranan yaklaşık çözümün katsayıları sırasıyla $C_1 = -1{,}676 \times 10^{-16}, C_2 = 1$, $C_3 = -1{,}101 \times 10^{-17}$ olarak bulunur. Birinci problemdeki gibi çok küçük olan katsayılar ihmal edilirse denklem (6) ile verilen denklemin yaklaşık çözümü kesin çözümü olan $y(x) = x^2$'ye eşit olacaktır.

Üçüncü test problemi Homotopi Pertürbasyon ve Matris yaklaşımı yöntemleriyle incelenmiş olan

$$D^{\propto} y(x) + y(x) = \frac{2}{\Gamma(3-\propto)} x^{2-\propto} + x^2, \qquad y(0) = y'(0) = 0 \tag{13}$$

Diferansiyel denklemi olarak seçilsin (Daraghmeh ve ark., 2020). Bu denklemin $\alpha = 1{,}9$ için olan çözümü $y(x) = x^2$'dir. Başlangıç koşullarına dikkat edilirse aranan yaklaşık çözüm;

$$y(x) = \sum_{n=2}^{N} C_n x^n \tag{14}$$

şeklinde olacaktır. Burada N kollokasyonda kullanılan polinomun en yüksek derecesini göstermektedir. Bu problemin farklı kollokasyon noktaları için bulunan yaklaşık çözümleri aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$
\begin{aligned}
y_5 = {} & 0{,}9999999999999986x^2 + 1{,}889120086245991 \times 10^{-15}x^3 - 3{,}640636510310997 \\
& \times 10^{-15}x^4 + 3{,}409117141967403 \times 10^{-15}x^5 - 1{,}147227297973183 \\
& \times 10^{-15}x^6
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
y_{10} = {} & 1{,}0000000000001166x^2 - 1{,}270412891612913 \times 10^{-12}x^3 \\
& + 7{,}753965674030095 \times 10^{-12}x^4 - 2{,}972503162714075 \times 10^{-11}x^5 \\
& + 7{,}480077415757217 \times 10^{-11}x^6 - 1{,}255543494558436 \times 10^{-10}x^7 \\
& + 1{,}393630369084786 \times 10^{-10}x^8 - 9{,}826857124530411 \times 10^{-11}x^9 \\
& + 3{,}987867009625851 \times 10^{-11}x^{10} - 7{,}092315911222479 \times 10^{-12}x^{11}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
y_{15} = {} & 1{,}0000000000008316x^2 - 1{,}519994917014976 \times 10^{-11}x^3 + 1{,}671962890129303 \\
& \times 10^{-10}x^4 - 1{,}235758699148621 \times 10^{-9}x^5 + 6{,}480624152770993 \\
& \times 10^{-9}x^6 - 2{,}491277937095907 \times 10^{-8}x^7 + 7{,}157604362849433 \\
& \times 10^{-8}x^8 - 1{,}552143570175235 \times 10^{-7}x^9 + 2{,}544835981531875 \\
& \times 10^{-7}x^{10} - 3{,}134078504571956 \times 10^{-7}x^{11} + 2{,}851598735146423 \\
& \times 10^{-7}x^{12} - 1{,}858245286941418 \times 10^{-7}x^{13} + 8{,}198663870204452 \\
& \times 10^{-8}x^{14} - 2{,}192744337849018 \times 10^{-8}x^{15} + 2{,}68312571560829 \\
& \times 10^{-9}x^{16}
\end{aligned}
\tag{15}
$$

$$
\begin{aligned}
y_{20} = {} & 0{,}9999999999366677x^2 + 1{,}706452351603294 \times 10^{-9}x^3 - 2{,}864601367622546 \\
& \times 10^{-8}x^4 + 3{,}335419280618379 \times 10^{-7}x^5 \\
& - 0{,}000028474660215343 11x^6 + 0{,}000184604733580253 77x^7 \\
& - 0{,}000930656115860758 5x^8 + 0{,}003708168680447139 6x^9 \\
& - 0{,}011805684946347 62x^{10} + 0{,}030233116832270 36x^{11} \\
& - 0{,}062464680680285 57x^{12} + 0{,}104066644874075 01x^{13} \\
& - 0{,}139202876559653 53x^{14} + 0{,}148203078538099 32x^{15} \\
& - 0{,}123779992630033 21x^{16} + 0{,}079276395814860 77x^{17} \\
& - 0{,}037557473713650 145x^{18} + 0{,}001239212232174505x^{19} \\
& - 0{,}000254107892755066 27x^{20} + 0{,}000024372104062487827x^{21}
\end{aligned}
$$

Dördüncü test problemi olarak Genelleştirilmiş blok darbe işlem matrisi (Generalized block pulse operational matrix) yöntemiyle çözülen lineer kesir türevli diferansiyel denklemi göz önüne alalım (Li ve Sun, 2011),

$$
\begin{aligned}
& D^2y(x) + D^{\propto}y(x) + y(x) = 8\,, \\
& x > 0,\ 0 <\propto< 2, \quad y(0) = 1, \quad y'(0) = 0\,.
\end{aligned}
\tag{16}
$$

Bu problem $\alpha = 0{,}5$ değeri için Adomian ayrıklaştırma yöntemiyle (ADM) (Momani ve Odibat, 2007) ve Kesir türevli diferansiyel dönüşüm yöntemiyle (FDTM) çözülmüştür (Arıkoğlu ve Özkol, 2007). Başlangıç koşullarına göre bu problemin polinom temelli yaklaşık çözümü

$$y(x) = \sum_{n=2}^{N} C_n x^n \tag{17}$$

olarak alınmalıdır. Buna göre $N = 26$ için yaklaşık çözüm;

$$\begin{aligned} y_{25} = {} & 4{,}001x^2 - 0{,}100x^3 - 2{,}068x^4 + 7{,}075x^5 - 37{,}025x^6 + 175{,}579x^7 - 686{,}298x^8 \\ & + 2132{,}082x^9 - 5036{,}854x^{10} + 8153{,}068x^{11} - 5307{,}279x^{12} \\ & - 15340{,}761x^{13} + 62714{,}540x^{14} - 126100{,}573x^{15} + 170167{,}525x^{16} \\ & - 161658{,}626x^{17} + 107722{,}112x^{18} - 54138{,}044x^{19} + 35698{,}041x^{20} \\ & - 42155{,}511x^{21} + 43205{,}954x^{22} - 29183{,}334x^{23} + 12364{,}866x^{24} \\ & - 3023{,}719x^{25} + 328{,}453x^{26} \end{aligned} \tag{18}$$

şeklinde bulunur. Kollokasyon yöntemi lineer olmayan kesir türevli diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümünde kullanılabilir. Beşinci test problemi olarak Legendre polinomları yöntemi ile çözülen, lineer olmayan kesir türevli;

$$\begin{aligned} D^{\propto} y(x) = {} & \frac{\Gamma(6)}{\Gamma(6-\propto)} x^{5-\propto} + \frac{36}{\Gamma(5-\propto)} x^{4-\propto} - \Gamma(3+\propto) x^2 - y(x) \\ & + \left(x^5 + \frac{3}{2} x^4 - 2x^{\propto+2} \right)^2, \quad y(0) = 0 \end{aligned} \tag{19}$$

denklemi göz önüne alınsın (Zhijun ve ark., 2018). Bu diferansiyel denklemin kesin çözümü $y(x) = x^5 + \frac{3}{2}x^4 - 2x^{2+\alpha}$ şeklindedir. $\alpha = 0{,}6$ için ve 10 kollokasyon noktası alınarak bulunan yaklaşık çözüm aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$\begin{aligned} y_{10} = {} & 0{,}770657x^{10} - 4{,}23236x^9 + 10{,}3312x^8 - 14{,}8412x^7 + 14{,}0627x^6 \\ & - 8{,}45571x^5 + 6{,}49072x^4 - 3{,}37867x^3 - 0{,}252208x^2 + 0{,}00494825x \end{aligned} \tag{20}$$

Altıncı test problemi olarak, yine doğrusal olmayan;

$$\begin{aligned} & D^{\propto} y(x) + y^2(x) = 1\,, \\ & 0 \le x \le 1, \quad y(0) = 0 \end{aligned} \tag{21}$$

problemi göz önüne alınsın. Bu problem, Legendre polinomlarını esas alan Galerkin yöntemi (L-G) (Fathy ve Abdelgaber, 2022), uyarlanmış homotopi pertürbasyon (MHPM- modified homotopy perturbation method) , (Odibat ve Momani, 2008), iyileştirilmiş homotopi pertürbasyon (EHPM- enhanced homotopy perturbation) (Hosseinnia ve ark., 2008), homotopy analiz metodu (HAM- homotopy analysis method) (Cang ve ark., 2009), Haar dalgacık işlem matrisi (HWOMM- Haar wavelet operational matrix method) (Li ve ark., 2014), polinom en küçük kareler (PLSM- polynomial least squares method) (Bota ve Căruntu, 2017) gibi farklı yöntemlerle de çözülmüştür. Denklem (21) ile verilen bu problemin yaklaşık çözümü dokuzuncu dereceden bir polinom olarak alınırsa $\alpha = 0{,}75$ ve $\alpha = 0{,}90$ olmak üzere kollokasyon yöntemi ile çözümleri sırasıyla

$$y_9(x) = 13{,}595x^9 - 66{,}989x^8 + 143{,}776x^7 - 176{,}586x^6 + 137{,}217x^5 - 70{,}639x^4 + 24{,}980x^3 - 6{,}896x^2 + 2{,}280x$$
$$y_9(x) = 2{,}296x^9 - 11{,}589x^8 + 25{,}595x^7 - 32{,}536x^6 + 26{,}273x^5 - 13{,}930x^4 + 4{,}899x^3 - 1{,}642x^2 + 1{,}387x \quad (22)$$

şeklinde bulunur.

Yedinci ve son test problemi olarak ise, aşağıda verilen doğrusal olmayan problem incelensin. Bu problem polinom en küçük kareler (PLSM- polynomial least squares method) yöntemiyle çözülmüştür (Bota ve Căruntu, 2017).

$$D^{0,5}y(x) + y(x) + y^2(x) = \frac{8x^{\frac{3}{2}}}{3\sqrt{\pi}} + x^2 + x^4, \quad (23)$$

$0 \le x \le 1$, $y(0) = 0$.

Problemin yaklaşık çözümü;

$$y(x) = \sum_{n=1}^{3} C_n x^n \quad (24)$$

olarak kabul edilirse, elde edilen denklem sistemi doğrusal olmadığından, bilinmeyen katsayılar (C_n) için birden fazla çözüm mevcuttur:

$$\begin{array}{lll} C_1 = -24{,}231 & C_2 = 71{,}457 & C_3 = -60{,}591 \\ C_1 = -27{,}473 & C_2 = 100{,}622 & C_3 = -95{,}595 \\ C_1 = -13{,}457 & C_2 = 65{,}169 & C_3 = -73{,}766 \\ C_1 = 0 & C_2 = 0{,}999 & C_3 = 0 \end{array} \quad (25)$$

Bu çözümlerden sonuncusu (23) denkleminin kesin çözümü olan $y(x) = x^{2\prime}$yi vermektedir. Problemin lineer olmadığı durumlarda, uygun yaklaşık çözüm için bulunan katsayılardan, reel olanlardan mutlak değerce en küçüklerini içeren katsayı grubunu kullanmak gereklidir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, bir önceki bölümde kollokasyon metodu ile yaklaşık çözümleri bulunan üçüncü ve dördüncü test problemleri, literatürde bulunan mevcut çözümler ile kıyaslanmıştır.

Tablo 1 (13) denklemi ile verilen (Üçüncü test problemi) denklemin Daraghmeh ve ark. (2020) tarafından yapılan çözümü ve çeşitli N değerleri için kollokasyonla bulunan farklı yaklaşık çözümlerinde yapılan mutlak hataları göstermektedir. Kollokasyon ile yapılan çözümlerin yeterince hassas olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 1. Denklem (13) ile verilen problemin yaklaşık çözümünde farklı N'ler için yapılan mutlak hatalar

			Kollokasyon çözümlerindeki mutlak hatalar			
x	Kesin Çözüm	Mutlak Hata Ref.[9]	N=5	N=10	N=15	N=20
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,01	1,378x10-3	1,214x10-17	4,388x10-16	2,052x10-15	1,104x10-13
0,2	0,04	2,310x10-3	4,857x10-17	8,812x10-16	4,052x10-15	2,152x10-13
0,3	0,09	3,460x10-3	8,326x10-17	1,262x10-15	5,870x10-15	3,117x10-13
0,4	0,16	5,259x10-3	1,665x10-16	1,609x10-15	7,521x10-15	4,011x10-13
0,5	0,25	8,068x10-3	2,498x10-16	1,887x10-15	8,992x10-15	4,834x10-13
0,6	0,36	1,213x10-2	3,330x10-16	2,109x10-15	1,032x10-14	5,587x10-13
0,7	0,49	1,755x10-2	4,996x10-16	2,220x10-15	1,143x10-14	6,263x10-13
0,8	0,64	2,418x10-2	5,551x10-16	2,331x10-15	1,265x10-14	6,861x10-13
0,9	0,81	3,159x10-2	8,881x10-16	2,553x10-15	1,332x10-14	7,377x10-13
1	1	3,901x10-2	9,992x10-16	2,224x10-15	1,398x10-14	7,548x10-13

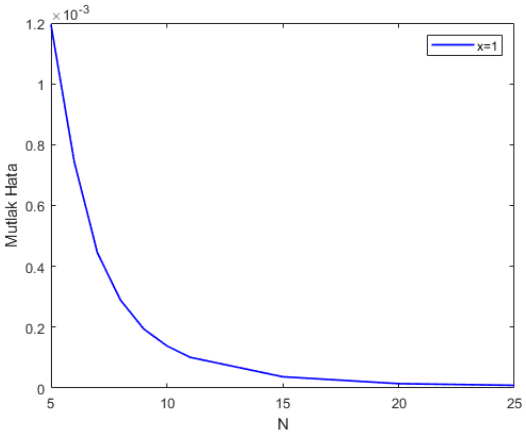
Tablo 2, Denklem (16) ile verilen dördüncü test probleminin analitik çözümü, kollokasyon yöntemi ile çözümü ve literatürde mevcut diğer yöntemlerle bulunan çözümlerini göstermektedir. Çözümler arasındaki uyum kollokasyon yönteminin etkinliğini göstermektedir.

Tablo 2. Denklem (16) ile verilen problemin kollokasyon çözümü ile diğer yöntemlerin karşılaştırılması

x	Kesin Çözüm	GBPO (Li ve Sun, 20011)	FDTM (Arıkoğlu ve Özkol, 2007)	ADM (Momani ve Odibat, 2007)	Kollokasyon (N=25 için)
0,1	0,03975	0,039754	0,03975	0,039874	0,039751
0,2	0,157036	0,157043	0,157036	0,158512	0,157038
0,3	0,34737	0,347373	0,34737	0,353625	0,347374
0,4	0,604695	0,604699	0,604695	0,622083	0,6047
0,5	0,921768	0,921768	0,921768	0,960047	0,921774
0,6	1,290,457	1,290,458	1,290,457	1,363,093	1,290,464
0,7	1,702,008	1,702,007	1,702,008	1,826,257	1,702,016
0,8	2,147,287	2,147,286	2,147,287	2,344,224	2,147,296
0,9	2,617,001	2,616,998	2,617,001	2,911,278	2,617,010
1	3,101,906	3,101,902	3,101,906	3,521,462	3,101,914

Denklem (16) ile verilen problemde en büyük mutlak hata x=1 noktasında olmaktadır. Şekil 2 de x=1 noktasında, mutlak hatanın yaklaşık çözüm için seçilen polinomun derecesi ile değişimi verilmiştir. Polinomun derecesi arttıkça mutlak hatanın azaldığı görülmektedir. Bu sayede kollokasyon yöntemi ile

daha hassas çözümler elde edilebilir. Ancak kollokasyon noktalarının çözüm için gerekli hesaplama yükünü arttırdığı göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 1. Polinom derecesinin artışıyla en büyük mutlak hatadaki değişim

Tablo 3, 10 kollokasyon noktası alınarak α=0,25 için bulunan yaklaşık çözüm değerlerini ve nokta bazında yapılan mutlak hataları göstermektedir.

Tablo 3. Dördüncü test probleminde α=0,25 için noktasal olarak yapılan mutlak hata değerleri

x	Kesin Çözüm	Kollokasyon	Mutlak Hata
0	0	0	0
0,1	-0,0110868	-0,0110742	1,26189x10-5
0,2	-0,0507792	-0,0507726	6,61847x10-6
0,3	-0,1186349	-0,1186297	5,11213x10-6
0,4	-0,2058466	-0,2058418	4,82766x10-6
0,5	-0,2954482	-0,2954433	4,87186x10-6
0,6	-0,3615204	-0,361515	5,37800x10-6
0,7	-0,3681773	-0,3681719	5,45695x10-6
0,8	-0,2684692	-0,2684639	5,29380x10-6
0,9	-0,003246	-0,0032445	1,47763x10-6
1	0,5	0,5001679	1,67955x10-4

Tablo 4 ve Tablo 5 te kollokasyon çözümleriyle denklem (16) ile verilen non-lineer problemin (üçüncü test problemi) çeşitli yöntemlerle bulunan çözümleri farklı x değerleri için karşılaştırılmıştır. Kollokasyon yöntemi ile bulunan çözümler diğer yöntemler ile bulunan çözümler ile uyum içerisindedir.

Tablo 4. Denklem (13) ile verilen problemin α=0,75 için kollokasyon çözümü ile diğer yöntemlerin karşılaştırılması

x	MHPM	EHPM	HWOMM	PLSM	Legendre Galerkin	Kollakasyon
0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,3138	0,3214	0,3095	0,307	0,3091	0,3012
0,4	0,4929	0,5077	0,4814	0,4819	0,4803	0,4759
0,6	0,5974	0,6259	0,5977	0,5969	0,5995	0,5938
0,8	0,6604	0,7028	0,6788	0,6783	0,6774	0,676
1	0,7183	0,7542	0,7368	0,7365	0,7374	0,7367

Tablo 5. Denklem (13) ile verilen problemin α=0,90 için kollokasyon çözümü ile diğer yöntemlerin karşılaştırılması

x	MHPM	EHPM	PLSM	Legendre Galerkin	Kollakasyon
0	0	0	0	0	0
0,2	0,2391	0,2647	0,2369	0,2386	0,2353
0,4	0,4229	0,4591	0,4211	0,4224	0,4198
0,6	0,5653	0,6031	0,5651	0,566	0,564
0,8	0,674	0,7068	0,6738	0,6745	0,673
1	0,7569	0,7806	0,7541	0,7545	0,7536

4. Sonuçlar

Mevcut çalışmada kesir türevli diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerini bulmak için kollokasyon yöntemi kullanılmıştır. Yöntem incelenen problemleri kollokasyon noktalarından yararlanarak bir denklem sistemine dönüştürme ve çözme şansı vermektedir.

Çalışmada ele alınan lineer olmayan problemler için, yaklaşık çözüm katsayılarının hesaplanma süresi, lineer problemlere kıyasla daha uzun sürmektedir. Bu durum, lineer olmayan denklem sistemlerinin çözümünü hızlandırabilecek algoritmalar veya sayısal yöntemler kullanılarak aşılabilir. Tablo 1 incelendiğinde, Daraghmeh ve ark. (2020) tarafından elde edilen çözümlere göre daha küçük mutlak hataların bulunması için beş kollokasyon noktasının yeterli olduğu görülmektedir. Dördüncü test problemi için oluşturulan Tablo 2'ye göre, bu yöntemle elde edilen değerler diğer çalışmalar ile uyumludur.

Kollokasyon yönteminin daha basit işlem adımlarına sahip olması, değerlendirilen diğer üç yönteme kıyasla önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, en büyük mutlak hata, kollokasyon

nokta sayısının artırılmasıyla azaltılmıştır. Birinci, ikinci ve son problemde olduğu gibi, bu yöntemle bazı durumlarda analitik çözüme ulaşmak mümkündür.

Yaklaşık çözüm olarak her ne kadar polinomlar önerilmiş olsa da kollokasyon yöntemi uygulanırken probleme bağlı olarak farklı türde fonksiyonlar kullanılabilir. Kollokasyon başlangıç değer problemleri için kullanılırken problemlerin alındığı referanslardaki gibi x değerleri 0 ve 1 arasında değiştirilmiştir. Yöntemin en az bir tane sınırın sonsuz olduğu problemlere uygulanmasında öncelikle bir değişken dönüşümü yapılarak sınırlardaki bu durumun ortadan kaldırılması uygun bir yaklaşım olacaktır. İncelenen problemlerden bazıları için kesin ve bazılarına ise uygun yaklaşık çözümlerin bulunabilmesi kullanılan bu yöntemin etkinliğini göstermektedir. Uygulanması ve programlanması kolay olan kollokasyon yöntemi sonraki çalışmalarda başta kesir türevli integro diferansiyel denklemler içerenler olmak üzere farklı türde problemlerin yaklaşık çözümlerini bulmakta kullanılabilir.

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

Albadarneh RB., Batiha IM., Zurigat M. Numerical solutions for linear fractional differential equations of order $1 < \alpha < 2$ using finite difference method (FFDM). Journal of Mathematics and Computer Science 2016; 16(1): 103-111.

Arıkoğlu A., Özkol İ. Solution of fractional differential equations by using differential transform method. Chaos, Solitons & Fractals 2007; 34(5): 1473-1481.

Benghorbal MM. Power series solutions of fractional differential equations and symbolic derivatives and integrals. Ph.D. dissertation, Faculty of Graduate Studies, The University of Western Ontario, Canada, 2004.

Bota C., Căruntu B. Analytical approximate solutions for quadratic Riccati differential equation of fractional order using the Polynomial Least Squares Method. Chaos, Solitons & Fractals 2017; 102: 339-345.

Cang J., Tan Y., Xu H., Liao SJ. Series solutions of non-linear Riccati differential equations with fractional order. Chaos, Solitons & Fractals 2009; 40(1): 1-9.

Cardone A., Conte D. Stability analysis of spline collocation methods for fractional differential equations. Mathematics and Computers in Simulation 2020; 178: 501-514.

Daraghmeh A., Qatanani N., Saadeh A. Numerical solution of fractional differential equations. Applied Mathematics 2020; 11: 1100-1115.

Fathy M., Abdelgaber KM. Approximate solutions for the fractional order quadratic Riccati and Bagley-Torvik differential equations. Chaos, Solitons & Fractals 2022; 162: 112496.

Hosseinnia SH., Ranjbar A., Momani S. Using an enhanced homotopy perturbation method in fractional differential equations via deforming the linear part. Computers & Mathematics with Applications 2008; 56(12): 3138-3149.

Karcı A. Kesir dereceli türevin yeni yaklaşımının özellikleri. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2015; 30(3): 487-501.

Khalil R., Al Horani M., Yousef A., Sababheh M. A new definition of fractional derivative. Journal of Computational and Applied Mathematics 2014; 264: 65-70.

Li Y., Sun N. Numerical solution of fractional differential equations using the generalized block pulse operational matrix. Computers & Mathematics with Applications 2011; 62(3): 1046-1054.

Li Y., Sun N., Zheng B., Wang Q., Zhang Y. Wavelet operational matrix method for solving the Riccati differential equation. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 2014; 19(3): 483-493.

Momani S., Odibat Z. Numerical comparison of methods for solving linear differential equations of fractional order. Chaos, Solitons & Fractals 2007; 31(5): 1248-1255.

Odibat Z., Momani S. Modified homotopy perturbation method: application to quadratic Riccati differential equation of fractional order. Chaos, Solitons & Fractals 2008; 36(1): 167-174.

Sivalingam SM., Pushpendra K., Govindaraj V. A neural networks-based numerical method for the generalized Caputo-type fractional differential equations. Mathematics and Computers in Simulation 2023; 213: 302-323.

Wang Z., Chen L., Song S., Cong PX., Ruan Q. Automatic cyber security risk assessment based on fuzzy fractional ordinary differential equations. Alexandria Engineering Journal 2020; 59(4): 2725-2731.

Zhijun M., Mingzu Y., Huang J., Lei S. Numerical solutions of nonlinear fractional differential equations by alternative Legendre polynomials. Applied Mathematics and Computation 2018; 336: 454-464.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1829-1844, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1829-1844, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Zemin Kar Yükü Değerinin Meteorolojik Veriler Kullanılarak Bulunması, Aksaray Örneği

Hatice Kübra ALTUNOK[1], Fatih Kursat FIRAT[2*]

[1]Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68240, Aksaray
[2]Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68240, Aksaray

[1]https://orcid.org/0000-0001-5493-8975
[2]https://orcid.org/0000-0003-0508-2845
*Sorumlu yazar: fkfirat@aksaray.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 04.03.2025
Kabul tarihi:28.05.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Çatı, kar yükü
İstatistiksel analiz
TS 498

ÖZ

Bu çalışmada bir bölgedeki zemin kar yükünün istatistiksel yöntemler kullanılarak nasıl hesaplanacağı anlatılmıştır. Örnek olarak Aksaray ili seçilmiş, bulunan zemin kar yükü değeri TS 498'de bu bölge için önerilen değer ile karşılaştırılmıştır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü meteoroloji istasyonlarına ait veriler kullanılarak istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Uygulanan analiz sonucunda uygun olasılık dağılım fonksiyonu seçilerek belirli bir tekerrür süresi için yeni zemin kar yükü değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan yeni değer, TS 498 standardında verilen nominal değer ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda TS 498 standardında yer alan Aksaray ili zemin kar yükü değerinin, kar yağışlarının nispeten yoğun bir şekilde görülmediği Aksaray ili için yüksek bir değer önerdiği, geçerli kar yükü standartlarından alınan değerlere göre yapılan tasarımların ekonomik olmadığı kanaati oluşmuştur.

Determination Ground Snow Load Value Using Meteorological Data, Aksaray Example Case

Research Article

Article History:
Received: 04.03.2025
Accepted: 28.05.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Roof snow load
Statistical analysis
TS 498

ABSTRACT

In this study, it is explained how to calculate the ground snow load in a region using statistical methods. Aksaray province was selected as an example case and the obtained ground snow load value was compared with the value recommended for this region in TS 498. Statistical analyzes were performed using data from snow observation stations concerning the General Directorate of Meteorology of the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change of the Republic of Turkey. As a result of the applied analyses, new ground snow load values were calculated by selecting the appropriate probability distribution function. The new calculated value was compared with the nominal value given in the TS 498 standard. As a conclude of the work, it was resulted that the ground snow load value for Aksaray province in the TS 498 standard suggested a high value for Aksaray province, where snowfall is relatively not seen intensively, and that designs made according to the values taken from the valid snow load standards were not economical.

To Cite: Altunok HK., Fırat FK. Zemin Kar Yükü Değerinin Meteorolojik Veriler Kullanılarak Bulunması, Aksaray Örneği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4):1829-1844.

1. Giriş

Kar yağışı, özellikle yoğun yağış olan bölgelerde çatı üzerinde kar birikmelerine ve bunun sonucu olarak yapıya etkiyen kar yüklerinden dolayı yapısal göçmelere neden olmaktadır. Bu durumun meydana gelmesindeki en önemli etkenlerden biri, yapılar için kullanılan tasarım kar yüklerinin olması gereken

gerçek diye nitelendirilebilecek kar yüklerinden düşük olmasıdır. Ülkemizde çatılardaki kar birikmelerinin nasıl olacağı ve bunun sonucunda meydana gelecek çökmelerin ne tür olacağına ait verilerin az olması konunun detaylıca incelenmesi ve çözüme ulaştırılması açısından eksiklik oluşturmaktadır. Ayrıca çatı imalatında görülen malzeme yetersizliklerinin, işçilik hatalarının ve ilgili standart ve yönetmeliklere uygunluğunun kontrol edilmesi ve etkin bir denetim mekanizması çalıştırılması gerekmektedir. Çatıların kar yüklerine karşı ekonomik ve güvenli bir şekilde tasarlanması, zeminde meydana gelen kar yükünün yanında çatı kar birikmesine sebep olan rüzgar gibi tüm etkenlerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Firat ve Yücemen, 2012). Yapının ısıtılması, çatının şekli, bitişik bir çatıdan kar düşmelerinin yaşanması gibi birçok faktör çatı üzerindeki kar miktarını dolayısı ile meydana gelecek kar yüklerini etkilemekle birlikte en önemli parametre çatının bulunduğu bölgenin maruz kaldığı kar yağışı ve bunun sonucunda ortaya çıkacak zemin kar yükleridir. Dolayısı ile zemin kar yüklerinin doğru belirlenebilmesi, çatı üzerine gelecek kar yükünün bina üzerine etkisinin bilinmesi ve tasarımın yapılmasında en kritik faktördür. Zira yapılan birçok çalışmada güncel standartlar ve yönetmeliklerde önerilen zemin kar yüklerinin doğruyu yansıtmadığı ifade edilmektedir. Bir yapıya etkiyen sabit (ölü) ve hareketli yükler yapının coğrafi konumundan bağımsız olsa da, deprem ve kar yükleri gibi çevresel yükler yapının konumuna büyük ölçüde bağlıdır. (Firat ve Yücemen, 2015; Ural ve ark., 2022) Bu çalışmada, meteorolojik kar verileri kullanılarak bir yerdeki zemin kar yükünün nasıl hesaplanacağı anlatılmıştır. Bunun içinde örnek olarak Aksaray ilindeki meteoroloji istasyonundan aylık maksimum kar su miktarı (mm) değerleri alınarak zemin kar yükü değerlerine dönüştürülmüş, istatistiksel yöntemler kullanılarak proje tasarımda kullanılacak Aksaray zemin kar yükü değeri bulunmuştur.

Zemin kar yüklerinin tespiti üzerine bölgesel bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle kar istasyonlarından elde edilen meteorolojik verilerin istatistiksel olarak incelenmeleri sonucunda elde edilen zemin kar yükleri ile ilgili bir takım önerilerde bulunulmuştur. Ellingwood ve O'Rourke (1985), çalışmalarında yapısal kar yüklerini olasılıksal yöntemlerle tasarlamışlardır. Newark ve ark. (1989) yaptıkları çalışmada Kanada'da 1975 yılına kadar olan kar verilerini kullanmışlardır. Bu kar verileri ile birlikte Kanada standardındaki kar verilerini yeniden hesaplamışlardır. Sack (1989) yaptığı çalışmada Kuzey Amerika'da bulunan kar verileri üzerinde incelemeler yapmıştır. Çalışmasında zemin-çatı kar yükü dönüşümleri ile Kanada ve Amerikan standartlarında yer alan değerleri yeniden ilişkilendirmiştir. Durmaz ve Daloğlu (2005), yaptıkları çalışmada Doğu Karadeniz bölgesinde yer alan tasarım zemin kar yükü değerlerini veren bir harita oluşturmuş ve Türk standartlarından TS 7046 ve TS 498'in konuya yaklaşımlarını irdelemişlerdir. Fırat (2009), yaptığı çalışmada meteorolojik verilerden elde ettiği çatı kar yüklerini Türkiye'deki farklı şehirler için incelemiş ve incelenen bu iller için TS 498'de verilen kar yükleri ile karşılaştırmıştır. Croce ve ark. (2018), yaptıkları çalışmalarında Avrupa'daki iklim değişikliğinden kaynaklı kar yüklerinin İtalya üzerinden yeniden analizini yapmışlardır. Meehleis ve ark. (2020), yaptıkları çalışmalarında Global Historical Climatology Network (GHCN)'den elde ettikleri 1950'den 2017'ye kadar olan kar derinliği ve kar suyu eşdeğeri ölçümlerini kullanarak Alaska'daki kar

yükü değerlerini hesaplamışlardır. Kumar ve ark. (2022), çalışmalarında Himalaya'nın bazı bölgeleri için yeni bir yönteme dayalı olarak elde ettikleri verileri kullanarak zemin kar yükleri için yeni bir yaklaşım benimsemişlerdir. Ivanov ve ark. (2022), yaptıkları çalışmalarında Kuzey Avrupa'da iklim değişikliğinin kar yükleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Gu ve ark. (2022), yaptıkları çalışmalarında Çin'in belirli bir bölgesinde rüzgar etkisini göz önüne alarak çatılardaki kar yükleri üzerinde istatistiksel değerlendirmeler yapmışlardır.

Kar yükleri aşağıda gösterilen başlıca sebeplerden dolayı önemli bir yapısal faktördür. Bunlar;

-Yapının soğuk ve karlı bölgelerde inşa edilmiş olması

-Kendisine bitişik daha yüksek bir yapının olması

-Yapının çatısının normal tasarımlardan farklı ve kar birikmesine sebep olacak bir geometriye sahip şekilde tasarlanması olarak sıralanabilir.

Her ne kadar kar miktarından kaynaklı çatı hasarlarına ait istatistiksel veri ve bilgilerin yetersizliği konunun açık bir şekilde incelenmesi açısından bir handikap oluştursa da basın-yayın organlarından elde edilen bilgiler ışığında çok önemli düzeyde hasarlar meydana geldiği ve bunun sonucunda ciddi mal ve can kayıplarının olduğu görülmektedir. Bu kayıpların oluşmasındaki en belirleyici nedenlerin başında standart ve yönetmeliklerde verilen tasarım kar yüklerinin (nominal) o bölgede meydana gelen kar yağışı nedeniyle oluşan kar yüklerinden daha düşük olmasıdır (Durmaz ve Daloğlu, 2005; Firat 2007). İlaveten standart ve yönetmeliklerde önerilen kar yükleri, gerçek kar yüklerinden fazla ise çatı tasarımları ekonomik olmayacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Zemin Kar Yükleri

2007 basımlı TS EN 1991.1.3'de zemin kar yükleri doğrudan 1997 basımlı TS 498'den alınmıştır. Fakat TS 498'deki zemin kar yükü değerleri 2021 yılında yenilenmiştir. 1997 basımlı TS 498'de dört kar bölgesi var iken 2021 basımlı TS 498'de kar bölgesi sayısı dokuza çıkarılmıştır. Ayrıca il ve ilçe merkezlerindeki zemin kar yükü değerleri revize edilmiştir. Buna rağmen 2007 basımlı TS EN 1991.1.3'de hala 1997 basımlı TS 498'de verilen zemin kar yükü değerleri kullanılmaktadır. Böyle olunca 2021 yılında basılan TS 498-2021 ile 2007 yılında basılan TS EN 1991.1.3 arasında farklı değerler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca 2025 yılı Mart ayında TS EN 1991.1.3 yeniden güncellenmiştir fakat standartta Türkiye için zemin kar yükü değerleri önerilmemiştir.

Tüm dünyada genellikle zemin kar yüküne ait meteorolojik değerler kar-su eşdeğeri ve kar derinliği ölçümü yapan iki farklı tipteki istasyonlardan elde edilir. Ülkemizde de kar yağış verileri, kar-su eşdeğerliği ile kar derinliği ölçümü yapan istasyonlar veya sadece kar derinliği ölçümü yapan istasyonlardan alınmaktadır. Aksaray ilinde yer alan meteoroloji istasyonu kar-su eşdeğeri ölçümü de yapan bir istasyondur. Bu çalışmada hesaplanan zemin kar yükü değerleri, birçok akademik makalede kar su eşdeğeri olarak da ifade edilen kar-su miktarı ($mm=kg/m^2$) verileri kullanılarak hesaplanmıştır. İlaveten, Aksaray istasyonu için kar derinliği değerleri de kontrol maksadıyla analiz edilmiştir. Kar-su

eşdeğerliği cinsinden elde edilen veriler, kar yükü hesaplamalarında daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Kar-su eşdeğeri, kar yağış miktarının yanında karlı dönem aralığında yağan yağmur miktarını da dikkate alır. Bu veriler, zemin kar yüklerinin belirlenmesinde nispeten daha güvenilirdir. Fakat dünyadaki çoğu meteoroloji istasyonu, kar derinliğini ölçmektedirler. Bu kar derinliklerinden faydalanılarak, kar yoğunluğu ve derinliği arasında formülüzasyon oluşturulması yoluyla zeminde meydana gelen kar yükleri de elde edilmektedir.

Zemin kar yükü verilerinin elde edilmesinde kar-su eşdeğeri verilerinin kullanılması nispeten daha hassas değerler sunmasına rağmen verilerin toplandığı istasyonların bulundukları konum ve ölçüm yapma sıklığı da verilerin güvenir olmasına etki etmektedir. Çok genel anlamda üzerinde yerleşim yerlerinin yakınında bulunan günlük ölçüm yapan kar rasat istasyonlarının verilerine, çoğunlukla dağlık alanlarda ölçüm yapan ve 15 günlük veya aylık ölçüm yapan kar istasyonlarının verileri daha çok önemsenmektedir.

2.1.1 2.1.1. Zemin Kar Yüklerinin Olasılık Dağılım Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Zemin kar yükü karakteristik değerlerin hassasiyetle belirlenebilmesi, kar yağışı istatistiksel verilerin hangi olasılık dağılım fonksiyonuna (ODF) uyduğunun doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Verilerin hangi ODF'ye uygun olduğunun belirlenmesi ölçüm yapan istasyonun coğrafi ve iklim şartlarına göre ortaya çıkan kar yağış miktarlarına bağlıdır (Soukhov, 2002; Durmaz ve Daloğlu, 2005). Zemin kar yüklerinin belirlenmesinde çeşitli dağılımlar tercih edilmesine rağmen genellikle Lognormal, Ekstrem Değer Dağılımı Tip I (Gumbel) ve Weibull dağılımları daha fazla tercih edilmektedir.

2.1.2 2.1.2. Olasılık Dağılım Fonksiyonları

Veriler için en uygun dağılımın belirlenmesinde başvurulan çok çeşitli testler mevcuttur. Bu çalışma kapsamında Easyfit programından faydalanılarak verilerin Gamma, Gen. Extrem Value, Gen. Gamma, Gumbel max, Gumbel min, Lognormal, Normal ve Weibull olasılık dağılım fonksiyonlarından hangisine uygun olduğu Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling ve Ki-Kare testlerine göre belirlenmiştir. İlaveten farklı bir yöntem olarak Maksimum Olasılık Çizgisi Korelasyon Katsayısı (MOÇKK) testi uygulanılmıştır. MOÇKK testine göre verilerin Lognormal, Gumbel ve Weibull dağılımlardan hangisine uygunluk gösterdiğine bakılmıştır.

Lognormal dağılım da standart sapma değeri σ ve aritmetik ortalama değeri; μ aşağıda verilen denklem (1) ve denklem (2) uygulanarak bulunur:

$$\ln\left[\frac{\mu_x}{\left(\frac{{\sigma_x}^2}{{\mu_x}^2}+1\right)^{1/2}}\right] \tag{1}$$

$$\sigma_y = \left[ln\left(\frac{{\sigma_x}^2}{{\mu_x}^2} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

Log-normal dağılımda bulunan x değeri olasılık yoğunluk fonksiyonu denklem (3)'te olduğu gibi şu şekilde yazılır:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_{y\sqrt{2\pi}}} exp\left[-\frac{\left(lnx - \mu_y\right)^2}{2{\sigma_y}^2} \right] x > 0 \quad (3)$$

Gamma istatistiksel dağılımı ise iki parametreden oluşan sürekli dağılımdır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu denklem (4)'te gösterilmiştir;

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x} \; x > o \quad (4)$$

formülü yardımı ile bulunmaktadır. Γ(α) gamma fonksiyonu denklem (5) kullanılarak bulunur;

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} d_x \quad (5)$$

α: Biçim parametresi olarak ifade edilir. Gamma fonksiyonundaki α önemli bir belirleyicidir. α arttıkça gamma dağılım fonksiyonu normal dağılım fonksiyonuna yaklaşır. Gamma dağılımı, lognormal dağılımda olduğu gibi pozitif değerlerde tanımlıdır. İki parametreli bir dağılımdır. İki parametreli gamma dağılım fonksiyonu denklem (6) gibidir;

$$F(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{\frac{-x}{\beta}} \; x > 0, \beta > 0 \quad (6)$$

β; Ölçek parametresi

Bu fonksiyonda aritmetik ortalama $\mu_x = \alpha\beta$ ve Var (X) = $\alpha\beta^2$ şeklindedir.
Gumbel dağılım dikkate alınacak olursa eklenik dağılım fonksiyonu denklem (7) ile ifade edilir:

$$F(x) = P(X \leq x) = exp\{-exp[-\alpha(x - \beta)]\} \quad (7)$$

Momentler yönteminde Gumbel katsayıları denklem (8) kullanılarak bulunur;

$$\mu_x = \beta + \frac{0{,}577}{\alpha}, \mu_x = \frac{1{,}282}{\alpha} \quad (8)$$

2.2. Olasılık dağılım testleri

2.2.1 Kolmogorov Smirnov Testi

Bu testi ilk olarak 1933 senesinde Kolmogorov tek örnek için uyum iyiliği testi şeklinde önermiştir. Daha sonra 1939 yılında Rus bilim insanı Smirnov iki bağımsız örnek için uyum iyiliği testi olarak geliştirmiştir. Benzer oldukları için test, Kolmogorov-Smirnov testi diye isimlendirilir. Burada uygulanan istatistik denklem (9) ile hesaplanır;

$$\Delta = max_i |F(x_i) - Q(x_i)| \quad (9)$$

$Q(x_i)$ teorik dağılım için eklenik olasılık fonksiyonu, $F(x_i)$ Eklenik olasılık fonksiyonu olarak ifade edilir. $Q(x_i) = i/N$ (i=1,2,3..., N) bağıntısı kullanılarak belirlenir. Hesaplanan Δ ve kritik Δ karşılaştırılır. Elde edilen Δ, kritik Δ'dan düşükse teste uygun olduğuna karar verilir, büyük bir değer alırsa teste uygun olmadığı düşünülür. Tablo 1'de Kolmogorov-Smirnov testi yapılırken kullanılan kritik Δ_α'lar gösterilmiştir.

Tablo 1. Kolmogorov-Smirnov testi için Δ_α kritik değerleri.

N	A			
	0,01	0,05	0,10	0,20
5	0,67	0,56	0,51	0,45
10	0,49	0,41	0,37	0,32
15	0,40	0,34	0,30	0,27
20	0,36	0,29	0,26	0,23
25	0,32	0,27	0,24	0,21
30	0,29	0,24	0,22	0,19
35	0,27	0,23	0,20	0,18
40	0,25	0,21	0,19	0,17
45	0,24	0,20	0,18	0,16
50	0,23	0,19	0,17	0,15
>50	$\frac{1{,}63}{\sqrt{N}}$	$\frac{1{,}36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1{,}22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1{,}07}{\sqrt{N}}$

2.2.2. Ki-Kare Testi

Bu testte, gözlenen değer ile beklenen değer kıyaslanmaktadır. Gözlenen değerin beklenen değer ile uygunluğuna bakılmaktadır. Ki-Kare testi için yapılan hesaplamalarda, bir değişkendeki K elemanlı örnek n adet grupta yer alır ve her bir gruptaki bulunan (i= 1,2,3...k) eleman sayısı için hesaplama yapılmaktadır. Aynı grup içerisinde yer alma olasılıkları pi olarak verilirse denklem (10) kullanılarak hesaplanır;

$$X^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{\left(N_i - N_{pi}\right)^2}{N_{pi}} \quad (10)$$

Teorik dağılımda gözlenen değer; Ni, beklenen değer; Npi olarak gösterilmektedir. Dağılım serbestlik derecesi n-1'dir. Bu testte, beklenen ve gözlenen değerlerin birbirine yaklaşması halinde $\chi 2$ istatistik değeri de sıfır değerine yaklaşır. Bulunan $\chi 2$ için, n-1 serbestlik derecesinde aşılma olasılığı α ile tanımlanmış $\chi 2\alpha$'dan düşük bir değerde dağılım için uygun olduğu, büyük bir değer ise dağılım için uygunluk göstermediği sonucu çıkar.

2,3. Çatı kar yükleri

Çatı kar yükleri tasarım değerleri bir takım etkenlere bağlıdır. Bu etkenler;

Çatı şekli,

Termal özellikleri,

Satıh pürüzü,

Çatı altındaki ısının miktarı,

Yan binaya ait uzaklık,

Çevredeki arazilerin yapısı,

Bölgesel meteorolojik iklim yapısı,

Özellikle rüzgar, sıcaklık değişkenliği

Bunlara ilave olarak yapının bulunduğu alandaki kar yağışı miktarı, karın çatı üzerinde belirli bir bölgede birikmesi, düzensiz kar yüklemeleri, coğrafi bölgesel etkenler ve çatı üzerinden kayan kar kütlesi çatı kar yükü hesaplamalarında dikkat edilmesi gereken etkenler olarak değerlendirilmelidir. Bu parametrelerin çatı kar yükü üzerindeki etkilerinin dikkate alınması, belirli bir bölgede inşa edilecek yapı için kullanılacak karakteristik çatı kar yüklerinin hesaplanmasında önemlidir.

Bu parametreler arasında çatı kar yükü üzerinde en önemli etkiye sahip olan parametre rüzgar etkisidir. Çünkü rüzgar etkisi çatı üzerinde kar birikmesinin birincil sebebidir. Bitişik nizam yapılarda daha düşük kota sahip yapı kar yükünden daha fazla etkilenmektedir. Bunun yanında yüksek kottaki çatı üzerinden ani kaymalar ile düşük kotlu çatı üzerine düşecek olan kar kütleleri daha büyük kar yükü oluşturacaktır. Ayrıca yapıya ilave yapılacak yeni bölüm ya da yapılar kar yükünü değiştirecektir.

Ülkemizde çatı kar yükleri hesabında TS EN 1991-1-3 yönetmeliği kullanılmaktadır. TS 498 standardında il ve ilçelere göre zemin kar yükleri tanımlanmıştır. Tanımlanan yükler, TS EN 1991-1-3 yönetmeliğinde belirtilen dönüştürme katsayıları kullanılarak çatı kar yüklerine dönüştürülmektedir. TS 498 standardında ülke genelinde bulunan tüm istasyonlar haritalandırılmıştır. Harita üzerinde istasyonlar 1'den 9'a kadar numaralandırılarak bölgelere ayrılmıştır. Her bir istasyon için zemin kar yükü değeri bulunduğu bölge numarasına ve rakıma bağlı olarak değer almaktadır. Elde edilen zemin kar yükleri TS EN 1991-1-3 standardında tanımlanan aşağıdaki denklem (11)'e göre çatı kar yükü olarak hesaplanmaktadır.

$$S = \mu_i C_e C_t S_k \tag{11}$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Zemin kar yükünün belirlenmesi

Aksaray ilinde bulunan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne bağlı ölçüm yapan istasyondan elde edilen verilerden yararlanılmıştır. İstasyondan elde edilen aylık maksimum kar verileri kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Bu çalışmada kar-su eşdeğeri türünden ölçüm yapan istasyondan elde edilen kar verileri değerlerinin zemin kar yüküne çevrilmesi aşağıda verilen denklem (12) ile yapılabilir (Durmaz ve Daloğlu, 2004; Durmaz ve Daloğlu, 2005).

$$X=\rho_w\, g\, h_W /10^6 \tag{12}$$

Burada X, zemin kar yükü (kN/m^2)

ρ_w, suyun özgül ağırlığı (1000 kg/m^3)

g, yerçekimi ivmesi (9,807 m/s^2)

h_W, kar-su eşdeğeri (mm).

Tablo 2. Aksaray ili yıllık kar yükü değerleri

Yıl	h_W(mm)	X(kN/m^2)	Yıl	h_W(mm)	X(kN/m^2)
1972	45,7	0,448	2001	6,3	0,062
1973	14	0,137	2002	29,2	0,286
1974	48	0,471	2003	21	0,206
1976	36,8	0,361	2004	14,3	0,140
1977	31,5	0,309	2005	9	0,088
1978	7,8	0,076	2006	26,7	0,262
1981	15,8	0,154	2007	17,2	0,169
1982	11,1	0,109	2008	16,6	0,163
1983	18,2	0,178	2009	6,2	0,061
1985	32	0,314	2011	9,7	0,095
1987	56,3	0,552	2012	19,3	0,189
1988	27,4	0,269	2013	10,6	0,104
1989	12,3	0,121	2015	6,2	0,061
1990	8,7	0,085	2016	33	0,324
1991	37,6	0,369	2017	34	0,333
1992	18,3	0,179	2018	18	0,176
1993	21	0,206	2019	28	0,275
1994	17	0,167	2020	12,8	0,126
1995	19,4	0,190	2021	7	0,069
1996	9,8	0,096	2022	150	1,471
1997	15,2	0,1491	2023	7,2	0,071
1998	11,5	0,113	2024	18	0,177
2000	40,5	0,397	2025	12,8	0,126

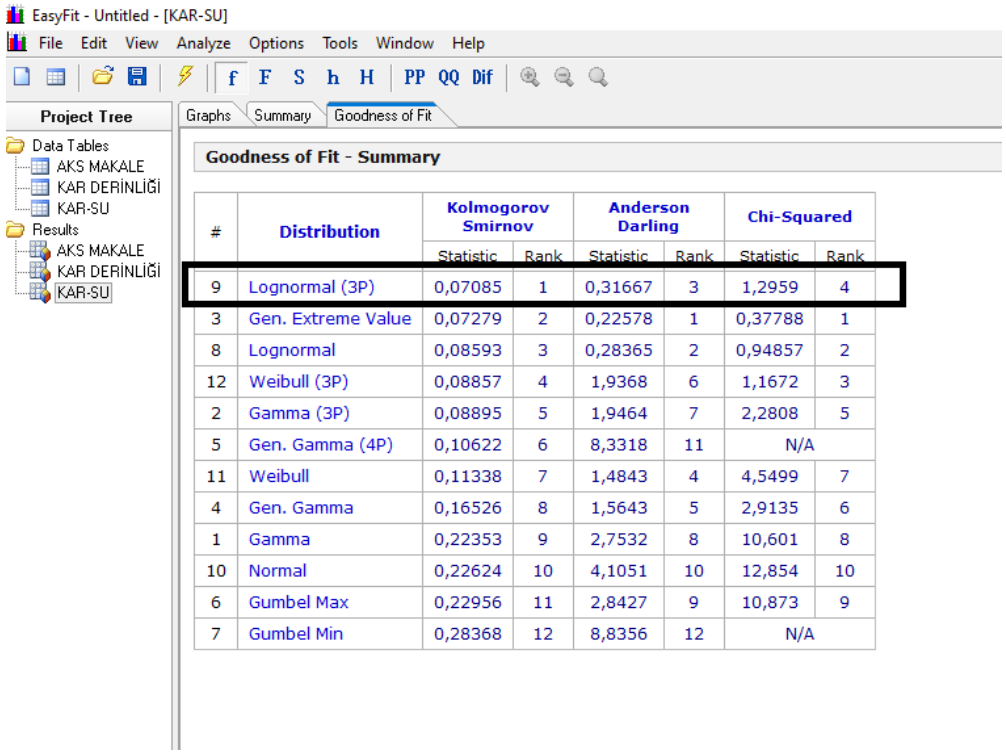
10^6 katsayısı mm ve N birimlerini m ve kN çevirmek için kullanılmaktadır.

Aksaray ilindeki istasyonlarda 1972-2025 yılları arasında yapılan ölçümler sonucu elde edilen yıllık maksimum kar-su eşdeğerliği verileri Tablo 2'de gösterildiği gibi yıllara göre sıralanarak denklem (12) ile zemin kar yüklerine dönüştürülmüştür.

3.2. Olasılık Dağılımının Seçimi

Veriler için en uygun dağılımın belirlenmesinde başvurulan çok çeşitli testler mevcuttur. Bu çalışma kapsamında Easyfit programından faydalanılarak verilerin, Gamma, Gen. Gamma, General Extrem Value, Gumbel Max, Gumbel Min, Normal, Lognormal, ve Weibull olasılık dağılım fonksiyonlarından hangisine uygun olduğu Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling ve Ki-Kare testine göre belirlenmiştir.

Aksaray ili zemin kar yükü verilerinin hangi ODF'ler için uygunluklarının analiz edileceği belirlenmiştir. Tablo 2'de verilen Aksaray ili kar yükü değerleri programa yüklenmiştir. Daha sonra hangi dağılımlar için uygunluklarına bakılacağı seçilmiştir. Şekil 1'de verildiği gibi bu dağılımlar arasından, Gamma, Gen. Gamma, General Extrem Value, Gumbel Max, Gumbel Min, Normal, Lognormal, Lognormal (3P) ve Weibull dağılımları seçilerek verilerin hangisine uygun oluğuna karar verilmiştir. Uygunluk için testler belirlendikten sonra veriler analiz edilmiştir. Kolmogorov Smirnov, Anderson-Darling ve Ki-Kare testlerine göre verilerin Lognormal (3P) dağılıma uygun oldukları görülmüştür.



#	Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
		Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank
9	Lognormal (3P)	0,07085	1	0,31667	3	1,2959	4
3	Gen. Extreme Value	0,07279	2	0,22578	1	0,37788	1
8	Lognormal	0,08593	3	0,28365	2	0,94857	2
12	Weibull (3P)	0,08857	4	1,9368	6	1,1672	3
2	Gamma (3P)	0,08895	5	1,9464	7	2,2808	5
5	Gen. Gamma (4P)	0,10622	6	8,3318	11	N/A	
11	Weibull	0,11338	7	1,4843	4	4,5499	7
4	Gen. Gamma	0,16526	8	1,5643	5	2,9135	6
1	Gamma	0,22353	9	2,7532	8	10,601	8
10	Normal	0,22624	10	4,1051	10	12,854	10
6	Gumbel Max	0,22956	11	2,8427	9	10,873	9
7	Gumbel Min	0,28368	12	8,8356	12	N/A	

Şekil 1. Verilerin test edileceği olasılık dağılım fonksiyonunun belirlenmesi

Analiz sonucunda Şekil 2'de verilen sıralamalara göre dağılımlarının Anderson Darling, Kolmogorov Smirnov ve Ki-Kare testlerine göre kritik ve hesaplanan değerleri verilmiştir. Kritik değerler $\alpha = 0,05$

anlamlılık düzeyinde belirlenmiştir. Kolmogorov Smirnov testi için hesaplanan Δ ve kritik Δ değeri sırası ile 0,07085 ve 0,19625 olarak bulunmuştur. Anderson Darling testi için hesaplanan ve kritik değerler sırasıyla 0,31667 ve 2,5018 olarak belirlenmiştir. Ki-Kare testi için ise hesaplanan X^2 ve kritik X_α^2 değerleri 1,2959 ve 11,07 olarak hesaplanmıştır.

Bir diğer yöntem olarak seçilen MOÇKK testi için de yeniden hesaplamalar yapılmıştır. Aksaray ili örneği üzerinden verilerin Lognormal, Gumbel ve Weibull dağılımları arasından hangisine uygun olduğu SPSS programı kullanılarak karar verilmiştir. Öncelik olarak yıllık maksimum kar-su eşdeğerliği değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. Bu sıra numaraları dikkate alınarak her bir ekstrem değere ait ilk olarak test edilen dağılım için aşılmama olasılığı Pi ve sonra bu aşılmama olasılığından dağılımın olasılık kağıdına göre azaltılmış değişken değeri Zi hesaplanmıştır.

Goodness of Fit - Details [hide]

Lognormal (3P) [#9]					
Kolmogorov-Smirnov					
Sample Size Statistic P-Value Rank	46 0,07085 0,96241 1				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Critical Value	0,15457	0,17665	0,19625	0,21944	0,23544
Reject?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Sample Size Statistic Rank	46 0,31667 3				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Critical Value	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Reject?	No	No	No	No	No
Chi-Squared					
Deg. of freedom Statistic P-Value Rank	5 1,2959 0,93535 4				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Critical Value	7,2893	9,2364	11,07	13,388	15,086
Reject?	No	No	No	No	No

Şekil 2. Verilerin dağılımlar için uygunluklarının belirlenmesi

Dikkate alınan dağılımda her veri seti için yıllık ekstremler veya bu değerlerin e tabanına göre alınmış logaritmaları ile dağılımın olasılık kâğıdındaki azaltılmış değerler arasındaki korelasyon katsayı değeri

hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu korelasyon katsayı değeri için de dikkate alınan dağılım türleri için ayrı olarak bulunan 0,01 anlamlılık düzeyindeki katsayılara bakılır. Bu çalışma kapsamında uygunluk testi yapılan dağılımlar Weibull, Lognormal ve Gumbel dağılımlarıdır. Bu yüzden korelasyon katsayıları, Lognormal dağılım testi için yıllık ekstremlerin e tabandaki logaritmik değerleri ile Lognormal dağılıma ait olasılık kâğıdındaki azaltılan değişken değerleri arasında, Gumbel dağılım testi için ise yıllık ekstrem değerlerle Gumbel dağılımına olasılık kâğıdına bağlı azaltılmış değişken değerleri arasında son olarak Weibull dağılım testinde ise yıllık ekstrem değerlerin e tabanına bağlı olarak hesaplanan logaritma değerleri ve Weibull dağılıma ait olasılık kâğıdına göre azaltılmış değişken değerleri arasında hesaplanmaktadır. Her ekstrem değer için aşılmama olasılığı Pi, Lognormal dağılımda denklem (13) ile hesaplanır (Durmaz ve Daloğlu, 2005);

$$P_i = (i - 0{,}4)/(N + 0{,}2)\ i = 1{,}2, \dots, N \tag{13}$$

Formülü ile bulunurken Weibull ve Gumbel dağılımlar için denklem (14);

$$P_i = i/(N + 1)\ i = 1{,}2, \dots, N \tag{14}$$

kullanılarak bulunur. Her bir ekstrem değer için azaltılmış değişken değeri Zi, Lognormal dağılımda denklem (15);

$$Z_i = \Phi - 1(P_i) \tag{15}$$

ile, Gumbel dağılımda denklem (16);

$$Z_i = -ln(-lnP_i) \tag{16}$$

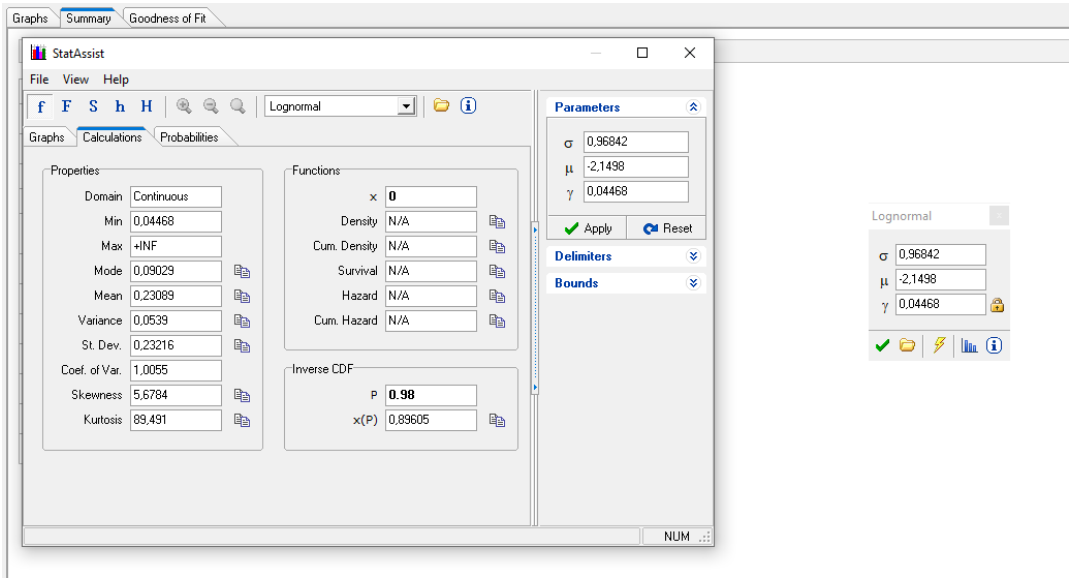
ile bulunur. Weibull dağılımda ise denklem (17);

$$Z_i = ln[-ln(1 - P_i)] \tag{17}$$

ile bulunur.

Gumbel dağılımda r = 0,986, Lognormal dağılımda korelasyon katsayısı r = 0,982 ve Weibull dağılımda ise r = 0,941 olarak hesaplanmıştır. Buna göre Aksaray istasyonuna ait zemin kar yükleri için bulunan en uygun dağılım, r oranının en büyük değer aldığı, Gumbel dağılımıdır. Fakat hem uygunluk değerleri arasında anlamlı bir fark olmadığından hem de Easyfit programında yaptığımız analizler de her bir test için Lognormal dağılıma uygun olmasından kaynaklı hesaplamalarda Lognormal dağılım tercih edilmiştir.

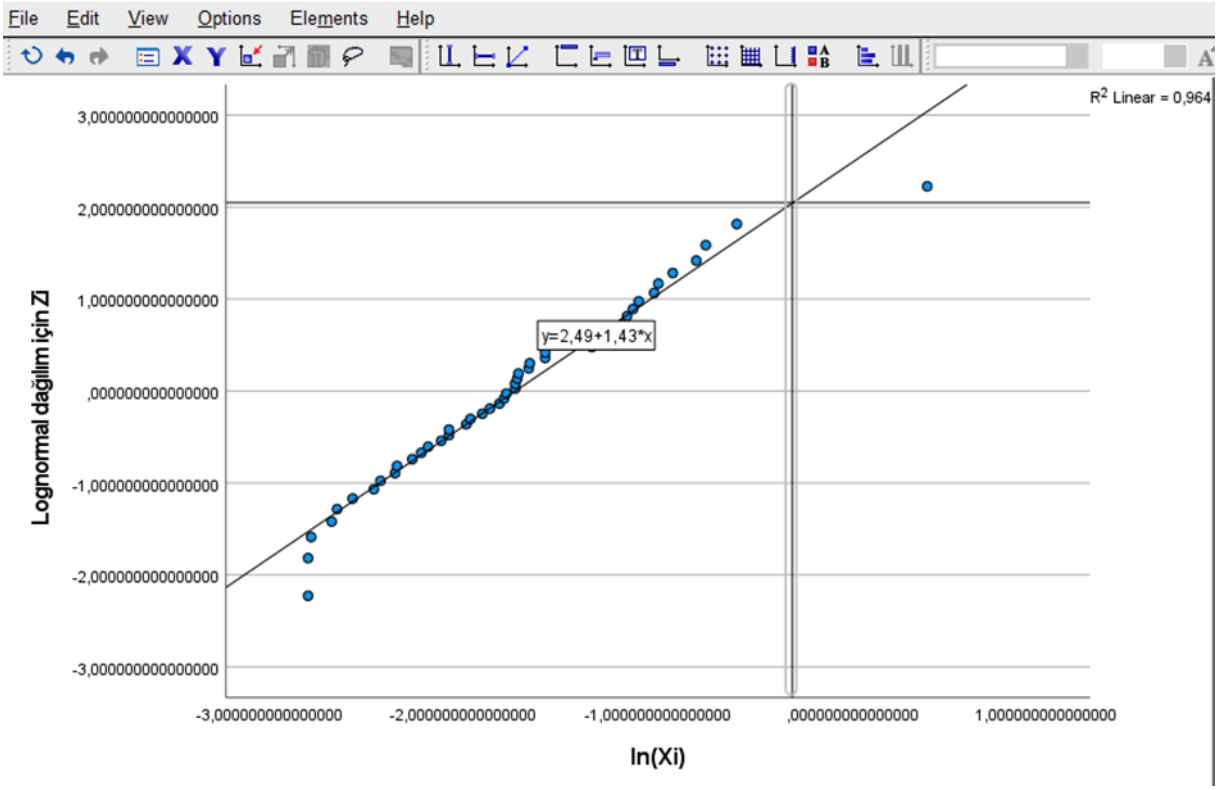
Çalışmanın amacı doğrultusunda, veriler için en uygun dağılım belirlendikten sonra Aksaray ili için belli bir ortalama tekerrür süresi (OTS) dikkate alınmıştır. Bu OTS'ye bağlı olarak zemin kar yükü hesaplanmıştır. Herhangi bir bölge için 25, 50 ve 100 yıllık dönemlerde beklenen maksimum kar yükü değeri belirli bir olasılıkla belirlenir. Kar yükü hesaplamalarında çoğunlukla 50 yıllık dönem dikkate alınır. Bu çalışmada da kar yükleri hesaplamalarında aşılmama OTS'si 50 yıl olan değerler hesaplanmıştır. 50 yıl OTS için aşılma olasılığı 1/50 = 0,02, aşılmama olasılık değeri P = 0,98 olarak hesaplanmıştır. Easyfit program üzerinde Lognormal (3P) dağılım için P = 0,98 değerine karşılık gelen zemin kar yükü değeri elde edilmiştir. Programda Lognormal (3P) analiz tablosunda dağılım parametre değerleri olan μ, σ, γ hesaplanarak eklenmiştir. Aksaray ili için Easyfit programında hesaplanan μ = -2,1498, σ = 0,96842 ve γ =0,04468 olarak bulunmuştur. Şekil 3'te verilen tabloda Aksaray istasyonuna ait verilerin parametre değerleri ve aşılmama olasılığı P = 0,98 değeri için hesaplanan yeni zemin kar yükü X(P) = 0,89 kN/m^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Aksaray ili zemin kar yükü değerinin hesaplanması

Diğer bir yöntem olan MOÇKK testinde ise bu çalışmada amaçlanan sonuç doğrultusunda, Aksaray istasyonuna ait verilere en uygun olacak olasılık dağılım fonksiyonları belirlenmiştir. Aksaray istasyonuna ait belirli bir OTS'li zemin kar yükü değeri bulunmuştur. Buna bağlı olarak zemin kar yüklerinin aşılma olasılığı 1/50 olan veya OTS'si 50 yıl olan değerler hesaplanmıştır. X_{50}, 50 yıl OTS'ne sahip zemin kar yükü değerini göstermektedir. X_{50} değeri uygun dağılıma bağlı olarak hesaplanmaktadır. Aksaray istasyonu zemin kar yükü verileri bu istasyon için seçilen en uygun dağılım olan Lognormal dağılımın olasılık kâğıdına eklenir ve en küçük kareler yöntemi uygulanarak verilerin arasından geçecek doğru bulunur. Dağılıma ait olasılık kâğıdı üzerindeki aşılmama olasılığı P=0,98 değerine bağlı olarak hesaplanan Z_i değerinin doğruyla çakıştığı noktadan indirilen dikmeyle X_{50} hesaplanır. Aşılmama olasılığı P=0,98 değerine göre Lognormal dağılım için Z_i değeri 2,05, Gumbel dağılım için Z_i değeri 3,90 ve Weibull dağılım için Z_i değeri 1,36'dır.

Şekil 4'te Aksaray istasyonunu zemin kar yük değerleri için alınan Lognormal dağılımın olasılık kâğıdına değerlerin yerleştirilmesi ve X_{50}'nin en küçük kareler metoduyla verilerin arasından geçirilen doğru yardımıyla belirlenmesi görülmektedir. Doğrudan inilen dikmenin gösterdiği -0,308 değeri ln(X_{50})'yi göstermektedir. Buradan kolayca X_{50}=0,73 kN/m^2 bulunur.



Şekil 4. Aksaray ili zemin kar yükünün MOÇKK testi ile hesaplanması

Aksaray ili için zemin kar yükü değerinin belirlenmesinde iki farklı yöntem tercih edilmiştir. İki yöntemde hesaplama adımları uygulanarak zemin kar yükü değerleri bulunmuştur. Hesaplamalar sonucunda her iki yöntem için Aksaray ili verilerinin Lognormal dağılıma uygunluk gösterdiği belirlenmiştir. İki yöntem için Lognormal dağılım dikkate alınarak zemin kar yükü değeri elde edilmiştir. İlk yöntemden elde edilen değer 0,89 kN/m^2 olarak bulunmuştur. İkinci yöntem olan MOÇKK testine göre ise Aksaray ili zemin kar yükü 0,73 kN/m^2 hesaplanmıştır. Güvenli bölgede kalmak için Aksaray ili zemin kar yükü değeri X_{50}=0,90 kN/m^2 olarak alınmıştır.

3.3. Çatı kar yükünün belirlenmesi

Aksaray ili için elde edilen zemin kar yüklerinin çatı kar yüklerine dönüştürülmesinde denklem (11)'den faydalanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu denklemde Maruz kalma katsayısı, C_e, TS EN 1991-1-3 Çizelge 5.1'e göre topografik bölge sınıfı rüzgara açık olması durumunda 0,8, normal olması durumunda 1,0, korunmuş duruma göre 1,2 olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada normal topografik durumu dikkate alarak C_e = 1,0 alınmıştır.

Isı katsayısı, C_t, TS EN 1991-1-3 bölüm 5.2 (8)'de yüksek sıcaklık iletiminden dolayı (>1 W/m^{2}K) dolayı, özellikle bina çatı altında oluşacak termal kaybın çatı yüzeyi üzerinde oluşturacağı etki nedeniyle erimelerin oluştuğu bazı cam kaplamalı çatılarda çatı kar yükü değerindeki azalmaların hesaba dâhil edilmesi için kullanılmasını bunun dışındaki tüm durumlarda ise: C_t =1,0 alınmasını belirtmiştir. Bu çalışmada ısı katsayısı C_t =1,0 alınmıştır.

Şekil katsayısı μ_i, TS EN 1991-1-3 bölüm 5.3'te bütün çatı tipleri için birikmiş ve birikmemiş kar yükleri için ayrı ayrı düzenlenmiştir. Çalışmada tek eğimli çatılar için TS EN 1991-1-3 bölüm 5.3.2'de verilmiş olan μ_i = 0,8 değeri kullanılmıştır.

Aksaray ili için seçilen değer (0,90 kN/m^2) denklem (11) kullanılarak yukarıda ilgili parametreleri verilen bir çatı için 0,72 kN/m^2 olarak hesaplanmıştır. Burada verilen değer sadece basit tek eğimli bir çatı için örnek olarak verilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, OTS 50 yıl için zemin kar yükü istatistiksel analizlerle hesaplanmıştır. Aksaray ilinde bulunan ve kar-su eşdeğerliği ölçümü yapan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne ait meteoroloji istasyonundan 1972 yılından günümüze yıllık maksimum kar-su miktarı (mm=kg/m^2) verileri alınarak zemin kar yüküne çevrilmiştir. Bu değerlerin hangi istatistiksel dağılıma uyduğunun belirlenmesi için iki farklı yaklaşım tercih edilmiştir. İlk olarak istatistiksel uygunluk testleri (Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling ve Ki-Kare) yardımıyla en uygun dağılımın ne olacağına karar verilmiştir. Literatürde en çok kullanılan Gamma, Gen. Extrem Value, Gamma, Gumbel Max, Gumbel Min, Lognormal, Lognormal (3P), Normal ve Weibull dağılımları incelenmiştir. Bir diğer yaklaşım olarak MOÇKK testi dikkate alınmıştır. Aksaray istasyonu verilerinin bu yöntemde Lognormal, Gumbel ve Weibull dağılımlarından hangisine uygun olduğu belirlenmiştir. Uygulanan testler sonucunda Aksaray ili verilerinin Lognormal dağılıma uygunluk gösterdiği belirlenmiştir. İlk yöntemde Lognormal (3P) dağılıma uygunluk gösteren verilerden 50 yıllık ortalama tekerrür süreli yeni zemin kar yükü değeri belirlenmiştir. İkinci yöntemde ise Lognormal dağılıma bağlı olarak X_{50} değeri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda Aksaray ili için aşılma olasılığı 0,02 olan zemin kar yükü değeri 0,90 kN/m^2 olarak hesaplanmıştır.

TS 498 standardında Aksaray ili haritada altıncı bölgede yer almakta olup zemin kar yükü değeri 1,30 kN/m^2 olarak verilmektedir. Standarttan alınan değer ile istatistiksel analiz sonucunda elde ettiğimiz 0,90 KN/m^2 değeri kıyaslandığında TS 498 standardında Aksaray için verilen değerin Aksaray ili için ekonomik olmayan çatı tasarımlarına neden olacağı kanaati oluşmuştur.

Bu çalışma sonucunda TS 498'den elde edilen değerler ile meteorolojik veriler kullanılarak bulunan zemin kar yükü değerleri arasında fark olabileceği görülmüş; bu nedenle kar derinliklerini dikkate alarak zemin kar yükü değeri öneren TS 498'in güncellenmesi gerektiği gerçeği otaya çıkmıştır.

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

Croce P., Formichi P., Landi F., Mercogliana P., Bucchignani E., Dosio A., Dimova S. The snow load in Europe and the climate change. Climate Risk Management 2018; 20: 138-154.

Durmaz M., Daloğlu A. Doğu Karadeniz bölgesindeki çatıların optimum kar yüklerinin belirlenmesi. Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi, 15-17 Nisan 2004, sayfa no:97-99, İstanbul.

Durmaz M., Daloğlu A. Kar verilerinin istatistiksel analizi ve Doğu Karadeniz bölgesinin zemin kar yükü haritasının oluşturulması. İMO Teknik Dergi 2005; 16(3): 3619-3642.

Ellingwood B., O'Rourke MJ. Probabilistic models of snow load on structures, Structural Safety 1985; 2(4): 291-299.

Firat FK. Development of load and resıstance factors for reinforced concrete structures in Turkey. A Thesıs Submıtted to the Graduate School of Natural and Applıed Scıences of Mıddle East Technıcal Unıversıty, Ankara, Türkiye, 2007.

Firat FK. TS 498'de önerilen çatı kar yüklerinin istatistiksel yöntemlerle hesaplanan çatı kar yükleriyle karşılaştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2009; 21(2): 115-123.

Firat FK. Yücemen S. Türk standardı TS 498'de önerilen rüzgar yüklerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2012; 28(2): 146-152.

Firat FK., Yücemen S. Comparison of loads in Turkish earthquake code with those computed statistically Earthquakes and Structures 2015; 8(5): 977–994. https://doi.org/10.12989/EAS.2015.8.5.977

Gu M., Qiang S., Xin L., Zhou X. Probabilistic study of snow loads on flat roofs considering the effect of wind at representative sites in China, Structural Safety 2022; 99: 102244.

Ivanov OL., Barring L., Wilcke RAI. Climate change impact on snow loads in northern Europe, Structural Safety 2022; 97: 102231.

Kumar S., Narayan A., Mehta D., Sinehmani S. Snow cover characterization using C-band polari metric sar in parts of the Himalaya. Advances in Space in Research 2022; 70(12): 3959-3974.

Mathwave EasyFit 5.6 Pro. Deneme sürümü. https://easyfit.informer.com/5.6/, 2019.

Meehleis K., Folan T., Scott H., Lang R., Gienko G. Snow load calculations for Alaska using GHCN data (1950–2017), Journal of Cold Regions Engineering 2020; 34(3): 2020.

Newark MJ., Welsh E., Morris RJ., Dnes WV. Revised ground snow loads for the 1990 National Building Code of Canada. Canadian Journal of Civil Engineering 1989; 16(3): 267-278.

Sack RL. Designing structures for snow loads. Journal of Structural Engineering, 1989; 115(2): 303-315.

Soukhov D. The probability distribution function for snow load in Germany. Snow Engineering 2002; 1: 6-7.

TS 498. Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2021.

TS EN 1991-1-3. Yapılar üzerindeki etkiler - Bölüm 1-3: Genel etkiler - Kar yükleri (Eurocode 1). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.

TS EN 1991-1-3. Yapılar üzerindeki etkiler - Bölüm 1-3: Genel etkiler - Kar yükleri (Eurocode 1). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2025.

Ural A., Firat FK., Kara ME., Celik T., Tanriverdi S. Damages to rubble stone masonry structures during the January 24, 2020, Sivrice (Elazığ) Earthquake in Turkey. Earthquakes and Structures 2022; 23(3): 231–243. https://doi.org/10.12989/EAS.2022.23.3.231

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1845-1862, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1845-1862, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

ATH, APP, Çinko Borat ve Antimon Oksitin Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozitlerin Mekanik ve Alev Geciktirici Özellikleri Üzerindeki Sinerjik Etkileri

Emine KAYHAN[1*], Mehmet KAYHAN[2]

[1]Usak University Quality Coordinatorship, Usak University, 64000, Türkiye
[2]Usak University Scientific Analysis, Technological Application and Research Center, Usak University, 64000, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-3015-4188
[2]https://orcid.org/0000-0002-4581-2657
*Sorumlu yazar: emine.kayhan@usak.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 23.02.2025
Kabul tarihi:27.05.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Cam elyaf takviyeli kompozitler
Alev geciktirici dolgu malzemeleri
Alüminyum trihidroksit (ATH)
Amonyum polifosfat (APP)
Çinko borat
Antimon oksit

ÖZ

Kompozit malzemeler, olağanüstü mekanik özellikleri ve çok yönlülükleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, doğal yanıcılıkları özellikle sıkı yangın güvenliği standartları gerektiren uygulamalarda önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu çalışma, alüminyum trihidroksit (ATH) ile amonyum polifosfat (APP), çinko borat ve antimon oksitin sinerjik etkilerini cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin mekanik ve alev geciktirici özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Kompozitler, tekli ve ikili dolgu formülasyonları kullanılarak el yatırması yöntemiyle üretilmiştir. Viskozite, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve alev geciktiricilik değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ATH'nin özellikle APP ve antimon oksit ile birleştirilmesinin, mekanik performanstan tamamen ödün vermeden alev geciktiriciliği önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Özellikle, %40 ağırlık oranında APP veya antimon oksit içeren kompozitler, ASTM D635 testinde kendiliğinden sönme davranışı sergilemiş, ikili dolgu kombinasyonları ise alev geciktirici performansı artıran sinerjik etkiler göstermiştir. Bu çalışma, mekanik bütünlük ve alev direnci arasında bir denge gerektiren uygulamalar için dolgu formülasyonlarının optimize edilmesine yönelik değerli bilgiler sağlamaktadır.

Synergistic Effects of ATH, APP, Zinc Borate, and Antimony Oxide on the Mechanical and Flame-Retardant Properties of Glass Fiber-Reinforced Polyester Composites

Research Article

Article History:
Received: 23.02.2025
Accepted: 27.05.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Glass fiber-reinforced composites
Flame-retardant fillers
Aluminum trihydroxide (ATH)
Ammonium polyphosphate (APP)
Zinc borate
Antimony oxide

ABSTRACT

Composite materials are widely utilized across various industries due to their exceptional mechanical properties and versatility. However, their inherent flammability poses a critical challenge, especially in applications requiring stringent fire safety standards. This study investigates the synergistic effects of aluminum trihydroxide (ATH) combined with ammonium polyphosphate (APP), zinc borate, and antimony oxide on the mechanical and flame-retardant properties of glass fiber-reinforced polyester composites. Composites were fabricated using a hand lay-up process with single and dual filler formulations. Viscosity, tensile strength, flexural strength, and flame retardancy were assessed. Results revealed that combining ATH with secondary fillers, particularly APP and antimony oxide, significantly improved flame retardancy without entirely compromising mechanical performance. Notably, composites with 40 wt.% APP or antimony oxide exhibited self-extinguishing behavior in ASTM D635 testing, while dual filler combinations showed synergistic effects that enhanced flame retardant performance. This work provides valuable insights into optimizing filler formulations for applications requiring a balance between mechanical integrity and flame resistance.

To Cite: Kayhan E., Kayhan M. Synergistic Effects of ATH, APP, Zinc Borate, and Antimony Oxide on the Mechanical and Flame-Retardant Properties of Glass Fiber-Reinforced Polyester Composites. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1845-1862.

1. Introduction

Composite materials have gained significant attention in modern engineering applications due to their excellent strength-to-weight ratio, durability, and versatility (Lee et al., 2023; Sabapathy et al., 2023; Huzaifa et al., 2024). Glass fiber-reinforced polyester composites, in particular, are widely used in automotive, aerospace, construction, and electronics industries (Singh et al., 2018; Naresh et al., 2018; Bajpai, 2021; Sabapathy et al., 2023; Ajithkumar et al., 2025; Patri and Samui, 2025). However, their flammability poses a critical challenge, necessitating the development of effective flame retardant strategies that do not compromise mechanical performance (Kim et al., 2020; Mu, 2024; Yang et al., 2024).

Polymer-based composites are inherently susceptible to combustion due to their organic components, which serve as fuel when exposed to high temperatures or ignition sources. The combustion process typically follows a sequence of heat absorption, pyrolysis, and gas-phase reactions. When exposed to an external heat source, the composite absorbs thermal energy, leading to the breakdown of polymer chains through pyrolysis. This degradation releases volatile gases, which undergo oxidation in the presence of oxygen, sustaining the flame. The spread of flames is facilitated by heat transfer mechanisms such as conduction, convection, and radiation, allowing the fire to propagate across the material surface. Additionally, char formation, melting, and dripping behaviors influence the overall burning rate.

The safety risks associated with the flammability of composites include the rapid spread of fire, the release of toxic gases such as carbon monoxide and hydrogen cyanide, and structural failure due to thermal degradation. These factors necessitate the development of flame-retardant strategies, including the incorporation of functional fillers that enhance thermal stability and delay ignition.

Aluminum trihydroxide (ATH) is one of the most commonly used flame retardant fillers due to its cost-effectiveness, non-toxicity, and ability to release water during decomposition, thereby cooling the material and diluting flammable gases (Vo et al., 2022; Gupta et al., 2024). However, achieving desired flame retardancy often requires high ATH loadings, which can adversely affect the mechanical properties of the composite and processability (Shah et al., 2014; Parida et al., 2023; Amariei et al., 2024). To address this, the incorporation of secondary fillers, such as ammonium polyphosphate, zinc borate, and antimony oxide, has been explored to enhance flame retardancy through synergistic effects while potentially reducing the overall filler content (Khalili et al., 2016; Khalili et al., 2017; Riyazuddin et al., 2020; Basnayake et al., 2021; Gupta et al., 2024; Köksal Öztürk et al., 2024).

Ammonium polyphosphate (APP), a phosphorus-based flame retardant, is known for promoting char formation, which acts as a protective barrier during combustion. Zinc borate acts synergistically with other flame retardants by suppressing smoke production and enhancing thermal stability (Feng et al., 2015; Riyazuddin et al., 2020; Göktaş et al., 2022).

Antimony oxide, widely used as a synergist with halogenated flame retardants, can also improve the flame retardant performance when combined with non-halogenated systems like ATH (Li et al., 2012; Beycioğlu et al., 2021).

Despite their individual advantages, there remains a need to systematically evaluate the combined effects of these secondary fillers with ATH on the mechanical and flame-retardant properties of glass fiber-reinforced polyester composites. The term "synergistic effect" refers to the phenomenon where the combination of multiple flame retardants results in greater effectiveness than the sum of their individual contributions. In other words, when certain flame retardants are used together, they interact in ways that enhance their overall performance, achieving superior flame resistance with lower additive amounts. For example, while ATH releases water to cool the material, APP promotes the formation of a protective char layer that insulates the composite from further degradation. Zinc borate, on the other hand, works to reduce smoke emissions and enhances the thermal stability of the system. When these fillers are combined, they create a multi-layered defense mechanism that significantly slows down the burning process, reduces toxic gas emissions, and improves the overall fire safety of the composite material.

Although previous studies have investigated the effects of ATH and individual secondary fillers on flame retardancy, research on their combined effects in glass fiber-reinforced polyester composites remains limited. Moreover, the balance between flame retardancy and mechanical properties has not been systematically explored for these multi-filler systems. This study introduces a novel approach by examining the synergistic interactions of ATH with APP, zinc borate, and antimony oxide in polyester composites, aiming to achieve optimal flame retardancy with filler content while preserving mechanical integrity. By providing a comprehensive comparison of single and combined filler effects, this research contributes to the advancement of flame-retardant composite materials and offers valuable insights for industrial applications.

This study aims to explore the synergistic effects of ATH combined with APP, zinc borate, and antimony oxide on the performance of glass fiber-reinforced polyester composites. A hand lay-up process was employed to fabricate the composites with varying filler combinations, and their mechanical strength and flame retardancy properties were assessed using flexural and bending tests and the flame retardancy test. By comparing composites with single and combined fillers, this research seeks to provide insights into optimizing filler formulations to achieve balanced mechanical and flame-retardant performance.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The materials used in this study included an isophthalic-based unsaturated thermoset polyester resin (IR100), known for its chemical resistance, supplied by Ilkester®. Isophthalic-based polyester resins are widely used in composite applications due to their superior chemical resistance, thermal stability, and mechanical strength compared to orthophthalic-based resins. The technical key properties of IR100 are given in Table 1.

Table 1. Properties of Unsaturated Polyester Resin

PROPERTIES AS SUPPLIED		
Analysis Type	Test Method	Value
Density at 20°C (g/cm^3)	ISO 1675	1.10 – 1.11
Monomer content (%)	ISO 3251	36 – 38
Gel time (min)	İLKALEM TL-06	25-35*
PROPERTIES OF CURED RESIN*		
Analysis Type	Test Method	Value
Tensile strength (MPa)	ISO 527	60 – 70
Tensile modulus (MPa)	ISO 527	4000 – 5000
Flexural strength (MPa)	ISO 178	100 – 120
Flexural modulus (MPa)	ISO 178	4000 – 5000
*: 1% Co (1%) + 1% MEK-P		

Glass fiber mats used as reinforcement were 450 g/m² chopped strand mats (MAT8-450) made from E-glass fibers and specifically designed for hand lay-up applications, supplied by Şişecam®. The properties of the glass fiber mat are given in Table 2.

Table 2. Properties of glass fiber mat

Features	Value
Glass type	E-Glass
Binder type	Silane
Length of chopped fibres (mm)	50
Resin compatibility	Polyester
Weight per unit area (g/m^2)	450
Wet-out	Fast

The inorganic flame retardant fillers utilized were aluminum trihydroxide (ATH) (Portoflame SG40; average particle size of 36µm) supplied by Sibelco, antimony trioxide (standard grade; average particle size of 1,4 µm) from Campin MT, ammonium polyphosphate (APP) (Exosel AP 740T; average particle size of 10 µm) provided by Nordic Chemical Laboratories and zinc borate (average particle size of 5 µm) provided by İlkester®.

To ensure proper dispersion of the fillers in the resin, additives were incorporated before filler addition. A wetting and dispersing additive for inorganic fillers (Afcona 5010, supplied by Afcona Additives) was used at 10 wt.% based on the inorganic filler content. Additionally, a silicone-free polymer-based air release and fiber wetting additive (BYK A 560, provided by BYK Additives and Instruments) was added at 0.5 wt.% based on the total formulation.

For curing the resin system, a cobalt octoate solution in toluene (6%) was used as a catalyst (Cobalt accelerator 6%, supplied by İlkalem Ticaret ve Sanayi A.Ş.®). The initiator employed was a methyl ethyl ketone peroxide solution in dimethyl phthalate (Butanox® M-60, provided by AkzoNobel®).

2.2. Methods

The composites were prepared using a hand lay-up process. Initially, a control sample without any fillers was fabricated to establish a baseline for comparison. Subsequently, composites were prepared by incorporating each filler (ATH, APP, zinc borate, and antimony trioxide) at a loading of 40 wt.% into the polyester resin. The resin and filler were mixed thoroughly, along with the specified wetting and dispersing additives, to ensure homogeneity before being layered with 450 g/m² chopped strand mats. To investigate the synergistic effects, composites were also prepared with a combination of 20 wt.% ATH and 20 wt.% of each secondary filler (APP, zinc borate, or antimony trioxide) with respect to resin content. Please see Table 3 for the sample codes indicating the filler type and content. Images of resin mixtures are shown in Figure 1.

Table 3. Sample codes indicating the filler type and content are given. The filler amount is calculated with respect to the resin amount. Sample code H1 is prepared as a reference resin matrix without filler.

	filler to resin content wt.%			
Sample Code	ATH	APP	Zinc borate	Antimony oxide
H1	-	-	-	-
H2	40	-	-	-
H3	-	40	-	-
H4	-	-	40	-
H5	-	-	-	40
H6	20	20	-	-
H7	20	-	20	-
H8	20	-	-	20

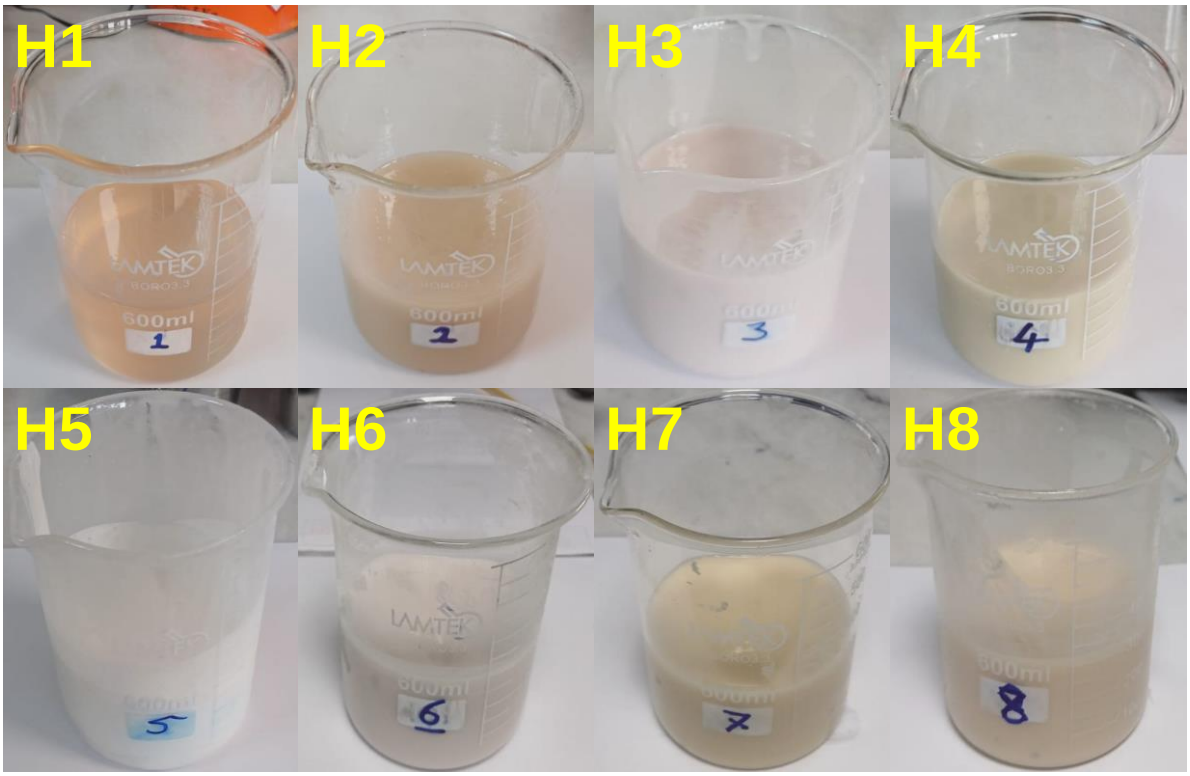


Figure 1. Resin mixture samples (H1–H8) with filler types and amounts listed in Table 1. Wetting and dispersing additives were mixed into the resin before filler incorporation.

The viscosity of each resin-filler mixture was measured using a Viscometer (Brookfield Viscometer DV-II+ Pro EXTRA) with spindle 3 at 20 rpm and 25 °C to ensure processability.

The mixtures were subjected to the same hand lay-up process, where 50 grams of the resin system using cobalt octoate solution in toluene (6%) as a catalyst at 0,25 wt.% (based on the total formulation) and methyl ethyl ketone peroxide solution in dimethyl phthalate as an initiator at 2 wt.% (based on the total formulation) was applied to each layer of glass fiber mat (22 cm × 28 cm in size) to achieve a 33 wt.% glass content in the total formula, creating five-layer composites for each combination (see Figure 2). During the hand lay-up process, the resin mixture was evenly distributed over the glass fiber layers using a roller to ensure proper wetting and uniform impregnation of the reinforcement. Air bubbles were removed by manually rolling each layer before adding the next to improve interlaminar adhesion. After stacking the five layers, the laminates were left to cure at 25°C for 24 hours. Curing was achieved through the combined effect of the catalyst and initiator. Cobalt octoate acted as an accelerator, facilitating the decomposition of methyl ethyl ketone peroxide into free radicals, which initiated the polymerization of the unsaturated polyester resin. This exothermic reaction led to crosslinking, transforming the resin from a liquid to a solid thermoset matrix.

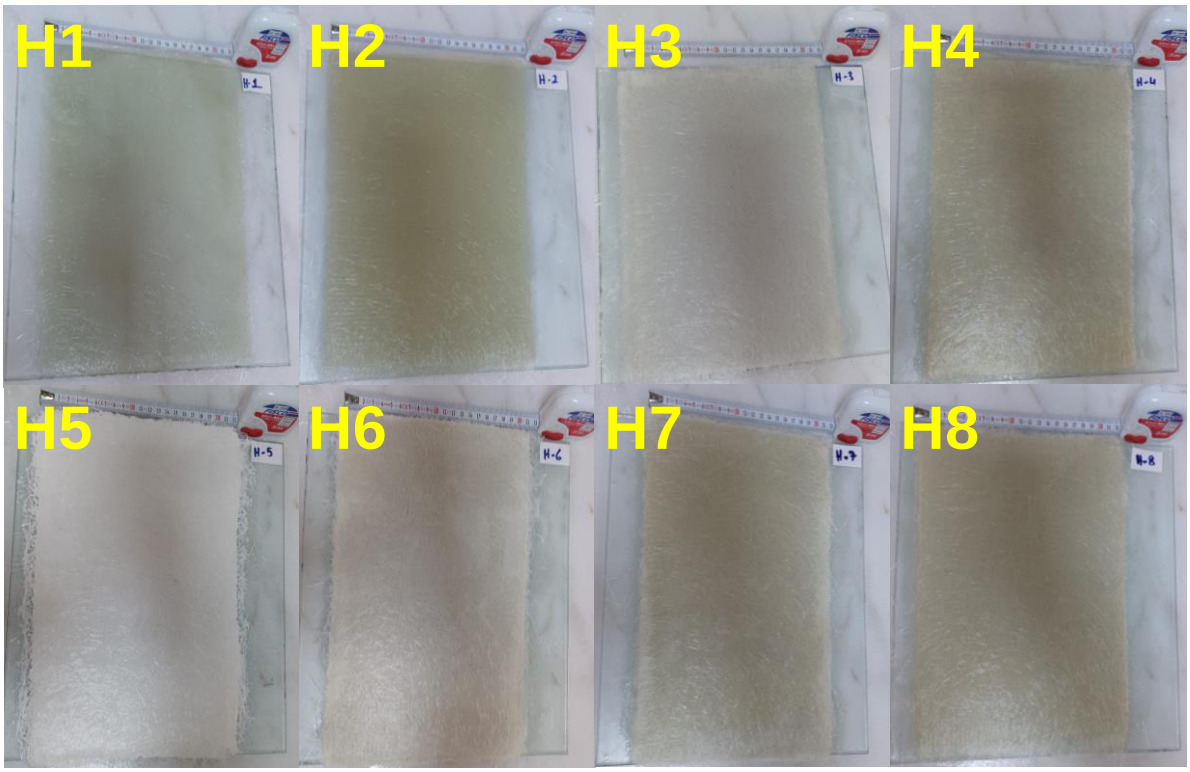


Figure 2. Hand lay-up process for fabricating five-layer glass fiber composites. Each 22 cm × 28 cm mat was impregnated with 50 g of resin (H1–H8), achieving a 33 wt.% glass content.

After curing the composite specimens under ambient conditions (see Figure 3), the composite specimens were cut by a Computer Controlled Cutter Machine (equipped with an Arel® high frequency motor) to minimize edge defects and prevent delamination for mechanical and flammability testing specimen preparation. Tensile strength was measured by UTEST Computer Control Electromechanical Universal Test Machine (50kN) according to ISO 527-4:2023, which specifies test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. The dimensions of the specimens used for the tensile strength test were 80 mm × 15 mm × 4 mm±0.2 mm (length × width × thickness). The test was conducted at a loading speed of 1 mm/min. Flexural strength was assessed by UTEST Computer Control Electromechanical Universal Test Machine (50kN) using three-point bending tests in compliance with ISO 178:2019, the standard for determining the flexural properties of plastics. The dimensions of the specimens used for the three-point bending test were 80 mm × 15 mm × 4 mm±0.2 mm (length × width × thickness). The test was conducted at a loading speed of 1 mm/min. Additionally, the radius of the loading edge (R_1) and the radius of the supports (R_2) were 5.0 mm ± 0.2 mm.

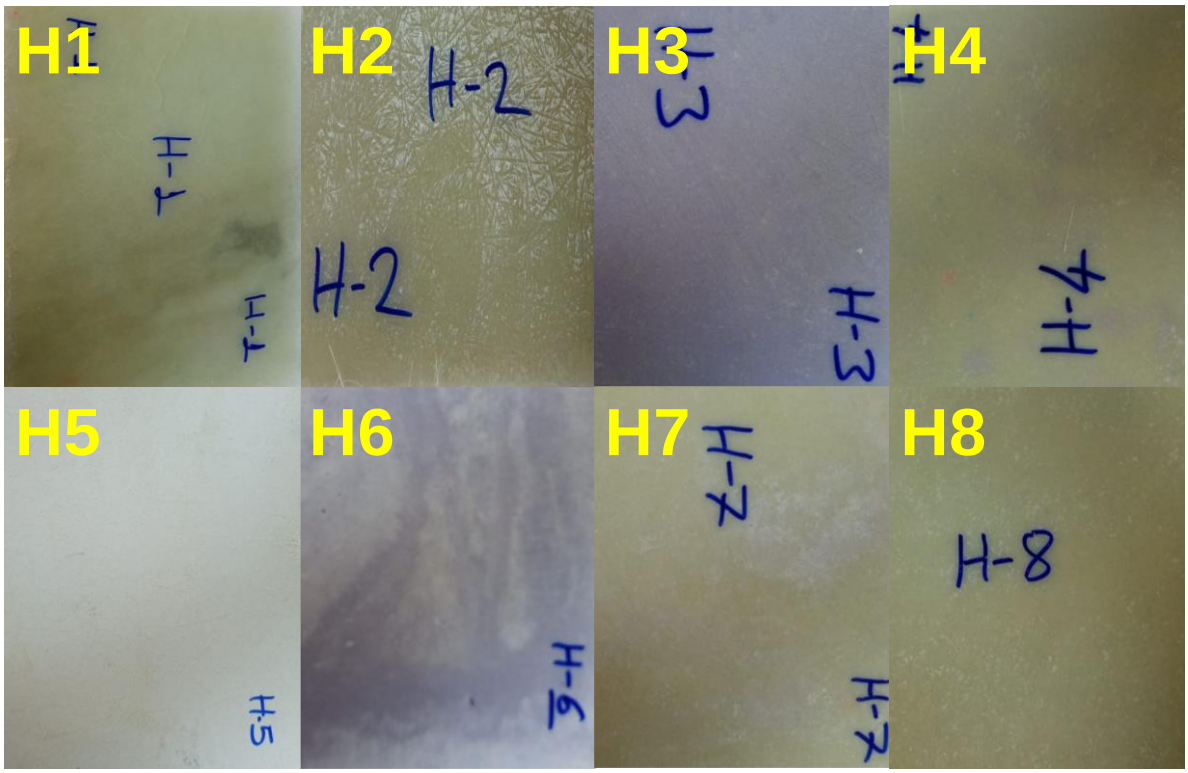


Figure 3. Hand lay-up samples (given in Figure 2) after curing under ambient conditions.

Flammability was evaluated following the ASTM D635-14, the standard test method for the rate of burning and/or extent and time of burning of plastics in a horizontal position (see Figure 4).

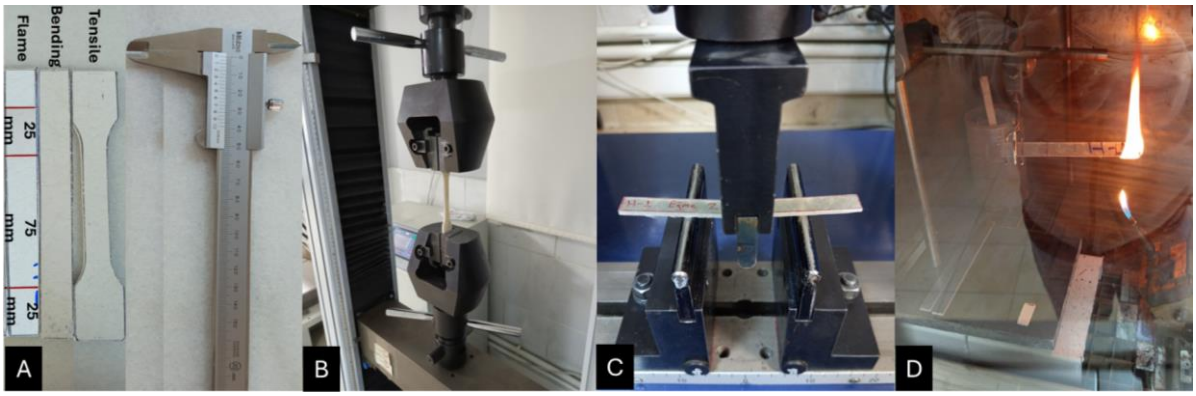


Figure 4. (A) Hand lay-up samples cut for mechanical and flammability tests. (B) Tensile strength test setup (ISO 527-4:2023). (C) Three-point bending test setup (ISO 178:2019). (D) Flammability test setup (ASTM D635-14) for horizontal burning rate and extent.

3. Results and Discussion

The viscosities of the as-prepared resin matrices were measured to discuss the processability (see Table 4). The viscosity of the resin matrix without a filler was measured at 265 cP, facilitating ease in the hand lay-up process. Upon incorporating fillers, the viscosity increased, with a 40 wt.% loading of ammonium polyphosphate (APP) resulting in the highest viscosity of 1925 cP, while a 40 wt.% loading of antimony

oxide yielded a lower viscosity of 565 cP. A 40 wt.% loading of aluminum trihydroxide (ATH) produced a viscosity of 750 cP.

Combining 20 wt.% ATH with 20 wt.% of other fillers resulted in different effects on viscosity. The combination of ATH and antimony oxide decreased viscosity to 655 cP, while ATH and zinc borate increased the viscosity to 765 cP. The mixture of ATH and APP elevated the viscosity to 1070 cP.

Consequently, adding APP to the resin matrix significantly increased viscosity, complicating the hand lay-up process compared to other fillers. However, incorporating antimony oxide reduced viscosity relative to a 40 wt.% ATH-loaded resin matrix, easing the hand lay-up process, while zinc borate had a negligible impact on process difficulty.

Table 4. The viscosity of resin mixtures without and with flame retardant fillers, measured at 25°C using spindle 3 at 20 rpm in a 600 mL beaker.

Sample Code	Viscosity (cP) spindle #3, 20 rpm, 25°C
H1	265
H2	750
H3	1925
H4	835
H5	565
H6	1070
H7	765
H8	655

Table 5 presents the average tensile strength results for all samples. Among the tested samples, the composite material without filler (H1) exhibited the highest tensile strength at 164 MPa. The data in Table 5 indicate that the inclusion of fillers in the matrix, regardless of the additive type, resulted in a reduction in tensile strength. When ATH, APP, zinc borate, and antimony oxide were added individually to the composite formulations, the tensile strengths were recorded as 121 MPa, 111 MPa, 117 MPa, and 144 MPa, respectively. For composites containing dual fillers, the tensile strengths were measured as 131 MPa for ATH and APP, 102 MPa for ATH and zinc borate, and 109 MPa for ATH and antimony oxide combinations. Among all the composite samples with inorganic fillers, H5 (containing 40 wt.% antimony oxide) showed the highest tensile strength of 144 MPa, while H7 (containing 20 wt.% ATH and 20 wt.% zinc borate) exhibited the lowest tensile strength of 102 MPa.

Table 5. Tensile strength measurements of the composite samples.

Sample Code	Tensile Strength (MPa)*
H1	164
H2	121
H3	111
H4	117
H5	144
H6	131
H7	102
H8	109

Table 6 summarizes the average flexural strength results for all samples. Three specimens from each sample were tested for each three-point bending measurement according to ISO 178:2019, and the average values were recorded. The composite material without filler (H1) exhibited a flexural strength of 243 MPa. Among the composites containing inorganic fillers, H3 (40 wt.% APP) and H5 (40 wt.% antimony oxide) achieved the highest flexural strengths, measured at 260 MPa and 247 MPa, respectively. When ATH and zinc borate were added individually, the flexural strengths were recorded as 222 MPa and 206 MPa, respectively. For composites incorporating dual fillers, the flexural strengths were approximately 190 MPa, specifically 190 MPa for the ATH and APP combination, 195 MPa for ATH and zinc borate, and 193 MPa for ATH and antimony oxide. These results indicate that composites with dual inorganic fillers exhibited lower flexural strength compared to their single-filler counterparts.

Table 6. Three point bending measurements of the composite samples.

Sample Code	Flexural Strength (MPa)*
H1	243
H2	222
H3	260
H4	206
H5	247
H6	190
H7	195
H8	193

When flexural and bending strength results were discussed together, it can be concluded that the inclusion of higher ATH loading levels (40 wt.%), both tensile and flexural strength were reduced due to the increased filler content disrupting the polymer matrix continuity and creating weak points under mechanical stress. When APP (20 wt.%) was combined with ATH (20 wt.%), the composite exhibited superior flexural strength but slightly reduced tensile strength, indicating a trade-off influenced by filler properties and dispersion compared to the composite with ATH alone (40 wt.%). APP's ability to integrate into the polymer matrix and reduce brittleness likely contributed to this enhancement by improving the filler-matrix interfacial adhesion. However, the addition of zinc borate to ATH-containing composites resulted in slightly lower tensile and flexural strength compared to composites with ATH and APP. This behavior can be attributed to zinc borate's relatively lower compatibility with the resin, which may have reduced the overall load transfer efficiency within the composite structure. On the other hand, the composite containing antimony oxide exhibited higher flexural and tensile strength than that of only ATH including systems Antimony oxide appears to act as a reinforcing filler, enhancing the stiffness of the composite and reducing microcrack propagation under flexural loads.

In accordance with ASTM D635-14, a bar specimen was positioned horizontally, supported at one end. Ten bar specimens were prepared for each sample. Each specimen was marked with two lines perpendicular to its longitudinal axis, positioned 25 ± 1 mm and 100 ± 1 mm from the end designated for ignition. The free end was exposed to a standardized gas flame for 30 seconds. Post-exposure, the duration and extent of burning were recorded. If the specimen burned up to 100 mm from the ignited end, the average burning rate was calculated and reported. Figure 5 presents images of the samples following the horizontal burning test, illustrating the extent of combustion and material degradation for each specimen.



Figure 5. Post-horizontal burning test images of the samples, highlighting combustion extent and material degradation for each specimen.

In the flame-retardant test, the H1 composite sample, which lacked filler in its formulation, burned completely within a short time after a 30-second flame application. This indicates a high burning rate, exceeding the upper limit of 40 mm/min as specified by ASTM D-635. Similarly, the H2 composite sample (containing 40 wt.% ATH) and the H4 sample (containing 40 wt.% zinc borate) also burned completely but with burning rates below 40 mm/min. This behavior may be attributed to insufficient formation of protective barriers or weak interactions of ATH and zinc borate with the polyester matrix. This result is supported by the literature, where it is noted that metal hydroxides like alumina trihydrate (ATH) acts as flame retardants through physical mechanisms, primarily by undergoing endothermic decomposition to release water. This released water helps lower the polymer temperature and dilutes the concentration of combustible gases, thereby reducing flammability (Lu et al. 2002). However, the effectiveness of this type of flame retardant is generally limited because relatively high loadings (>60 wt% ATH) are required to achieve an acceptable level of flame retardancy (Kandola et al. 2019). On the

other hand, studies have demonstrated that the use of submicron-sized ATH particles can significantly reduce the required loading. Specifically, composites prepared with 47.5 wt% submicron ATH and unsaturated polyester resin have been reported to exhibit effective flame retardant properties due to the better dispersion within the polymer matrix (Halim et al. 2020). However, at lower loadings of larger than submicron size of ATH, such as 40 wt%, the flame retardant effect may be insufficient to completely prevent combustion (Hörold et al. 1999; Castrovinci et al. 2005; Kandola et al. 2019). Therefore, the burning observed in the composite with 40 wt% ATH addition is consistent with the behavior reported in the literature. In zinc borate case, it has been proposed not only as smoke suppressants but also as potential flame retardants (Cusack et al. 1997, Petsom et al. 2003). However, to achieve effective flame retardancy, zinc borate is typically not used alone. Instead, it is commonly combined with conventional flame retardants and/or nanoclays to create synergistic effects. This combination enhances the flame retardant performance, as zinc borate by itself provides only limited flame retardancy. In addition, Riyazuddin et al. (2020) successfully developed flame-retardant composites by using a total of 20 wt% flame retardant fillers composed of ATH and zinc borate. However, it is important to note that the ATH and zinc borate used in their study had particle sizes below 2 microns, which can significantly enhance the dispersion and effectiveness of the flame retardants. Furthermore, unlike the unsaturated polyester resin used in the present study, they employed an epoxy resin system, which inherently possesses better flame resistance. These differences in filler particle size and matrix type could account for the improved flame retardant performance observed in their composites compared to the current study.

In contrast to H1 and H2 samples, the H3 sample (containing 40 wt.% APP) and the H5 sample (containing 40 wt.% antimony oxide) did not burn out and were classified as non-ignition materials.

The addition of APP, zinc borate, or antimony oxide to ATH-containing composites significantly enhanced the flame-retardant behavior compared to composites with ATH alone, as demonstrated by the reduced burning rate and improved self-extinguishing performance observed in ASTM D635 tests.

The synergistic effect, particularly between ATH and APP, is attributed to their complementary mechanisms (Khalili et al. 2016, Riyazuddin et.al 2020). ATH decomposes endothermically, releasing water and absorbing heat, while APP forms a stable phosphorous-based char layer. This char acts as a physical barrier, reducing the availability of fuel and shielding the underlying matrix. Together, they form a dual-action system that delays ignition and suppresses flame propagation. Zinc borate's synergistic action involves smoke suppression and thermal stabilization, while antimony oxide enhances the efficiency of the matrix by promoting char cohesion and interrupting combustion cycles. These effects have been substantiated in studies such as Li et al. (2012) and Gupta et al. (2024).

The combination of ATH and APP demonstrated a remarkable synergistic effect on flame retardancy by promoting char formation (see H6 in Table 7). APP, a phosphorus-based flame retardant, facilitated the formation of a stable char layer, which acted as a barrier to heat and oxygen, thereby complementing the endothermic water release mechanism of ATH. Similarly, when zinc borate was combined with

ATH, the synergistic effect was primarily attributed to its ability to suppress smoke production and enhance thermal stability. Zinc borate likely interacted with ATH's decomposition products, forming a protective glaze that inhibited flame propagation (see H7 in Table 7). The inclusion of antimony oxide in ATH-containing composites improved the flame-retardant performance through a synergistic effect. Antimony oxide likely enhanced the thermal stability of the material and worked in tandem with ATH to dilute combustible gases, converting the composite's classification to self-extinguishing (see H8 in Table 7).

Among the combinations tested, the ATH and APP composite exhibited the most pronounced improvement in flame retardancy, followed by ATH and antimony oxide, while ATH and zinc borate showed moderate enhancement, highlighting the varying degrees of synergistic behavior among these systems. The ASTM D-635 classifications for all samples are summarized in Table 7.

Table 7. Flammability classification of samples according to ASTM D635-14 horizontal burning test.

Sample Code	Classification				
	Non-ignition	Self-Extinguishing		Burning Beyond 100 mm Mark	
		before 25 mm Mark	between 25 mm and 100 mm Marks	burning rate mm/min ≤40 mm/min	burning rate mm/min ≥40 mm/min
H1					✓
H2				✓	
H3	✓				
H4				✓	
H5	✓				
H6	✓				
H7	✓				
H8			✓		

4. Conclusions

This research demonstrates that the combination of ATH with secondary fillers such as APP, zinc borate, and antimony oxide can effectively enhance the flame retardant properties of glass fiber-reinforced polyester composites while maintaining acceptable mechanical performance. The addition of APP and antimony oxide as individual fillers achieved significant improvements in flame retardancy, with both

materials classified as non-ignition according to ASTM D635 standards. Furthermore, dual filler formulations revealed synergistic effects, particularly in the ATH-APP and ATH-antimony oxide combinations, which exhibited self-extinguishing behavior. Despite a reduction in tensile and flexural strength compared to the unfilled composite, these properties remained within acceptable limits for many engineering applications.

These results suggest that the developed composite materials hold significant potential for applications in various industrial fields, including automotive, aerospace, construction, and electronics. Their enhanced flame retardancy makes them particularly suitable for components requiring high fire resistance, such as interior panels in vehicles and aircraft, protective enclosures for electronic devices, and fire-resistant structural elements in buildings. Additionally, the balance between mechanical performance and flame retardancy enables their use in lightweight and high-strength applications where both safety and durability are critical.

In terms of cost-effectiveness, the incorporation of ATH and secondary fillers provides an economical solution compared to traditional flame retardant materials, as ATH is widely available and cost-efficient. The dual-filler strategy also allows for a reduction in the total filler content required to achieve high fire resistance, potentially lowering material costs and improving processability. Future studies may explore the long-term durability and environmental effects of these composites to broaden their applicability in high-performance and sustainable engineering solutions. This study contributes to the literature by offering a comprehensive and comparative evaluation of dual-filler systems in flame-retardant polyester composites, an area with limited systematic exploration.

Acknowledgement

The authors acknowledge that this study is supported by Pultech FRP. We sincerely appreciate Pultech FRP for providing access to their infrastructure and facilities, which were important to carry out this research.

Statement of Conflict of Interest

No conflict of interest or common interest has been declared by the authors.

Author's Contribution

Emine KAYHAN: Writing, visualization, conceptualization, investigation and data curation. Mehmet KAYHAN: Writing, data curation, reviewing and editing.

References

Ajithkumar S., Arulmurugan B., Rajeshkumar L. 14—prospects of natural fiber-reinforced polymer composites in engineering and commercial applications. In M. Puttegowda, Y. Gowda T.G., B.

J.S., S. M. Rangappa, and S. Siengchin (Eds.), Applications of Composite Materials in Engineering, Elsevier Science Ltd. 2025.

Amariei G., Henriksen ML., Klarskov P., Hinge M. Quantification of aluminium trihydrate flame retardant in polyolefins via in-line hyperspectral imaging and machine learning for safe sorting. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 2024; 311: 123984.

Bajpai P. Chapter 9—The carbon fiber/carbon fiber-reinforced plastic/recycled carbon fiber-reinforced polymer market. In P. Bajpai (Ed.), Carbon Fiber (Second Edition) Elsevier 2021.

Basnayake AP., Hidalgo JP., Heitzmann MT. A flammability study of aluminium hydroxide (ATH) and ammonium polyphosphate (APP) used with hemp/epoxy composites. Construction and Building Materials 2021; 304: 124540.

Beycioğlu A., Doğan E., Çetin S., Gökçe N., Aruntaş HY. Usage of antimony trioxide, aluminum hydroxide and zinc borate in GRP composite production as fire-retardant additives: An experimental research. International Journal of Engineering Research and Development 2021; 13(1): 265–277.

Castrovinci A., Camino G., Drevelle C., Duquesne S., Magniez C., Vouters M. Ammonium polyphosphatealuminum trihydroxide antagonism in fire retarded butadiene-styrene block copolymer, European Polymer Journal 2005; 41: 2023-2033.

Cusack PA., Heer MS., Monk AW. Zinc hydroxystannate as an alternative synergist to antimony trioxide in polyester resins containing halogenated flame retardants, Polymer Degradation and Stability 1997; 58: 229-237.

Feng C., Zhang Y., Liang D., Liu S., Chi Z., Xu J. Influence of zinc borate on the flame retardancy and thermal stability of intumescent flame retardant polypropylene composites. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2015; 115: 224–232.

Göktaş S., Duru E., Aslan S. Çinko borat katkılı CTP kompozit malzemelerin üretimi, mekanik ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2022; 40: 111–116.

Gupta R., Singh MK., Rangappa SM., Siengchin S., Dhakal HN., Zafar S. Recent progress in additive inorganic flame retardants polymer composites: Degradation mechanisms, modeling and applications. Heliyon 2024; 10(21): e39662.

Halim ZAA., Yajid MAM., Nurhadi FA., Ahmad N., Hamdan H. Effect of silica aerogel – Aluminium trihydroxide hybrid filler on the physio-mechanical and thermal decomposition behaviour of unsaturated polyester resin composite, Polymer Degradation and Stability 2020; 182: 109377.

Huzaifa M., Zahoor S., Akhtar N., Abdullah MH., Haider S., Khan SU., Alam K. Exploring mechanical properties of eco-friendly hybrid epoxy composites reinforced with sisal, hemp, and glass fibers. Journal of Materials Research and Technology 2024; 33: 2785–2793.

Hörold S. Phosphorus flame retardants in thermoset resins. Polymer Degradation and Stability 1999; 64: 427-431.

Kandola BK., Ebdon JR. Flammability and thermal stability of unsaturated polyester resin-based blends and composites. Unsaturated Polyester Resins 2019; 435–469.

Khalili P., Tshai KY., Hui D., Kong I. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. Composites Part B: Engineering 2017; 114: 101–110.

Khalili P., Tshai KY., Kong I., Lee JH., Mostafa FA. The synergistic effect of flame retardants on flammability, thermal and mechanical properties of natural fiber reinforced epoxy composite. Key Engineering Materials 2016; 701: 281–285.

Kim YO., Cho J., Kim YN., Kim KW., Lee BW., Kim JW., Kim M., Jung YC. Recyclable, flame-retardant and smoke-suppressing tannic acid-based carbon-fiber-reinforced plastic. Composites Part B: Engineering 2020; 197: 108173.

Köksal Öztürk D., Levent M., Gündoğan K. A study on combustion behaviour and reaction kinetics mechanism of some Egean region Turkish lignites. Chemical Papers 2024; 78(16): 8877–8888.

Lee H., Choi MK., Kim BJ. Structural and functional properties of fiber reinforced concrete composites for construction applications. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 2023; 125: 38–49.

Li N., Xia Y., Mao Z., Wang L., Guan Y., Zheng A. Influence of antimony oxide on flammability of polypropylene/intumescent flame retardant system. Polymer Degradation and Stability 2012; 97(9): 1737–1744.

Lu SY., Hamerton I. Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers, Progress in Polymer Science 2002; 27: 1661-1712.

Mu X. 14—Flame retardant fiber-reinforced epoxy composites for aviation and automotive applications. In Y. Hu and X. Wang (Eds.), Non-halogenated Flame-Retardant Technology for Epoxy Thermosets and Composites, Woodhead Publishing. 2024.

Naresh K., Shankar K., Velmurugan R., Gupta NK. Statistical analysis of the tensile strength of GFRP, CFRP and hybrid composites. Special Issue on Plasticity and Impact Mechanics (IMPLAST 2016) 2018; 126: 150–161.

Parida MR., Mohanty S., Biswal M., Nayak SK., Rai S. Influence of aluminum trihydrate (ATH) particle size on mechanical, thermal, flame retardancy and combustion behavior of polypropylene composites. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2023; 148(3): 807–819.

Patri M., Samui AB. Chapter 29—Glass fibre composites for aerospace and other applications. In Md. I. H. Mondal (Ed.), Technical Organic and Inorganic Fibres from Natural Resources, Elsevier Science Ltd. 2025.

Petsom A., Roengsumran S., Ariyaphattanakul A., Sangvanich P. An oxygen index evaluation of flammability for zinc hydroxystannate and zinc stannate as synergistic flame retardants for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer. Polymer Degradation and Stability 2003; 80: 17-22.

Riyazuddin Nageswara Rao T., Hussain I., Heun Koo B. Effect of aluminum tri-hydroxide/zinc borate and aluminium tri-hydroxide/melamine flame retardant systems synergies on epoxy resin. International Conference on Materials and Manufacturing Methods – 2019 2020; 27: 2269–2272.

Sabapathy YK., Gokhul VS., Aadithiya D., Damani M. A study on use of fibre reinforced plastic (FRP) connecting rod in IC engines. International Conference on Processing and Characterization of Materials (ICPCM 2022) 2023; 72: 2423–2427.

Shah AR., Lee D., Wang Y., Wasy A., Ham KC., Jayaraman K., Kim BS., Song JI. Effect of concentration of ATH on mechanical properties of polypropylene/aluminium trihydrate (PP/ATH) composite. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2014; 24: 81–89.

Singh SB., Vummadisetti S., Chawla H. Influence of curing on the mechanical performance of FRP laminates. Journal of Building Engineering 2018; 16: 1–19.

Vo DK., Do TD., Nguyen BT., Tran CK., Nguyen TA., Nguyen DM., Pham LH., Nguyen TD., Nguyen TD., Hoang D. Effect of metal oxide nanoparticles and aluminum hydroxide on the physicochemical properties and flame-retardant behavior of rigid polyurethane foam. Construction and Building Materials 2022; 356: 129268.

Yang JX., Sun Y., Song WM., Liu Y. A novel phosphorus/boron-containing flame retardant for improving the flame retardancy of ramie fiber reinforced epoxy composites. Construction and Building Materials 2024; 451: 138814.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1863-1881, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1863-1881, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

LPG/LNG Gemilerinin Ana Makine Güç Tahmini için Yapay Sinir Ağı Modelinin Eğitim Aşamasında GA ve PSO Algoritmalarının Performans Analizi

Samet GÜRGEN[1*]

[1]İskenderun Teknik Üniversitesi, Barbaros Hayrettin Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, 31200, Hatay/İskenderun

[1]https://orcid.org/0000-0001-7036-8829
*Sorumlu yazar: samet.gurgen@iste.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 18.03.2025
Kabul tarihi: 08.06.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
LPG/LNG gemileri
Ana makine güç tahmini
Yapay sinir ağı
Genetik algoritma
Parçacık sürü optimizasyonu
Algoritma performansı

ÖZ

Ülkelerin LPG/LNG gibi alternatif enerji kaynaklarına olan talebinin artmasıyla birlikte LPG/LNG gemilerinin üretimi de artmıştır. Sıvılaştırılmış gaz taşıyıcıları olarak bilinen bu gemilerin kendilerine özgü özellikleri ve tasarımları bulunmaktadır. Ayrıca tehlikeli yük taşımaları nedeniyle yüksek güvenlik standartları dikkate alınarak tasarlanmaktadırlar. Ana makine için gereken gücün belirlenmesi, tasarım sürecinin ilk aşamalarında önemli adımlardan biridir. Bu çalışmada, yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak LPG/LNG gemileri için ana makine gücü tahmin modeli üretilmiştir. YSA eğitim sürecinde temel geri yayılım algoritması (BP) ve Levenberg–Marquardt (LM) algoritmalarına ek olarak Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak da eğitim gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, gemi makine güç tahmin modeli eğitiminde sezgisel algoritma kullanmanın model performansına olan etkisini araştırmaktır. Çalışma sonucunda, en düşük MSE değeri LM kullanılarak 0,0006 olarak belirlenmiştir. Sezgiler algoritmalar açısından bir karşılaştırma yapıldığında PSO algoritmasının GA algoritmasına göre üstün olduğu görülmüştür. PSO algoritması ile en düşük MSE 0,00124 olarak elde edilmiştir. Çeşitli gizli nöron sayılarında yapılan 30 deneme sonucunda elde edilen standart sapma değerleri incelendiğinde, LM için standart sapma 0,00060 ile 0,00087 arasında değişirken, PSO için bu değerin 0,00011 ile 0,00034 arasında değiştiği görülmüştür. PSO algoritması gradyan tabanlı algoritmaları ile karşılaştırıldığında BP algoritmasına göre üstün çıkarken, LM algoritmasından daha kötü bir performans göstermiştir. LM ile eğitilen YSA modeliyle küresel bir çözüm elde edilmiş fakat sonuçların istatistiksel analizi, LM algoritmasının standart sapmasının yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, PSO algoritması tutarlı bir şekilde daha düşük bir standart sapma değeriyle makul sonuçlar üretmiştir. Friedman testi sonuçları da PSO algoritmasının LM ile rekabet edeceğini göstermiştir.

Performance Analysis of GA and PSO Algorithms in Training Phase of Artificial Neural Network Model for Estimating Main Engine Power of LPG/LNG Ships

Research Article

Article History:
Received: 18.03.2025
Accepted: 08.06.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
LPG/LNG ships
Main engine power prediction
Artificial neural network

ABSTRACT

The production of LPG/LNG ships has also increased with the increasing demand for alternative energy sources such as LPG/LNG in countries. These ships, known as liquefied gas carriers, have their own characteristics and designs. In addition, they are designed by taking into account high safety standards because they carry dangerous cargo. Determining the required power for the main engine is one of the important steps in the initial stages of the design process. In this study, a ship main engine power prediction model for LPG/LNG ships was produced using artificial neural network (ANN). In

Genetic algorithm
Particle swarm optimization
Algorithm performance

addition to the basic backpropagation algorithm (BP) and Levenberg–Marquardt (LM) algorithms in the ANN training process, training was also carried out using Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). The main objective of this study is to investigate the effect of using heuristic algorithm in ship engine power estimation model training on model performance. As a result of the study, the lowest MSE value was determined as 0.0006 using LM. When a comparison was performed in terms of heuristic algorithms, it was seen that the PSO algorithm was superior to the GA algorithm. The lowest MSE was obtained as 0.00124 with the PSO algorithm. When the standard deviation values obtained as a result of 30 runs with various hidden neuron numbers were examined, it was seen that the standard deviation for LM varied between 0.00060 and 0.00087, while this value for PSO varied between 0.00011 and 0.00034. When the PSO algorithm was compared with gradient-based algorithms, it was superior to the BP algorithm, but it performed worse than the LM algorithm. A global solution was obtained with the ANN model trained with LM, but statistical analysis of the results revealed that the standard deviation of the LM algorithm was high. In contrast, the PSO algorithm consistently produced reasonable results with a lower standard deviation value. The Friedman test results also showed that the PSO algorithm would compete with LM.

To Cite: Gürgen S. Performance Analysis of GA and PSO Algorithms in Training Phase of Artificial Neural Network Model for Estimating Main Engine Power of LPG/LNG Ships. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1863-1881.

1. Introduction

Liquefied Natural Gas (LNG) and Liquefied Petroleum Gas (LPG) are seen as cleaner alternative energy sources compared to traditional fossil fuels and have met a significant portion of global energy needs in the last 20 years. Although LNG and LPG are not considered fully green energy, they are seen as an intermediate solution between renewable environmentally friendly energy sources (e.g. solar and wind) and traditional fossil fuels. The initial investment cost is one of the most important factors in the limited demand for renewable energy sources as an alternative to traditional fossil fuels. This situation makes the use of LNG and LPG attractive. Maritime transportation plays an important role in meeting the demand for LNG and LPG. Therefore, the demand for LPG/LNG ships is increasing (Miana et al., 2010; Fernández et al., 2017). According to the research conducted by Michail and Konstantinos (2022), the demand for LNG and LPG transportation by sea increased by 553% and 232% from 1990 to 2022, respectively.

The main components of LPG are propane and butane and are obtained as a byproduct of oil refining and natural gas processing. The main areas of use of LPG are cooking, heating and vehicles. It is also used as a petrochemical raw material (Bai and Lam, 2019). LNG is a hydrocarbon mixture consisting largely of methane. LNG has many areas of use such as energy production, transportation and industrial facilities. The transportation of LPG and LNG by sea is carried out with LPG/LNG ships, which are the main components of the gas carrier class. LPG/LNG is not carried in gas form with gas carriers with limited tank volumes for transportation in larger quantities. Therefore, LPG and LNG are carried in liquid form at high pressure and very low temperature (Marques and Caprace, 2020). The history of LPG transportation dates back to the 1930s. In history, LPG transportation was carried out for the first time in 1931 with a ship called "Agnita". LNG transportation started with a ship called "Methane

Pioneer", which started operating in 1959 (Gonzalez and Pérez-Labajos, 2017; Mangudis, 2024). Design of LPG/LNG vessels is a complex process that requires special expertise. The gas, which is carried at high pressure and low temperatures, is carried in insulated double-hulled tanks (Akyuz and Celik, 2015). Safety is a key factor in the design of these vessels, and it is vital that the requirements of the International Maritime Organization (IMO) and classification societies are taken into account during the design process. One of the important steps in the early stages of design of LPG/LNG vessels is the determination of main engine power. This allows energy and emission analysis of ship main power plant. The development of ship engine power estimation models with machine learning has become a very popular research area in the literature. Cepowski (2017) established regression models using data from container ships built between 2005 and 2015. Cepowski (2019) expanded the dataset in his next study and developed regression models by conducting a comprehensive study for container, tanker and bulk carrier ships and their subclasses. Ekinci et al. (2011) conducted a ship main design parameters and power estimation study for oil/chemical tankers with 18 different machine learning methods. Okumuş et al. (2021) developed prediction models for both main engine and auxiliary engine power with a large dataset including various ship types using four different regression techniques. Korlak (2022) established a regression model for the electrical power estimation of large capacity container ships. Güneş (2023) performed regression modeling for estimating the main engine power of bulk carriers.

In addition to prediction of the ship engine power with regression approach, developing estimation models with artificial neural network (ANN) has also attracted increasing attention in recent years. Gürgen (2021) developed estimation models for the main engine power of tankers, bulk cargo and container ships with ANN method. Levenberg–Marquardt (LM) algorithm was used in the model training process. Cepowski and Chorab (2021) developed a main engine estimation model for tankers, bulk cargo and container ships with the ANN method. Back propagation, conjugate gradient and pseudo-inverse algorithms were used for training in the study. Özsarı (2023) performed a main engine power estimation study with ANN for tankers, containers and cargo ships. LM, Scaled Conjugate Gradient and Bayesian Regularization algorithms were used in the training of the networks. Güneş et al. (2023) conducted a comparative study for estimating the main engine power of tankers with both regression and ANN method. Levenberg–Marquardt algorithm was used in ANN training stage. Gürgen (2023) established a main engine estimation model with ANN for a special ship type, reefer ships. In the study, LM algorithm was used to optimize the weights between neurons. Gürgen and Çirçir (2024) estimated the main engine power using ANN model with LM algorithm training for general cargo ships.

ANN is a very popular method in the naval architecture and maritime sector and there are many successful applications in the literature. For example; Matulja et al. (2010) applied an ANN on ship propulsion. In the study, a model was developed for the selection of an efficient ship propeller. Şahin et al. (2018) proposed an ANN model that predicts the future values of the Baltic Dry Index, an important indicator in maritime economy. Gürgen et al. (2018) developed a model with ANN to determine the main dimensions of a chemical tanker in the preliminary design. In the study, models with various

numbers of hidden neurons were obtained with LM and SCG learning algorithms and the most suitable prediction model was determined. Shuai et al. (2019) implemented an ANN application for automatic ship docking, which is an important feature in autonomous ships. Cepowski (2020) established a prediction model with ANN for additional resistance caused by head wave, which is an important component in ship resistance analysis. In the study where experimental data were used, the best model was obtained by trying different learning algorithms. Göksu and Enginer (2020) developed a failure prediction model for ship main engine using historical failure data with ANN method. Fam et al. (2022) used the ANN method to estimate fuel consumption on ships using some parameters related to ship and environmental conditions. Guzelbulut et al. (2024) created an ANN model for route optimization of wind-assisted ships.

In this study, prediction model was developed for the main engine power demand of LPG/LNG ships with ANN method. Previously, ANN method has been successfully applied for ship engine power estimation of different types of ships. In the existing literature, back propagation algorithm and its derivatives have been used for ANN training stage. To the best of our knowledge, no heuristic algorithm has been used for training the ship main engine power prediction model with ANN so far. The aim of this study is to investigate the effect of using metaheuristic optimization algorithm on model performance during the training phase of models developed for ship engine power estimation with ANN. The training of the network was performed with the most well-known heuristic algorithms, genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO), and the results obtained with the standard back propagation algorithm and the LM algorithm, were compared. The best model obtained will allow some important predictions such as energy analysis, waste heat utilization potential and emissions to be made in the early design phase of LNG/LPG ships. In addition, after ship engine power estimation and engine selection, it can provide information about fuel consumption, which is one of the important indicators of financial feasibility, by considering the operating profile and weather conditions.

2. Materials and Methods

2.1. Data Set

Data on LPG/LNG ships were obtained from HS Markit Sea-web ship (2021), which provides a comprehensive data set. The data set used in this study covers ships built between 2000 and 2021. First, data on 1703 ships were obtained. Then, these data were reviewed and a total of 338 ships were determined for modeling after separating missing data and sister ships. Table 1 shows the minimum, average and maximum values of the modeling parameters of LPG/LNG ships used for training of models.

Table 1. Statistical analysis of ships in the dataset

	Breadth [m]	Length Overall [m]	DWT [t]	GT [t]	Service Speed [kn]	Total Main Power [kW]
Min	11.4	67.46	963	748	10	1440
Mean	29.21	183.83	36696.53	40007.27	15.93	11569.65
Max	55	345.33	154900	168189	21.38	38540

According to the data set used, the minimum, average and maximum values of the ship breadth were calculated as 11.4, 29.21 and 55 m, respectively. In terms of the ship's overall length, these values were determined as 67.46, 183.83 and 345.33 m, respectively. When the DWT and GT values of the ships were examined, the minimum values were calculated as 963 and 748 t. The maximum DWT and GT values were found to be 154900 and 168189 t. The service speeds of the ships varied between 10 and 21.38 kn, while the average value was calculated as 15.93 kn. The minimum main engine power value of the ships in the data set was 1440 kW, while the maximum value was 38540 kW. The average main engine power value was 11569.65 kW.

2.1. Artificial Neural Network (ANN)

Nowadays, artificial intelligence, which is becoming increasingly important and popular, has started to create a revolution in every field. ANNs are at the forefront of the basic techniques of artificial intelligence. ANN is basically a simulation of the working mechanism of the human brain. ANN produces outputs in response to a set of inputs, just like in the human brain. The first simple versions and mathematical models of ANN were presented by McCulloch and Pitts (1943). Although there are different types of ANN today, feedforward neural network (FNN) is the most widely used type. FNNs have more than one layer and the relationship between the neurons in these layers is unidirectional. Each neuron receives input information from one side and provides output from the other. While a single-layer perceptron is generally sufficient for solving linear problems, multilayer perceptron (MLP) are used for nonlinear and complex problems. In a typical MLP, the first layer is the input layer, the last layer is the output layer, and the layers in between are called hidden layers (Mirjalili et al., 2012; Chen et al., 2015; Mirjalili, 2019; Köyceğiz and Büyükyıldız, 2022). An MLP with a single hidden layer is shown in Figure 1.

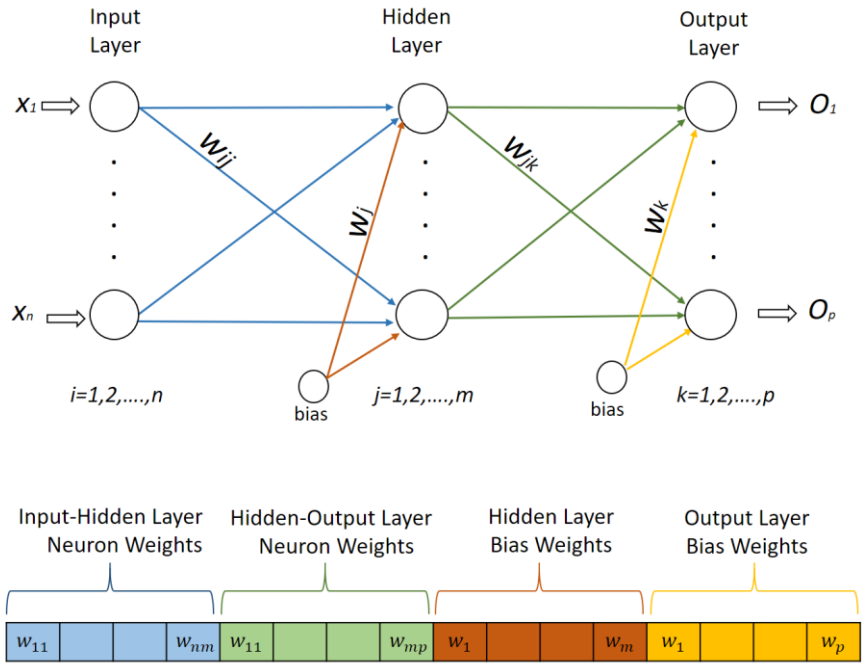


Figure 1. A multilayer network structure and vector representation of weight values.

In the MLP structure in Figure 1, there are *n* input, *m* hidden and *p* output neurons in the layers. In the figure, *X* represents the input information, *W* represents the weights between the connections and *O* represents the output. The following steps are applied to calculate any output value: First, the net information coming to the hidden neuron (*j*. neuron) is calculated as in Equation 1. Then, this information is passed through an activation function and the output of the relevant neuron is calculated. The sigmoid function, which is a non-linear function, is usually used. The net output of the neurons in the hidden layer is calculated as in Equation 2.

$$Net_j = \sum_{i=1}^{n} w_{ij} \cdot x_i + w_j \tag{1}$$

$$f(Net_j) = \frac{1}{1 + e^{-Net_j}} \tag{2}$$

After obtaining the neuron outputs in the hidden layer, the net input information for any neuron (*k*. neuron) in the output layer is calculated as in Equation 3. This information is then passed through an activation function to calculate the output of the relevant neuron. A linear function is generally used in the output layer and the net output of the relevant neuron is calculated as in Equation 4.

$$Net_k = \sum_{j=1}^{m} w_{jk} \cdot f(Net_j) + w_k \tag{3}$$

$$f(Net_k) = Net_k \tag{4}$$

In an ANN model, weights are initially assigned randomly. In order to obtain an acceptable model, it is necessary to find a good combination of weight and bias values, and this process is called network training. Learning in ANN is basically divided into two as supervised and unsupervised learning. Supervised learning method is used in most applications of MLPs and the basic algorithm is Back-Propagation (BP). BP, which is a gradient-based algorithm, uses a gradient descent operator to find the optimum weight and bias values. The difference between the output produced by the network and the target value is called the error. The aim of the algorithm in training is to reduce the error value as much as possible. The error function generally used in MLP training is the mean squared error (MSE). The error information calculated according to the MSE value shown in Equation 5 is propagated back from the layers of the network and the weight and bias values are updated. In this iterative process, the most appropriate weight and bias values are tried to be obtained (Uzlu et al., 2014; Chen et al., 2015; Aljarah et al., 2018).

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(o - t)^2 \tag{5}$$

where n is the number of data, o is the output value produced by the network and t is the target value. BP has disadvantages such as slow convergence and getting stuck in local minimum in applications. In addition, the convergence performance of the BP algorithm can vary considerably depending on the initial values of the weights, biases and parameters (e.g. learning rate). If training is performed with inappropriate variables, even divergence can be observed. In order to find solutions to these disadvantages of BP, advanced versions of BP have been presented in the literature. The most popular of these for engineering applications is the Levenberg Marquardt algorithm. However, this method has its own advantages and disadvantages (Karaboga et al., 2007; Mirjalili et al., 2012).

The use of heuristic optimization algorithms as an alternative to gradient-based learning algorithms in ANN training is of increasing interest. Figure 1 shows the weight and bias values that need to be determined during the training process of the network. These weights are shown as a row vector, contains the weights between the input and hidden layers, the weights between the hidden and output layers, the bias values in the hidden layer, and the bias values in the output layer, respectively. In fact, training the network means optimizing these weight and bias values according to the error function. The total number of parameters that need to be determined for a single-output structure, i.e. the number of decision variables, is obtained as in Equation 6. This value is called the problem size for optimization problem.

$$Problem\ dimension = m \cdot (n + 2) + 1 \tag{6}$$

For example, an ANN training for 5 inputs, 20 hidden neurons and 1 output can be considered as a large-scale optimization problem with 141 decision variables. Heuristic algorithms are generally used for 3 different purposes in an MLP training. In the first one, heuristic algorithms are used to obtain the weight and bias values that provide the minimum error for a given network architecture. Secondly, heuristic algorithms are used to determine the appropriate network architecture for a given type of problem. Finally, heuristic algorithms are used to adjust the parameters of a gradient-based learning algorithm. In the literature, in addition to the GA and PSO algorithms, which are the most commonly used evolutionary and swarm-based algorithms, many algorithms are used for MLP training. In general, the stochastic structure of heuristic algorithms allows avoiding local minima in the optimization process. However, according to the no free lunch theorem, there is no single optimization algorithm that shows superior performance in all optimization problems. Therefore, for some problems, ANN training may not perform well by ending with a local minimum (Wolpert and Macready, 1997; Ho and Pepyne, 2002; Chen et al., 2015; Mirjalili, 2019;).

GA is a well-known evolutionary-based metaheuristic algorithm introduced by Holland (1992). Inspired by the evolutionary process in nature, GA optimizes problems with selection, crossover and mutation operators. The optimization process in GA starts with a series of randomly generated candidate solutions. The structure formed by candidate solutions is called a population. Then, the fitness value is calculated for each candidate in the population and the surviving solutions (individuals) are determined by the selection mechanism. Then, a new population is obtained by crossover and mutation. These steps are repeated to obtain the optimum solution during a certain iteration (Aljarah et al., 2018; Le et al., 2019; Gülmez, 2023).

PSO is a basic swarm-based algorithm presented by Eberhart and Kennedy (1995). PSO was developed by taking inspiration from the survival principle of animals living in flocks such as birds and fish. In PSO, a set of candidate solutions are randomly determined at the beginning of the optimization and these solutions are improved throughout the iterations. In the PSO algorithm, the location of the birds represents the solutions to the problem. The location update of the birds throughout the iterations is carried out according to their current location, speed, personal best location and the best location of the flock (Aljarah et al., 2018; Le et al., 2019; Ateş, 2022).

3. Implementation

In this study, a main engine power estimation model was developed for LPG/LNG ships. The output of the estimation model was the main engine power, while the input variables were breadth, length overall, DWT, GT and service speed. The ANN method was used to model the relationship between input and output variables. In the modeling study with ANN, the data was divided into three as training, validation and testing. While the training data is used to optimize the weight and bias values between the layers, the test data is used to determine the performance of the created model. The validation data set plays an important role in the training process. It continuously monitors the training process and stops the training

if it detects a continuous increase in the error function during a certain iteration. This mechanism prevents the network from memorizing and keeps the generalization ability of the model strong. In this study, the data was randomly divided into 70%, 15% and 15% for training, validation and testing in each training run, respectively. Another key factor that needs to be determined before training is the activation functions. In this study, the activation functions for the hidden layer and the output layer were sigmoid and linear functions, respectively. Determining the number of neurons in the hidden layer is also an important decision parameter to obtain the most powerful model. Choosing too many hidden neurons increases the complexity of the network. In addition, a more complex structure than necessary results in overfitting of the model. In the presented study, six different options for the number of hidden neurons (5, 10, 15, 20, 25 and 30) were considered and the best model was tried to be obtained.

As explained in the previous section, gradient-based learning algorithms are generally used in the training of a neural network. However, training the network with heuristic algorithms has also become an interesting topic for researchers. In this study, the standard BP and LM algorithms were tested as the basic training algorithm. In addition, training was also performed with the two most well-known heuristic algorithms, GA and PSO algorithms. BP and LM algorithms are a derivative-based algorithm in the deterministic algorithm class. In other words, the same result is produced for each training session for the same initial and bias values in a given data set. However, in an ANN application, the weight and bias values are randomly assigned at the beginning of the model's training. Moreover, for most applications, the training data set is also randomly determined for each run. Therefore, more than one training trial is required to obtain the best model. GA and PSO are in the stochastic optimization algorithm class. Therefore, the optimization process involves random processes. As a result, there is a risk of getting stuck in a local minimum in the BP, LM, GA and PSO algorithms used in ANN training, and more than one training trial is required to find the global minimum. The main purpose of this study is to compare the performance of training algorithms. Therefore, for a reliable and fair analysis, the algorithm was run 30 times in each model structure. The maximum iteration number in each algorithm was determined as 200. Meanwhile, to prevent the models from memorizing, all training processes were monitored with the validation data set and the number of validation checks was set to 40. All modeling studies were performed in the Matlab environment. In this study, two versions of GA were used. In the first one, the selection method was set as roulette wheel and in the second one, the tournament selection method was used and they were named as GA-1 and GA-2 respectively. The parameter settings of the training algorithms are given in Table 2.

Table 2. Parameter settings of ANN training algorithms.

Algorithm	Parameter settings
BP	Performance target=1e-6, Minimum performance gradient=1e-5, learning rate=0.5, validation checks=40
LM	Performance target=1e-6, Minimum performance gradient=1e-7, muinitial=0.001, decrease factor mu=0.1, magnification factor mu=10, maximum value of mu=1e10, learning rate=0.5,
GA-1	population size =50, crossover percentage=0.8, mutation percentage=0.03, mutation rate=0.01, selection method= roulette wheel
GA-2	population size=50, crossover percentage=0.8, mutation percentage=0.03, mutation rate=0.01, selection method= tournament
PSO	population size =50, cognitive constant =2, social constant = 2, inertia weight linearly decreases from 0.9 to 0.4

In this prediction model with five inputs and a single output, the number of decision variables changes depending on the number of hidden neurons during optimization stage (training of the network) with GA and PSO, as in Equation 6. These variables were used as a row vector. The lower and upper limit values of the decision variables were assigned as [-1,1]. In general, very large and small values in the data set are found together. This situation makes it difficult to train the network. Therefore, in this study, a normalization procedure was performed for all data and the data were reduced to between [0,1]. While performing optimization with heuristic algorithms, the objective function was to obtain the minimum MSE value for the training data set. When all experimental work was completed, the best models were obtained based on the validation data set. In this context, first, statistical analysis was performed for the 30 run results of the relevant algorithms in each neuron number. Then, nonparametric Friedman test was applied for the general performance analysis of the algorithms. Finally, the performance indicators of the best model were presented. The flowchart of the study was shown in Figure 2. The study consists of four basic stages. In the first stage, the problem is defined. The input and output parameters of the problem are determined. The necessary data set for the training of the network is prepared. The second stage is the training stage of the prediction model. First, the model parameters that need to be known before training are set. These include determining the data's divide ratios as train, validation and test, data divide mode, objective function, hidden neuron number, maximum validation check number, maximum iteration number, run number, etc. Then, the data is normalized. The training algorithms and parameter settings to be used in the ANN training process are determined. In the last step of the second stage, training is performed for each algorithm. The training process involves executing multiple runs with varying numbers of hidden neurons using the specified algorithm, and all resulting data are systematically recorded for subsequent analysis. In the third stage, the performance comparison of the learning algorithms is carried out. The minimum, average, maximum and standard deviation of the objective function (MSE) values of the model for the run numbers obtained at various hidden neuron numbers in each algorithm are calculated. Boxplox is drawn to visualize the results and finally the

Friedman test is applied. In the last stage of the study, performance indicators including MSE, MAPE and R values of the best model obtained are presented in detail.

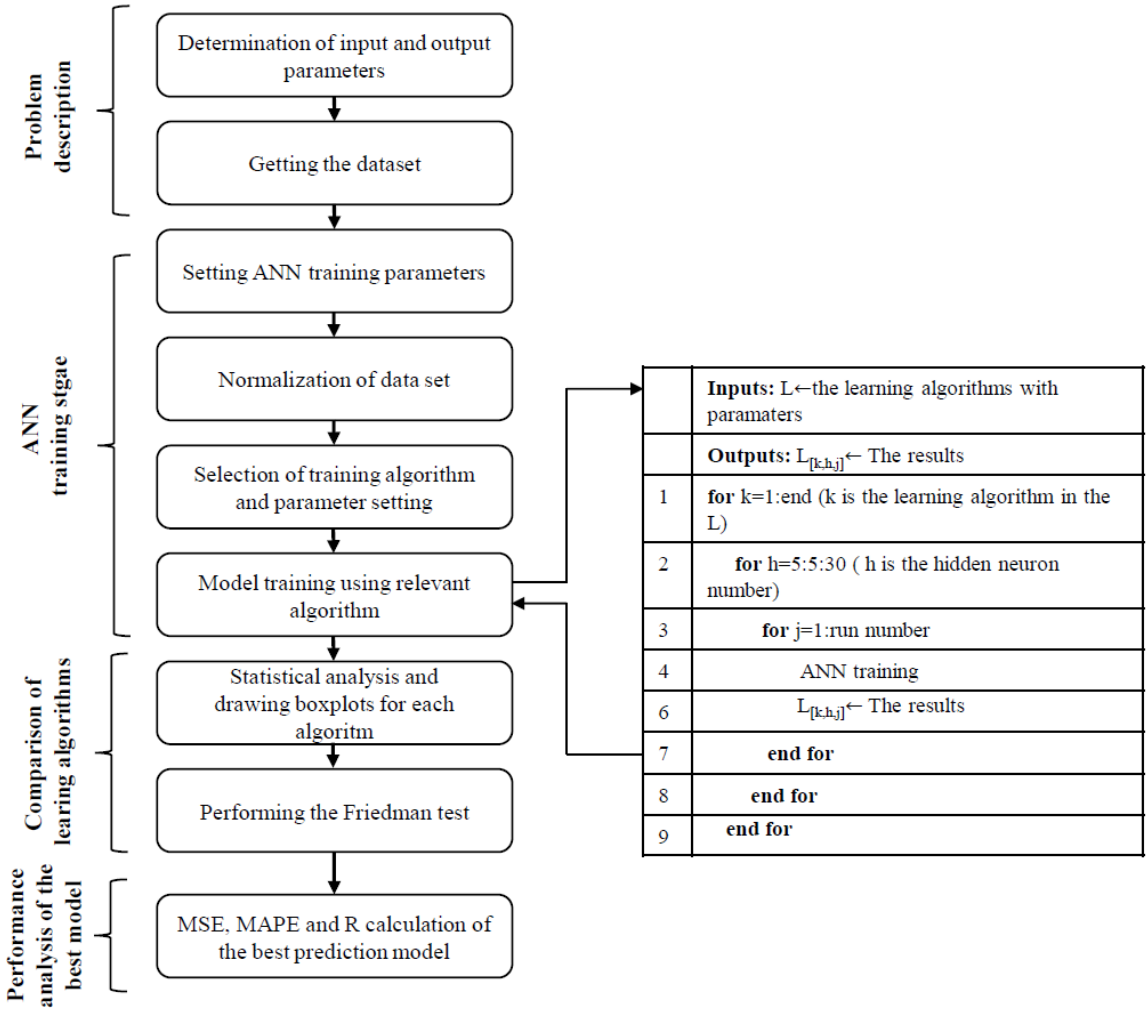


Figure 2. Workflow with pseudocode of the study

4. Results and Discussion

The ability expected from a training algorithm is to reduce the error value (MSE) as much as possible and it does this by using the training data set. Meanwhile, for a model to have high performance, only the training data set is not considered. A very low MSE value for the training data set, but a high MSE value for the validation data set is undesirable. Because such a model experiences an overfitting problem. If both values are close to each other, the generalization ability will be high. The test data set is not a part of the training process. Therefore, it is not appropriate to use it when evaluating the algorithm in terms of performance. The test data set is used for the final evaluation of the data that the model has not seen before in terms of performance. As a result, the MSE values of the validation data set, which is a part of the training process and affects the generalization ability of the model, were taken into account for the analysis of the learning algorithm performance. As a result of the experimental

study, the minimum, average, maximum and standard deviation values of the MSE values of each algorithm for 6 different hidden neuron numbers were given in Table 3.

Table 3. Statistical analysis of training algorithms in terms of model performance

Hidden Neuron	MSE	BP	LM	GA-1	GA-2	PSO
5	Min	0.00174	0.00098	0.00317	0.00204	0.00160
	Mean	0.00518	0.00200	0.00360	0.00268	0.00179
	Max	0.01343	0.00324	0.00423	0.00337	0.00222
	Stdv	0.00247	0.00069	0.00021	0.00035	0.00015
10	Min	**0.00134**	0.00086	0.00284	0.00202	**0.00124**
	Mean	0.00460	0.00196	0.00345	0.00330	0.00141
	Max	0.01186	0.00342	0.00506	0.00472	0.00172
	Stdv	0.00210	0.00074	0.00061	0.00049	0.00013
15	Min	0.00172	0.00085	0.00286	0.00246	0.00199
	Mean	0.00708	0.00196	0.00318	0.00296	0.00218
	Max	0.04289	0.00347	0.00385	0.00352	0.00243
	Stdv	0.00898	0.00076	0.00022	0.00030	0.00011
20	Min	0.00205	**0.00060**	**0.00155**	0.00238	0.00174
	Mean	0.01024	0.00158	0.00199	0.00266	0.00193
	Max	0.09545	0.00289	0.00263	0.00325	0.00224
	Stdv	0.02317	0.00060	0.00024	0.00022	0.00013
25	Min	0.00201	0.00080	0.00206	**0.00190**	0.00140
	Mean	0.00678	0.00179	0.00293	0.00309	0.00212
	Max	0.02460	0.00337	0.00553	0.00482	0.00282
	Stdv	0.00613	0.00068	0.00069	0.00063	0.00034
30	Min	0.00215	0.00087	0.00278	0.00273	0.00216
	Mean	0.00977	0.00203	0.00391	0.00338	0.00256
	Max	0.06348	0.00478	0.00642	0.00490	0.00317
	Stdv	0.01242	0.00087	0.00088	0.00053	0.00025

The BP method achieved a minimum MSE of 0.00134 with a 10 hidden neuron structure. The LM algorithm obtained the lowest MSE of 0.0006, also with 20 hidden neurons. The GA-1 produced a minimum MSE of 0.00155 with 20 hidden neurons, whereas GA-2 reached its lowest MSE of 0.0019 with a 25-hidden neuron structure. Lastly, the PSO method recorded a minimum MSE of 0.00124, also with 10 hidden neurons. When all the results were evaluated together, the lowest MSE value was obtained with the LM algorithm, followed by PSO, BP, GA1 and GA-2, respectively. When the standard deviations were examined, it was seen that heuristic algorithms were generally lower. The standard deviation for LM varied between 0.00060 and 0.00087, while for PSO this value varied between 0.00011 and 0.00034. Although the LM algorithm achieved the lowest value once, it generally produced unstable

results. In contrast, the PSO algorithm produced more consistent results each time. The boxplot, which is the visual form of the distribution of MSE results, is shown in Figure 3. The figure shows the MSE values obtained as a result of 30 runs for each hidden neuron. As a result, the findings show that the PSO algorithm did not find the best solution, but produced more consistent and stable results.

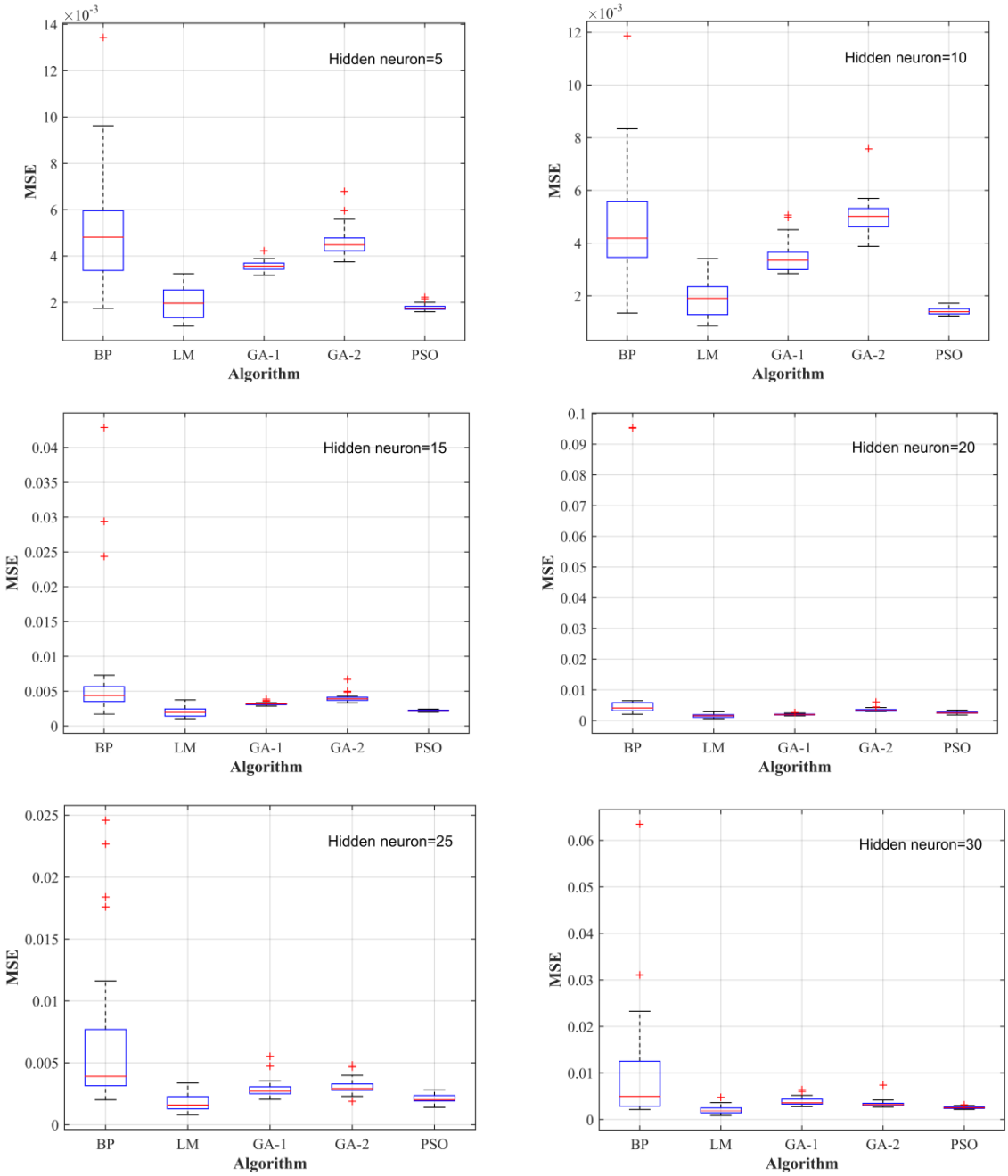


Figure 3. Boxplots for various hidden neuron

Friedman test is a nonparametric test used to compare algorithms for each run. It is used to compare the results of the algorithms in a sequential manner. Table 4 shows the Friedman test results showing the average rankings of the algorithms for 6 different hidden neuron values. While the PSO algorithm won

2 first places, the LM algorithm won 3 first places and both algorithms came first in the 15 hidden neuron structure. The BP and GA-2 algorithms were generally determined as the algorithm with the worst ranking.

Table 4. Friedman score of learning algorithm for various hidden neurons

Hidden Neuron	Algorithm	Rank	Friedman Score	Hidden Neuron	Algorithm	Rank	Friedman Score
5	BP	4	4.20	20	BP	5	4.60
	LM	2	1.67		**LM**	**1**	**1.43**
	GA-1	3	3.37		GA-1	2	1.80
	GA-2	5	4.33		GA-2	4	4.27
	PSO	**1**	**1.43**		PSO	3	2.90
10	BP	4	4.03	25	BP	5	4.43
	LM	2	1.80		**LM**	**1**	**1.50**
	GA-1	3	3.17		GA-1	3	3.37
	GA-2	5	4.63		GA-2	4	3.80
	PSO	**1**	**1.37**		PSO	2	1.90
15	BP	4	4.30	30	BP	4	4.07
	LM	**1**	**1.63**		**LM**	**1**	**1.43**
	GA-1	2	3.17		GA-1	5	4.10
	GA-2	3	4.27		GA-2	3	3.43
	PSO	**1**	**1.63**		PSO	2	1.97

As a result, it was observed that while the LM algorithm produced the best result in estimating the main engine power of LPG/LNG ships, the PSO algorithm produced more consistent results with a reasonable MSE value in each run. According to the Friedman test results, the PSO algorithm was shown that it could compete with the LM algorithm. In this study, a comprehensive performance analysis was also performed for the best model obtained. The performance statistics of the model obtained with the LM algorithm in the 20 hidden neuron structure are given in Table 5.

Table 5. Performance indicators of the best prediction model

Performance metrics	Data sets			
	Training	**Validation**	**Test**	**All**
MSE	0.00105	0.00060	0.00103	0.00098
MAE	0.02238	0.01875	0.02351	0.02200
R	0.99184	0.99473	0.98552	0.99162

The low MSE value obtained for the validation data set also resulted in low MSE values for the training and test data sets. The low and close MSE values for all data sets indicated that the network did not memorize and its prediction performance is high. It was also observed that the mean absolute error

(MAE) values were low and close to each other for each data set. In order to determine the relationship between the real values and the results produced by the model, the correlation coefficient (R) results for each data set were also close to 1, indicating the accuracy of the model.

5. Conclusions

This study presents the performance of learning algorithms in ship main engine power estimation with ANN. When the results obtained for all hidden neurons were examined, the lowest error value was obtained with the LM algorithm having 20 hidden neurons. However, when all the results produced by the LM algorithm were analyzed, it was seen that its standard deviation is relatively high compared to the heuristic algorithms. The lowest standard deviation range was obtained with the PSO algorithm. Friedman test results also showed that the PSO algorithm was superior for most model structures. Therefore, although the lowest error value was obtained with the LM algorithm, the learning algorithm that produces reasonable and stable results was obtained as PSO. As a result, the PSO algorithm seemed more attractive in terms of algorithm performance evaluation. The results can be summarized as follows:

- The minimum MSE values were obtained 0.00134 and 0.0006 for BP and LM algorithm, respectively.
- The GA-1, GA-2 and PSO produced a minimum MSE of 0.00155, 0.0019 and 0.00124, respectively.
- The standard deviation for LM varied between 0.00060 and 0.00087, while for PSO this value varied between 0.00011 and 0.00034.
- According to the Friedman score, the PSO algorithm was the leader 2 times, the LM algorithm was the leader 3 times and both algorithms came out as the best algorithm once.
- The best prediction model was obtained with the LM algorithm.
- MSE values of the best model was obtained as 0.00105, 0.0006 and 0.0103 for the training, validation and test data set respectively.
- The lowest and highest MAE values of the best model was calculated as 0.01875 and 0.02351.
- R values of the best model were also around 0.99 for all data sets.

The limitations of the study were as follows: (i) the data used for the prediction model included ships built between 2000 and 2021, (ii) only GA and PSO algorithms were used as heuristic algorithms, (iii) algorithm parameter settings were taken as fixed, (iv) six different hidden neuron numbers were used. No simulation study was performed for intermediate values.

In this study, the performance comparison of the basic algorithms BP and its advanced version LM algorithms for ANN training with two popular heuristic algorithms GA and PSO was performed. However, new algorithms are presented to the literature every year or existing ones are improved. The exploration and exploitation capabilities of the algorithms are different from each other and produce different results for the same problem. Therefore, finding the best algorithm for a certain problem type

requires a comprehensive study. In future studies, a study can be conducted using current and powerful heuristic algorithms to improve the performance of the ANN model to be established for main engine power estimation. The same methodology can also be applied to different types of problems in naval architecture, marine engineering and maritime applications.

Statement of Conflict of Interest

The author declares that he has no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Author's Contributions

Samet Gürgen: Investigation, Conceptualization, Software, Writing – original draft

Acknowledgement

Ship data was taken from IHS Markit Sea-web™, a paid database offering over 600 data fields on over 220.000 ships of 100 GT and above. Access was provided by Iskenderun Technical University at 2021. We would like to thank Iskenderun Technical University for providing this opportunity.

References

Akyuz E., Celik M. Application of CREAM human reliability model to cargo loading process of LPG tankers. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2015; 34: 39-48.

Aljarah I., Faris H., Mirjalili S. Optimizing connection weights in neural networks using the whale optimization algorithm. Soft Computing 2018; 22: 1-15.

Ateş KT. Çok katmanlı yapay sinir ağı modeli ve kültürel algoritma modeli kullanılarak geliştirilen melez yöntem ile kısa vadeli fotovoltaik enerji santrali çıkış gücü tahmini. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(1): 342-354.

Bai X., Lam JSL. An integrated analysis of interrelationships within the very large gas carrier (VLGC) shipping market. Maritime Economics & Logistics 2019; 21(3): 372-389.

Cepowski T. Prediction of the main engine power of a new container ship at the preliminary design stage. Management Systems in Production Engineering 2017; 25(2): 97-99.

Cepowski T. Regression formulas for the estimation of engine total power for tankers, container ships and bulk carriers on the basis of cargo capacity and design speed. Polish Maritime Research 2019; 26(101): 82-94.

Cepowski T. The prediction of ship added resistance at the preliminary design stage by the use of an artificial neural network. Ocean Engineering 2020; 195: 106657.

Cepowski T., Chorab P. The use of artificial neural networks to determine the engine power and fuel consumption of modern bulk carriers, tankers and container ships. Energies 2021; 14(16): 4827.

Chen JF., Do QH., Hsieh HN. Training artificial neural networks by a hybrid PSO-CS algorithm. Algorithms 2015; 8(2): 292-308.

Çirçir E., Gürgen S. Artificial neural network approach for main engine power prediction of general cargo vessels. Mersin University Journal of Maritime and Logistics Research 2024; 6(2): 113-129.

Eberhart R., Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 04-06 October 1995, 39-43, Nagoya, Japan.

Ekinci S., Çelebi UB., Bal M., Amasyali MF., Boyaci UK. Predictions of oil/chemical tanker main design parameters using computational intelligence techniques. Applied Soft Computing 2011; 11(2): 2356-2366.

Fam ML., Tay ZY., Konovessis D. An artificial neural network for fuel efficiency analysis for cargo vessel operation. Ocean Engineering 2022; 264: 112437.

Fernández IA., Gómez MR., Gómez JR., Insua ÁB. Review of propulsion systems on LNG carriers. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017; 67: 1395-1411.

Gonzalez C., Pérez-Labajos C. Typology of the gas carrier fleet. Journal of Maritime Research 2017; 14 (1): 97-103.

Göksu B., Erginer K. Prediction of ship main engine failures by artificial neural networks. Journal of ETA Maritime Science 2020; 8(2): 98-113.

Guzelbulut C., Badalotti T., Fujita Y., Sugimoto T., Suzuki K. Artificial neural network-based route optimization of a wind-assisted ship. Journal of Marine Science and Engineering 2024; 12(9): 1645.

Gülmez B. Market zinciri ürün dağıtımı probleminin farklı genetik algoritma versiyonları ile çözümü ve karşılaştırması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(1): 180-196.

Güneş Ü. Estimating bulk carriers' main engine power and emissions. Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development 2023; 74 (1): 85-98.

Güneş Ü., Başhan V., Karakurt AS. Predicting tanker main engine power using regression analysis and artificial neural networks. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences 2023; 41(2): 216-225.

Gürgen S. Yapay zeka yaklaşımları ile gemi ana makinesinin belirlenmesi ve optimum organik rankine çevrimli atık ısı geri kazanım sisteminin kurulması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, Türkiye, 2021.

Gürgen S. Artificial neural network-based approach to predict main engine power in reefer ships. 3rd International Mediterranean Congress, 17-18 April 2023, 718-725, Mersin, Türkiye.

Gürgen S., Altın I., Ozkok M. Prediction of main particulars of a chemical tanker at preliminary ship design using artificial neural network. Ships and Offshore Structures 2018; 13(5): 459-465.

Ho YC., Pepyne DL. Simple explanation of the no-free-lunch theorem and its implications. Journal of Optimization Theory and Applications 2002; 115: 549-570.

Holland JH. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press; 1992.

Karaboga D., Akay B., Ozturk C. Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for training feed-forward neural networks. Modeling Decisions for Artificial Intelligence 4th International Conference, 16-18 August 2007, 318-329, Kitakyushu, Japan.

Korlak PK. Prediction of the very-and ultra-large container ships' electricity generation capacity at the initial design stage. Naše More International Journal of Maritime Science & Technology 2022; 69(2): 103-113.

Koycegiz C., Buyulyildiz M. Estimation of streamflow using different artificial neural network models. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(3): 1141-1154.

Le LT., Nguyen H., Dou J., Zhou J. A comparative study of PSO-ANN, GA-ANN, ICA-ANN, and ABC-ANN in estimating the heating load of buildings' energy efficiency for smart city planning. Applied Sciences 2019; 9(13): 2630.

Mangudis L. Safety of logistics processes in the supply of liquid natural gas (LNG). European Research Studies Journal 2024; 27(Special A): 828-838.

Marques CH., Caprace JD. Exploring various sizes of liquefied gas carriers by an optimisation approach to early-stage project. Applied Ocean Research 2020; 97: 102079.

Matulja D., Dejhalla R., Bukovac O. Application of an artificial neural network to the selection of a maximum efficiency ship screw propeller. Journal of Ship Production and Design 2010; 26(03): 199-205.

McCulloch WS., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics 1943; 5: 115-133.

Miana M., Del Hoyo R., Rodrigálvarez V., Valdés JR., Llorens R. Calculation models for prediction of Liquefied Natural Gas (LNG) ageing during ship transportation. Applied Energy 2010; 87(5): 1687-1700.

Michail NA., Melas KD. Geopolitical risk and the LNG-LPG trade. Peace Economics, Peace Science and Public Policy 2022; 28(3): 243-265.

Mirjalili S. Evolutionary algorithms and neural networks theory and applications. Switzerland: Springer; 2019.

Mirjalili S., Hashim SZM., Sardroudi HM. Training feedforward neural networks using hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm. Applied Mathematics and Computation 2012; 218(22): 11125-11137.

Okumuş F., Ekmekçioğlu A., Kara SS. Modelling ships main and auxiliary engine powers with regression-based machine learning algorithms. Polish Maritime Research 2021; 1: 83-96.

Ozsari I. Predicting main engine power and emissions for container, cargo, and tanker ships with artificial neural network analysis. Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development 2023; 74(2): 77-94.

Sea-Web Ships. 2021. Data base: https://maritime.ihs.com (accessed at 2021)

Shuai Y., Li G., Cheng X., Skulstad R., Xu J., Liu H., Zhang H. An efficient neural-network based approach to automatic ship docking. Ocean Engineering 2019; 191: 106514.

Şahin B., Gürgen S., Ünver B., Altin İ. Forecasting the baltic dry index by using an artificial neural network approach. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences 2018; 26 (3): 1673-1684.

Uzlu E., Akpınar A., Özturk HT., Nacar S., Kankal M. Estimates of hydroelectric generation using neural networks with the artificial bee colony algorithm for Turkey. Energy 2014; 69: 638-647.

Wolpert DH., Macready WG. No free lunch theorems for optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 1997; 1(1): 67-82.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1882-1892, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1882-1892, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Heracleum platytaenium Boiss. Uçucu Yağının Elma Kara Leke ve Monilya Hastalığına Karşı Antifungal Aktivitesinin Belirlenmesi

Işıl SARAÇ SİVRİKAYA[1*], Abdullah GÜLLER[2], Bekir TOSUN[3]

[1,2]Bingöl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, 12000, Bingöl
[3]Burdur Gıda Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Seracılık programı, 15100, Burdur

[1]https://orcid.org/0000-0002-5991-2173
[2]https://orcid.org/0000-0003-3887-4208
[3]https://orcid.org/0000-0002-2470-3865
*Sorumlu yazar: isarac@bingol.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 03.03.2025
Kabul tarihi:29.06.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Heracleum platytaenium
uçucu yağ
Monilinia spp.
Venturia inaequalis
antifungal aktivite

ÖZ

Bu çalışma; Türkiye'ye özgü endemik bir tür olan *Heracleum platytaenium* Boiss.'in uçucu yağının *Monilinia* spp. ve *Venturia inaequalis* gibi fitopatojenik funguslar üzerindeki antifungal aktivitesini incelemektedir. Uçucu yağ, bitkinin tam çiçeklenme döneminde toplanan meyvelerinden hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Çalışmada; *Monilinia* spp. ve *V. inaequalis* izolatları üzerinde farklı konsantrasyonlarda (5 µL, 10 µL, 20 µL) uçucu yağın antifungal etkisinin vitro olarak değerlendirilmiştir. Antifungal etkinlik; miselyal büyüme inhibisyonu yüzdesi ve istatistiksel analizlerle belirlenmiştir. Sonuçlar, uçucu yağın her iki patojen üzerinde doza bağlı olarak değişen inhibisyon etkisi gösterdiğini ortaya koymuştur. *Monilinia* spp. için en yüksek inhibisyon oranı %48,8, *V. inaequalis* için ise %46,6 olarak kaydedilmiştir. Ekstraksiyon yılına bağlı olarak antifungal etkinlikte farklılıklar gözlemlenmiş, 2021 yılına ait uçucu yağ örneklerinin 2022 yılına göre daha yüksek inhibisyon oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın bulguları, *H. platytaenium* uçucu yağının önemli bir biyopestisit potansiyeline sahip olduğunu ve fitopatojenlere karşı doğal bir mücadele yöntemi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, bitkisel bazlı antifungal ajanların sürdürülebilir tarım uygulamalarındaki önemini vurgulamakta ve kimyasal fungisitlere alternatif olabilecek yeni yaklaşımlara ışık tutmaktadır.

Antifungal Activity of *Heracleum platytaenium* Essential Oil Against Fungi Causing Apple Scab and Monilia Disease

Research Article

Article History:
Received: 03.03.2025
Accepted: 29.06.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Heracleum platytaenium
essential oil
Monilinia spp.
Venturia inaequalis
antifungal activity

ABSTRACT

This study investigates the antifungal activity of the essential oil of *Heracleum platytaenium* Boiss., an endemic species in Türkiye, against the phytopathogenic fungi *Monilinia* spp. and *Venturia inaequalis*. The essential oil was obtained by hydrodistillation from the fruits collected at the full flowering stage. The antifungal effects of different concentrations (5 µL, 10 µL, 20 µL) of the essential oil were evaluated *in vitro* on *Monilinia* spp. and *V. inaequalis* isolates. Antifungal activity was determined based on the percentage inhibition of mycelial growth and statistical analyses. The results showed that the essential oil exhibited a dose-dependent inhibitory effect on both pathogens. The highest inhibition rates were recorded as 48.8% for *Monilinia* spp. and 46.6% for *V. inaequalis*. Differences in antifungal activity were observed depending on the extraction year, with the 2021 essential oil samples showing higher inhibition rates compared to those from 2022. The findings suggest that *H. platytaenium* essential oil has significant potential as

a biopesticide and may serve as a natural control agent against phytopathogens. These results highlight the importance of plant-based antifungal agents in sustainable agricultural practices and offer new insights into alternatives to chemical fungicides.

To Cite: Saraç Sivrikaya I., Güller A., Tosun B. Antifungal Activity of *Heracleum platytaenium* Essential Oil Against Fungi Causing Apple Scab and Monilia Disease. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1882-1892.

1. Introduction

Heracleum belongs to the Apiaceae family and consists of about 125 species globally. Of these, 23 species are found in Türkiye, nine of which are endemic (Pimenov and Leonov, 2004). The genus Heracleum includes various species that have been used in traditional medicine for centuries. They exhibit several pharmacological effects like anticonvulsant (Sayyah et al., 2005), antifungal and antioxidant (Liu et al., 2024), antihypertensive (Gao et al., 2014), anti-inflammatory (Yang et al., 2002), analgesic (Taniguchi et al., 2005) and antipyretic (Taniguchi et al., 2011). Moreover, some species are utilized in the food industry as a spice and flavoring agents (Souri et al., 2004).

Phytochemical studies have identified various bioactive compounds in *Heracleum* species. These include coumarins, furanocoumarin dimers, coumarin glycosides, anthraquinones, and stilbenes (Dincel et al., 2013). The essential oil of *Heracleum platytaenium* has shown strong biological potential. It exhibits antimicrobial (Akçin et al., 2013; Soyuçok, 2022; Buema et al., 2024) and anticandidal (Işcan et al., 2004) activities. However, the composition of essential oils can vary due to environmental conditions, genetic factors, abiotic stress, and the plant's growth stage (Bayır et al., 2014; Güneş et al., 2025). As a result, research has reported notable differences in the composition and quantity of essential oils from *Heracleum* species (Sajwav et al., 2012; Kılıç et al., 2016).

Essential oils play a crucial role as natural antimicrobial agents. The frequent use of chemical fungicides in agriculture has caused serious concerns. These include environmental pollution, negative effects on human health, and the rise of resistant pathogens (Goswami et al., 2018). Because of this, plant-based biopesticides, especially essential oils, have gained attention as sustainable alternatives. Essential oils from various plant species have been tested for their inhibitory effects on phytopathogenic fungi. These studies highlight their potential as biocontrol agents (Deans and Svoboda, 1990; Demirel et al., 2024).

H. platytaenium is a monocarpic plant species endemic to Türkiye, characterized by its strong aromatic properties. It is primarily distributed in the Black Sea, Central Anatolia, and Aegean regions, typically growing in mixed forests, rocky slopes, and riverbanks (Bayan et al., 2016). While studies have investigated the antimicrobial properties of various *Heracleum* species (Wu et al., 2023; Liu et al., 2024; Segneanu et al., 2024), research specifically on *H. platytaenium* remains limited. Bayan et al. (2017) reported that the essential oil of *H. platytaenium* exhibited *in vitro* antifungal activity against *Alternaria solani* and *Monilia laxa*.

The genus *Monilinia*, particularly *Monilinia laxa*, is a significant fungal pathogen responsible for brown rot disease in stone fruit trees. This disease causes brown, soft rot and mummification of

infected fruits, leading to substantial crop losses (Vasić et al., 2016). *Venturia inaequalis*, on the other hand, is the causative agent of apple scab, a fungal disease that results in olive-green or brown lesions on leaves, fruits, and shoots, thereby reducing both yield and quality (Belete and Boyraz, 2018).

Traditionally, these diseases have been battled using chemical fungicides. However, their use is associated with environmental pollution, negative effects on human health, and the emergence of resistant pathogen strains (Goswami et al., 2018). Therefore, the application of natural compounds such as plant extracts and essential oils as antifungal agents offers sustainable and environmentally friendly alternatives. Research on the antibacterial qualities of *Heracleum* species point to their possibility as biological control agents against phytopathogens.

This study investigated the antifungal effects of *H. platytaenium* essential oil on *Monilinia* spp. and *V. inaequalis*, two phytopathogens that have not been widely studied in this context. By exploring its potential as a natural source for controlling these pathogens, the research aims to support the development of alternatives to chemical fungicides.

2. Materials and Methods

2.1. Collection of Plant and Fungal Material

The *H. platytaenium* species was collected at its full flowering stage and identified by Prof. Dr. Hasan Özçelik based on *Flora of Turkey Volume 4*. The type specimens of the species are preserved at the Süleyman Demirel University Gül Herbarium under the accession numbers 63.75.3.1-2. The study was conducted between 2021 and 2022 inthe research and application fields of the Faculty of Agriculture, Isparta University of Applied Sciences. Seeds collected at full maturity in 2016 were stored at +4°C for one year. In the autumn of 2017, the stored seeds were sown in 32-cell seed viols containing a 3:1 perlite and peat mixture.

The experimental field was plowed deeply in the autumn of 2017, and in 2018, it was tilled again and prepared for sowing using a rotary tiller. In the spring of 2018, the obtained seedlings were transplanted under field conditions with a spacing of 60 cm between plants and 140 cm between rows. The planting was carried out in two rows, each 20 m in length. Weed control was carried out manually by hoeing, and irrigation was applied through a drip system when the soil surface was dry to a depth of 10 cm. General characteristics of the species were observed in 2019 and 2020, and seeds were harvested at full maturity in July 2021-2022.

Both *Monilinia* spp. *and Venturia inaequalis* are known to cause serious damage and significant economic losses in fruit production. The *Monilinia* spp. and *V. inaequalis* isolates tested in this study were obtained from the fungal collection of the Plant Pathology Laboratory at the Faculty of Agriculture, Bingöl University, where they had been previously identified and preserved using standard phytopathological methods.

2.2. Essential Oil Extraction

The fruits of the species were harvested at full maturity in 2021-2022 and then ground. To extract the essential oil, 100 g of the material was distilled for three hours using a Clevenger apparatus.

2.3. Preparation of Culture Medium

To purify and propagate fungal isolates, Potato Dextrose Agar (PDA) medium was prepared and supplemented with distilled water. PDA was sterilized in an autoclave at 121.1°C for 15 minutes and then poured into sterile petri dishes under aseptic conditions. The prepared medium was used for both obtaining pre-cultures and forming experimental groups. In the experimental groups, different concentrations of essential oil (5 µL, 10 µL, 20 µL) were added to the medium and homogenized using a sterile pipette tip. The doses used in this study were selected to encompass and slightly extend beyond previously reported effective concentrations, in order to assess both moderate and high antifungal responses. Similar doses were reported in the aforementioned studies (Akçin et al., 2013; Bayan et al., 2016).

2.4. Preparation of Fungal Isolates

The fungal isolates were transferred onto PDA medium in 90 mm petri dishes and incubated under optimal temperature and humidity conditions for seven days.

2.5. Antifungal Activity Assay

Using a sterile cork borer, 8 mm diameter mycelial plugs were aseptically obtained from the actively growing margins of fungal colonies and inoculated at the center of Petri dishes containing potato dextrose agar (PDA). The plates were incubated under suitable temperature and humidity conditions until full colony development was achieved. Mycelial growth was monitored daily, and final colony diameters were measured at the end of the incubation period.

The experiments were designed in a completely randomized manner with three biological replicates per treatment. Measurements were taken independently for each replicate. A positive control (nystatin) and a negative control (medium without essential oil) were included to validate antifungal efficacy.

The inhibitory effect of the essential oil was quantified based on its impact on mycelial expansion, calculated using the following formula adapted from Deans and Svoboda (1990):

Inhibition (%) = (gc - gt) / gc × 100

Where:

- **gc** refers to the average colony diameter in the control group (mm),
- **gt** refers to the average colony diameter in the treatment group (mm).

2.6. Statistical Analysis

The data obtained from different years and treatment doses were analyzed using a factorial design with triplicate in a completely randomized design. The statistical analysis was performed using the GLM procedure of the SAS statistical software package (SAS, 2009) based on standard variance analysis (ANOVA). Differences between means were determined using the LSD multiple comparison test.

3. Results and Discussion

The essential oil of *H. platytaenium*, applied at different doses, exhibited statistically significant antifungal activity ($p<0.01$) against *Monilinia* spp., while the effects of year and the year × dose interaction were found to be statistically insignificant. However, in the case of *Venturia inaequalis*, the antifungal effect of the essential oil was significantly influenced by year, dose, and their interaction ($p<0.01$) (Table 1).

Table 1. Variance analysis table for the antifungal effect of *H. platytaenium* essential oil against *Monilinia* spp. and *V. inaequalis* pathogens.

Sources of Variation	**Degrees of Freedom**	***Monilinia* spp. F Value**	***V. inaequalis* F Value**
Year	1	1.76	60.84**
Dose	4	1308.99**	6836.04**
Year x Dose	4	1.13	14.44**
Error	20		
General	29		
Cv		3.6	1.52

**: $p<0.01$

The essential oil showed a dose-dependent antifungal effect against *Monilinia* spp. The inhibition zones for the different concentrations were measured as 71.3 mm at 5 µL, 62.0 mm at 10 µL, and 55.2 mm at 20 µL. When compared with the negative control (90 mm), all tested doses demonstrated significant inhibition, though lower than the positive control (8 mm). Yearly comparison revealed that the highest antifungal activity was observed in 2021 at a dose of 20 µL, where the inhibition zone was 53.3 mm. Conversely, the lowest antifungal effect was recorded in 2022 at a dose of 5 µL, with an inhibition zone of 72.3 mm (Table 2).

For *Venturia inaequalis*, the inhibition zones of essential oil varied slightly across years. The average inhibition was measured as 58.4 mm in 2021 and 61.0 mm in 2022. According to the dose, the inhibition zones were 71.0 mm at 5 µL, 68.5 mm at 10 µL, and 61.0 mm at 20 µL. All values showed higher antifungal activity than the negative control (90 mm), but did not reach the efficacy of the positive control (8 mm) (Table 2). The strongest inhibitory effect was observed at the highest dose, suggesting a clear dose–response relationship.

Table 2. Mycelial measurements showing the antifungal activity of the essential oil based on the extraction year: (A) for *Monilinia* spp., (B) for *V. inaequalis*.

		Negative Control	Positive Control	5 µL	10 µL	20 µL	Mean
Monilinia spp	**2021**	90	8	70.3	62.3	53.3	57.8
	2022	90	8	72.3	61.7	57.0	56.8
	Mean	90^{a}	8^{e}	71.3^{b}	62.0^{c}	55.2^{d}	
Lsd_{dose}:	2.48						
		Negative Control	**Positive Control**	**5 µL**	**10 µL**	**20 µL**	**Mean**
V. inaequalis	**2021**	90^{a}	8^{g}	69.0^{c}	67.3^{d}	57.7^{f}	58.4^{b}
	2022	90^{a}	8^{g}	73.0^{b}	69.7^{c}	64.3^{e}	61.0^{a}
	Mean	90^{a}	8^{e}	71^{b}	68.5^{c}	61.0^{d}	

$Lsd_{yearxdose}$:1.38, Lsd_{year}:0.70, Lsd_{dose}:1.09, Mean: The "Mean" column presents the arithmetic average (in mm) of mycelial growth values from the years 2021 and 2022 for each treatment dose. These values are provided to illustrate the overall effect of each dose independently from the year.

The findings of our study revealed that the essential oil of *Heracleum platytaenium* exhibited a dose-dependent increase in antifungal activity against both phytopathogens. Notably, at a concentration of 20 µL, inhibition rates reached up to 48.8% for Monilinia spp. and 46.6% for *Venturia inaequalis*. These results demonstrate that microbial activity can be effectively suppressed depending on the concentration of the essential oil. Similarly, Bayan et al. (2016) reported that at a 10 µL dose, *H. platytaenium* essential oil caused near-complete inhibition of mycelial growth in certain phytopathogens.

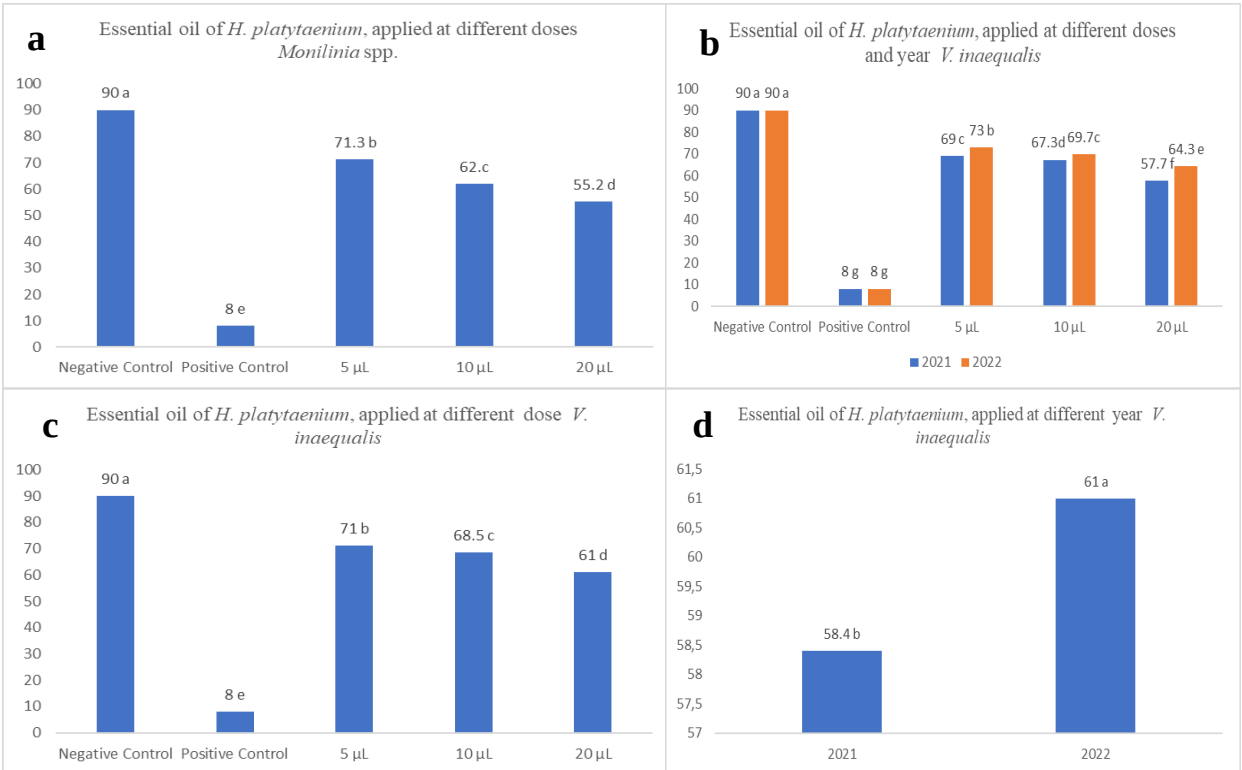


Figure 1. Antifungal activity of *Heracleum platytaenium* essential oil against *Monilinia spp.* and *Venturia inaequalis* at different doses (5, 10, and 20 µL) and extraction years (2021 and 2022). (a) Effect on *Monilinia* spp. at different doses, (b) Effect on *V. inaequalis* at different doses and years, (c) Effect on *V. inaequalis* at different doses, (d) Effect on *V. inaequalis* from different extraction years (Other graphs were not included as the results were not statistically significant)

In addition, significant differences were observed in the antifungal activity of the essential oil between the two years of the study. The samples obtained in 2021 exhibited higher inhibition rates compared to those collected in 2022. This variation may be attributed to year-dependent changes in the chemical composition of the essential oil. A similar finding was reported by Mechergui et al. (2016), who emphasized that the biological activity of essential oils is closely related to the environmental conditions (e.g. temperature, precipitation, soil moisture) of the growing year. In this context, variations between years may affect the major components of essential oils and thereby influence their bioactivity. Therefore, it is crucial to consider both the year and environmental factors during the standardization process of plant-derived products intended for use as biopesticides.

The essential oils of *H. crenatifolium* Boiss., *H. sphondylium* L. subsp. *ternatum* (Velen.) Brummitt, and *H. platytaenium* Boiss. (Umbelliferae) were extracted using hydrodistillation. GC and GC/MS analyses identified octyl acetate as the main compound in all three species. The concentrations were 93.7%, 87.6%, and 31.6%, respectively. In *H. platytaenium*, octyl butyrate was also found as a major component. The antifungal effects of these essential oils were tested against *Candida glabrata* using the microdilution method. The results showed strong inhibitory effects in all samples (Akçin et al., 2013).

In another study, Bayan et al. (2016) investigated the effects of *H. platytaenium* essential oil on phytopathogenic fungi, including *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (FORL), *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Botrytis cinerea*, and *Verticillium dahliae*. The dominant components of the essential oil were reported as myristicin (27.47%), octyl acetate (25.10%), 1-octanol (16.90%), and octyl 2-methylbutyrate (9.88%). The antifungal activity of the essential oil at various concentrations (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 5, and 10 µL) was assessed using the agar well diffusion method. The results demonstrated that at 10 µL, the essential oil completely inhibited the mycelial growth of FORL, *R. solani*, and *S. sclerotiorum* (100% inhibition). Significant growth reductions were also observed in the other tested pathogens. The LC90 values were calculated as 17.53 µL for FORL, 15.52 µL for *R. solani*, 8.83 µL for *S. sclerotiorum*, 15.58 µL for *B. cinerea*, and 149.54 µL for *V. dahliae*. These findings indicate that *H. platytaenium* essential oil exhibits significant antifungal activity against certain phytopathogenic fungi and holds potential for use in biological control applications.

In this study, the antifungal activity of *H. platytaenium* essential oil against *Monilinia* spp. and *V. inaequalis*, two significant phytopathogenic fungi, was investigated. The results demonstrated that the essential oil caused dose-dependent mycelial inhibition in both fungal species (Table 1).

The percentage inhibition rates of *Monilinia spp.* and *Venturia inaequalis* at different doses of *H. platytaenium* essential oil are shown in Figure 1. The graph illustrates a dose-dependent inhibition pattern for both pathogens, with the highest activity observed at 20 µL. The antifungal activity of *H. platytaenium* essential oil differed based on the extraction year. Overall, the 2022 samples showed lower inhibition rates than those from 2021 (Tables 1 and 2, Figure 1). At a concentration of 20 µL, the inhibition rate for *Monilinia* spp. was 47.7% in 2021 and 42.2% in 2022, while for *V. inaequalis*,

the rates were 46.6% and 37.7%, respectively (Table 2). Similarly, mycelial growth measurements indicated that the 2021 essential oil samples provided stronger inhibition than those from 2022 (Table 1).

These results show that *H. platytaenium* essential oil possesses considerable fungicidal activity, indicating its usefulness as a biopesticide for plant pathogen control. Further, this study aids in filling the gap of research thatexists on theantifungal effects of this oil. For effective control of important agricultural pathogens such as *Monilinia* spp. and *V. inaequalis*, sustainable agriculture must seek alternatives like these (Goswami et al., 2018). Phytopathogenic antifungal activity often varies from year to year and this may depend on shifts in the growing conditions, or some degree of environmental stress, something as simple as the essential oil's chemical composition. Phytopathogens are effective only if host resistance fails, so manipulating essential oil composition may give positive results (Bahadori et al., 2016; Mechergui et al., 2016). Achieving these variations is critical to ensure that their use with certain essential oils and herbs will be effective in biological control without negative consequences.

The dose-dependent antifungal activity observed in our study highlights the strong bioactive potential of *H. platytaenium* essential oil, particularly at 20 µL concentrations. These findings not only align with previous reports on *Heracleum* species but also expand the understanding of their use against *Monilinia* spp. and *Venturia inaequalis*. For instance, Akçin et al. (2013) and Bayan et al. (2016) demonstrated significant antifungal effects of *Heracleum* essential oils against other phytopathogens, supporting our results.

In addition to essential oils, studies have also explored the antifungal effects of alternative compounds such as boron-based formulations. Boric acid and other boron compounds have shown promising inhibitory effects against fungal pathogens by disrupting membrane function and metabolic activity. However, unlike essential oils, boron compounds may pose phytotoxic risks depending on concentration and application method. Thus, essential oils offer a more sustainable and eco-friendly approach, especially for integrated pest management strategies.

Considering the rise of fungicide-resistant strains and environmental concerns associated with synthetic chemicals, our findings reinforce the value of essential oils as potential biopesticides and encourage further exploration of both plant-based and inorganic alternatives under field conditions.

In conclusion, these results illustrate that *H. platytaenium* possesses qualities that deem it effective and a viable contender for further research in essential oil antifungal properties, making it a effective solution for agricultural diseases. Finally, further work is essential to corroborate these findings against various ecological and environmental conditions. In addition, formulation and field studies, as well as toxicity evaluations need to be done to investigate the bio-fungicide efficacy.

Conflict of Interest Statement

The authors declares that there is no conflict of interest.

Authors Contribution Statement

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

References

Akçin A., Seyis F., Akçin TA., Çaycı YT., Çoban AY. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of endemic Heracleum platytaenium Boiss. from Turkey. Journal of Essential Oil Bearing Plants 2013; 16(2): 166-171.

Bahadori MB., Dinparast L., Zengin G. The genus Heracleum: A comprehensive review on its phytochemistry, pharmacology, and ethnobotanical values as a useful herb. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 2016; 15(6): 1018-1039.

Bayan Y., Yılar M., Onaran A. Antifungal activity and chemical composition of the essential oil of Heracleum platytaenium Boiss's. Egyptian Journal of Biological Pest Control 2016; 26(2): 237-240.

Bayan Y., Yılar M., Onaran A. Heracleum platytaenium Boiss. ve Myrtus communis L. bitki uçucu yağlarının Alternaria solani Ell. and G. Martin ve Monilia laxa Aderh. and Ruhl. (Honey) üzerine antifungal aktivitesinin araştırılması. Akademik Ziraat Dergisi 2017; 6(1): 11-16.

Bayır B., Gündüz H., Usta T., Şahin E., Özdemir Z., Kayır Ö., Sen Ö., Akşit H., Elmastaş M., Erenler R. Chemical composition of essential oil from Marrubium vulgare L. leaves. Journal of New Results in Science 2014; 6: 44-50.

Belete T., Boyraz N. Critical review on apple scab (Venturia inaequalis) biology, epidemiology, economic importance, management and defense mechanisms to the causal agent. International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences 2018; 4(12): 1-16.

Bowen JK., Mesarich CH., Bus VG., Beresford RM., Plummer KM., Templeton MD. Venturia inaequalis: the causal agent of apple scab. Molecular plant pathology 2011; 12(2): 105-122.

Buema G., Ciocîlteu MV., Bejenaru C. Insight into Romanian wild-grown Heracleum sphondylium: Development of a new phytocarrier based on silver nanoparticles with antioxidant, antimicrobial and cytotoxicity potential. Antibiotics 2024; 13(9): 911.

Deans SG., Sobada KP. Antimicrobial properties of marjoram (Origanum marjorana L.) volatile oil. Flavour and Fragrance Journal 1990; 5: 187-190.

Demirel Ö., Güneş H., Can C. Sustainable and modern bio-based technologies: new approachs to food safety and security. Environment, Development and Sustainability 2024.

Dinçel D., Hatipoğlu SD., Gören AC., Topçu G. Anticholinesterase furocoumarins from Heracleum platytaenium, a species endemic to Ida Mountains. Turkish Journal of Chemistry 2013; 37: 675-683.

Gao Y., Liu Y., Wang ZG., Zhang HL. Chemical constituents of Heracleum dissectum and their cytotoxic activity. Phytochemistry Letters 2014; 10: 276-280.

Goswami SK., Singh V., Chakdar H., Choudhary P. Harmful effects of fungicides - Current status. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology 2018; 11: 1011-1019.

Güneş H., Demir S., Erdinç Ç. How do AMF and Biochar affect pepper growth and nutrient content under biotic and abiotic stress?. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi 2025; 28(2): 459-479.

Işcan G., Özek T., Özek G., Duran A., Başer K. Essential oils of three species of Heracleum: Anticandidal activity. Chemistry of Natural Compounds 2004; 40: 544-547.

Kılıç CS., Demirci B., Coşkun M., Başer KHC. Chemical composition of Heracleum platytaenium Boiss. (Apiaceae) essential oil from Turkey. Natural Volatiles and Essential Oils 2016; 3: 13-23.

Koopman TA., Meitz-Hopkins JC., Bester-van der Merwe AE., Tobutt KR., Bester C., Lennox CL. Pathogenicity and virulence of south African isolates of *Venturia inaequalis*. Eur J Plant Pathol 2022; 164: 45–58.

Landi L., D'Ortenzio AL., Makau SM., De Miccolis Angelini RM., Romanazzi G. Validation of *Monilinia fructicola* putative effector genes in different host peach (*Prunus persica*) cultivars and defense response ınvestigation. Journal of Fungi 2025; 11(1): 39-59.

Liu M., Liu S., Wu H., Zhang W., Zhang Y., Guo J., Yu H., Chen H. Isolation, antioxidant and antifungal activity of furanocoumarins from the leaves of Heracleum vicinum Boiss. Food Bioscience 2024; 61: 105009.

Mechergui K., Jaouadi W., Coelho JP., Khouja ML. Effect of harvest year on production, chemical composition and antioxidant activities of essential oil of oregano (Origanum vulgare subsp. glandulosum (Desf.) Ietswaart) growing in North Africa. Industrial Crops and Products 2016; 90: 32-37.

Pimenov M., Leonov M. The Asian umbelliferae biodiversity database (ASIUM) with particular reference to South-West Asian taxa. Turkish Journal of Botany 2004; 28: 139-145.

Sajwan K., Sajwan S., Rai N., Negi K., Sharma RK., Khetwal KS. Chemical constituents of Heracleum candicans Wall. Research & Reviews: Journal of Herbal Science 2012; 1(2): 1-9.

Sayyah M., Moaied S., Kamalinejad M. Anticonvulsant activity of Heracleum persicum seed. Journal of Ethnopharmacology 2005; 98: 209-211.

Segneanu AE., Vlase G., Vlase T., Bejenaru LE., Mogoşanu GD., Buema G., Herea DD., Ciocîlteu MV., Bejenaru C. Insight into Romanian wild-grown Heracleum sphondylium: Development of a new phytocarrier based on silver nanoparticles with antioxidant, antimicrobial and cytotoxicity potential. Antibiotics 2024; 13(9): 911.

Soyuçok A. The effects of some essential oils on methicillin-resistant Staphylococcus aureus. Turkish Journal of Agriculture Food Science and Technology 2022; 10(1): 49-53.

Souri E., Farsam H., Sarkheil P., Ebadi F. Antioxidant activity of some furanocoumarins isolated from Heracleum persicum. Pharmaceutical Biology 2004; 42: 396-399.

Taniguchi M., Inoue A., Shibano M., Wang NH., Baba K. Five condensed furanocoumarins from the root of Heracleum candicans Wall. Journal of Natural Medicine 2011; 65: 268-274.

Taniguchi M., Yokota O., Shibano M., Wang NH., Baba K. Four coumarins from Heracleum yunngningense. Chemical and Pharmaceutical Bulletin 2005; 53: 701-704.

Vasić T., Maširević S., Bulajić A. Morphological, cultural and ecological characterization of Monilinia spp., pathogens of stone fruit in Serbia. Pesticidi i Fitomedicina 2016; 31(1-2): 9-18.

Wu H., Liu M., Liu S., Yu H., Chen H. Isolation of coumarins with anti-Trichophyton rubrum activity from Heracleum vicinum Boiss. Brazilian Journal of Microbiology 2023; 54(2): 1093-1102.

Yang LL., Liang YC., Chang CW., Lee WS., Kuo CT., Wang CC., Lee HM., Lin CH. Effects of sphondin, isolated from Heracleum laciniatum, on IL–1β-induced cyclooxygenase-2 expression in human pulmonary epithelial cells. Life Sciences 2002; 72: 199-213.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1893-1906, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1893-1906, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Use of Various Chili Powder in Chicken Patties: Effects on Color and Oxidative Stability

Nazik Meziyet DİLEK[1*], Halime ALP[2]

[1]Department of Nutrition and Dietetics, Akşehir Kadir Yallagöz School of Health, Selçuk University, Konya, Türkiye
[2]Department of Food Processing, Karapınar Aydoğanlar Vocational School, Selçuk University, Konya, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-2506-2067
[2]https://orcid.org/0000-0001-5833-9611
*Corresponding author: meziyetdilek@selcuk.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 24.04.2025
Accepted: 11.07.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Lipid oxidation
Chili varieties
Bird's eye chili
Jalapeno
Mexican chili

ABSTRACT

In this study, the chicken patties were manufactured using different chili powders such as Bird's eye chili, Jalapeno and Mexican chili. It was found that TBARS values increased over 6 days at 4°C in the chicken patty samples except CP3, with the control group showing the highest increase in lipid oxidation. Among the chili varieties used, Mexican chili (CP3) was the most effective in preventing lipid oxidation, as it maintained stable TBARS values throughout the storage period. The addition of chili powder significantly reduced the pH of chicken patties compared to the control group, with the lowest pH values observed in the CP2 and CP3 groups. Jalapeño maintained pH stability of samples throughout storage. The incorporation of various chili powders into chicken patties resulted in darker-colored patties on days 1 and 2, with Bird's eye chili yielding the closest color to the control on day 6. The CP3 group exhibited the highest *a** values, contributing to a redder and more color-stable appearance, while the addition of Jalapeño did not significantly affect *b** values, while Bird's eye and Mexican chili increased them. In conclusion, the incorporation of different chili varieties into chicken patty formulations was found to be effective in mitigating lipid oxidation, with Mexican chili demonstrating the most pronounced protective effect.

Tavuk Köftelerinde Çeşitli Acı Biber Tozlarının Kullanımı: Renk ve Oksidatif Stabilite Üzerine Etkileri

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.04.2025
Kabul tarihi:11.07.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Lipid oksidasyonu
Biber çeşitleri
Kuş gözü biberi (Kuş biberi)
Jalapeno
Meksika biberi

ÖZ

Bu çalışmada, tavuk köfteleri Kuş gözü biberi, Jalapeno biberi ve Meksika biberi gibi farklı biber tozları kullanılarak üretilmiştir. TBARS değerlerinin CP3 hariç tavuk köftesi örneklerinde 4°C'de 6 gün boyunca arttığını ve kontrol grubunun lipid oksidasyonunda en yüksek artışı gösterdiği tespit edilmiştir. Kullanılan biber çeşitleri arasında Meksika biberi (CP3), depolama süresi boyunca sabit TBARS değerlerini koruduğu için lipid oksidasyonunu önlemede en etkili olanıydı. Toz biber ilavesi tavuk köftelerinin pH değerini kontrol grubuna kıyasla önemli ölçüde düşürmüş, en düşük pH değerleri CP2 ve CP3 gruplarında gözlenmiştir. Jalapeño, depolama boyunca örneklerin pH stabilitesini korumuştur. Çeşitli acı biber tozlarının tavuk köftelerine eklenmesi, 1. ve 2. günlerde daha koyu renkli köfteler elde edilmesine neden olurken, kuş gözü acı biber 6. günde kontrole en yakın rengi vermiştir. CP3 grubu en yüksek *a** değerlerini sergileyerek daha kırmızı ve daha renk stabil bir görünüme katkıda bulunurken, Jalapeño ilavesi *b** değerlerini önemli ölçüde etkilememiş, kuş gözü ve Meksika biberi ise artırmıştır. Sonuç olarak tavuk köfte formülasyonlarında çeşitli biberlerin kullanımının lipid oksidasyonunun önlenmesinde etkili olduğu, özellikle Meksika biberinin en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir.

To Cite: Dilek NM., Alp H. Use of Various Chili Powder in Chicken Patties: Effects on Color and Oxidative Stability. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1893-1906.

1. Introduction

Chicken meat is important in the human diet because it is rich in some nutrients, such as essential amino acids, vitamins and minerals, and low in fat and cholesterol compared to other meat sources. In addition, chicken meat and meat products have high sensory properties, leading to high acceptance, and chicken meat is easy for everyone to prepare, with no social or religious restrictions (Jung et al., 2014; Huo et al., 2021; Hailemariam et al., 2022). Chicken meat is suitable for the production of various meat products such as nuggets, sausages, patties, which are produced by processing chicken meat with various seasonings and non-meat ingredients (Akter et al., 2022). Chicken patties have become a popular meat product as a result of the increased demand for ready-to-eat foods in recent years, associated with the development of food science and technology and the modernisation of lifestyles. Patties are made by mixing minced meat with oil, breadcrumbs, salt and spices and then forming it into balls using a mould (Patriani and Apsari, 2021; Akter et al., 2022). Currently, some bioactive ingredients are being used to enhance the nutritional and functional properties of patties due to increased consumer interest in healthier meat products (Verma et al., 2016; Patriani and Apsari, 2021; Akter et al., 2022).

Meat and meat products can be chemically degraded at different stages, such as production, storage and distribution, resulting in a significant decrease in quality parameters (Domínguez et al., 2019; Alirezalu et al., 2020; Biplob et al., 2024). One important element influencing the safety, shelf life, and quality of meat products is lipid oxidation. The shelf life of meat and meat products was shortened by lipid oxidation, which also caused a decline in organoleptic qualities such as color, flavor, texture, and nutritional value. (Devatkal et al., 2014; Alirezalu et al., 2020; Biplob et al., 2024). It leads to the formation of off-flavors, discoloration, nutrient loss, and potentially harmful compounds. Over the years, various natural and synthetic antioxidants have been used to control lipid oxidation in meat systems. Compounds such as rosemary extract, plant origin polyphenols, tocopherols, and essential oils from spices have demonstrated varying degrees of effectiveness in inhibiting oxidative reactions (Shahidi and Zhong, 2010; Karre et al., 2013; Estevez, 2015; Babaoğlu et al., 2022; Dilek et al., 2025). Because of their high phenolic component concentration and antioxidant capacity, plant-based by-products have garnered increasing attention in recent years as sustainable and useful additives. In order to stop lipid oxidation, natural antioxidants are frequently added to meat products (Lorenzo et al., 2018). Natural antioxidants are abundant in plant materials such as fruits, vegetables, medicinal herbs and spices, which have attracted attention in recent years due to their high content of phenolic and other bioactive components with antioxidant and antimicrobial properties (Akter et al., 2022; Biplob et al., 2024). Natural antioxidants are recognised as GRAS (Generally Recognised as Safe) ingredients and are effective at low levels and non-toxic at high levels (Lorenzo et al., 2018; Munekata et al., 2020).

Pepper (*Capsicum* spp.) is a widely cultivated plant in the world and a popular spice belonging to the *Solanaceae* family, which is widely used in the world's nutrition (Hernández-Pérez et al., 2020;

Awodola-Peters et al., 2021; Zhang et al., 2023). *Capsicum annuum* and *Capsicum frutescens* are most known and used as spices with a pungent and spicy flavour. A number of bioactive compounds in *Capsicum* spp. have protective properties against the microbial developments of spoilage and pathogenic microbial growth and oxidation are alkylamides (capsaicinoids) and polyphenols (Souza et al., 2022; Ivane et al., 2024). The polyphenols in capsicums are flavonoids, phenolic acids and anthocyanins and protect against oxidation. Bioactive compounds in *Capsicum* spp. could be used as natural substitutes for chemical antimicrobials and antioxidants in food technology. The effects of bioactive compounds are related to the food composition, production technology and storage requirements (Baenas et al., 2019; Liu et al., 2023; Ivane et al., 2024). The varieties of *Capsicum* spp. and the degree of ripening caused differences in pepper quality (Awodola-Peters et al., 2021). Bird's eye chilli (*Capsicum frutescens*) is grown commercially in tropical regions, particularly in Thailand, and has a higher spiciness than other chillies (Khanema et al., 2024; Pastsart et al., 2024). Jalapeno pepper (*Capsicum annum*) is one of the well-known and most consumed peppers in Mexico (Sánchez Toledano et al., 2023). The effect of *Capsicum* spp. on the quality of meat and meat products has been observed in the literature (Kim, 2020; Ivane et al., 2024; Ivane and Romeo, 2025).

In this study, Bird's eye chili, Jalapeno, and Mexican chili powders were incorporated into chicken patties at a concentration of 2.5% by replacing an equivalent amount of breadcrumb in the formulation, in order to evaluate their effectiveness in reducing lipid oxidation and improving product stability during storage. Unlike previous studies, which primarily focused on pepper extracts or essential oils, this study utilizes whole fruit powder, promoting a more sustainable and cost-effective approach. The antioxidant properties of the chili powders were also characterized to better understand their functional contribution to oxidative stability. The aim of this study was to determine the effects of Bird's eye chilli, jalapeno and Mexican chilli on the pH, color and thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) parameters of chicken patties during the 1st, 2nd and 6th days of chilled storage.

2. Materials and Methods

Chicken breast meat used in the production of chicken patties was procured from a local supplier in Konya and the fresh meat samples were shipped to the lab at 4 °C to maintain a cold environment. Fresh hot chili peppers were purchased from a local market, manually chopped into small pieces using a knife, and dried at ambient room temperature. After drying, the peppers were ground into powder and added to the product formulation. The drying process was carried out under typical room conditions without controlling specific parameters such as temperature or humidity.

The remaining ingredients used in the chicken patties formulation, including olive oil, salt, and breadcrumbs, were sourced from local market in Konya.

2.1. Preperation of Chicken Patties

Using a plate with holes 3 mm in diameter (Kitchen Aid, Classic Model, USA), the fresh chicken meat (not previously frozen) was minced twice in a meat grinder without any trimming (i.e., skin and fat were not removed) and then separated into four batches.

After being weighed separately, all ingredients- breadcrumbs, olive oil, salt, distilled water, and chili powders- were added simultaneously and manually mixed by hand for approximately 4 minutes until a homogeneous mixture was obtained. Four varieties of chicken patties were made in the manner described in Table 1: CP1 (Bird's eye chili), CP2 (Jalapeño), CP3 (Mexican chili), and control C (no chili powder added). Every chicken patty, weighing roughly 40 ± 0.1 g each, was manually molded into a circular form with dimensions of 35 mm in diameter and 10 mm in thickness. To ensure uniformity in sample dimensions, a mold was used during the shaping process, providing consistent diameter and thickness across all samples. Additionally, each sample was individually weighed using a calibrated digital balance to achieve the target weight with a precision of ±0.1 g during manual shaping. They were then individually placed in Styrofoam trays. The samples were packaged under atmospheric conditions using a polyvinyl chloride (PVC) film that allows oxygen transmission. No vacuum packaging or additional sealing method was employed. After shaping and packaging, all patties were immediately stored at 4 ± 1°C (for 6 days). The initial analyses, corresponding to day 1 of storage, were performed after approximately 24 hours of refrigeration. A total of 72 chicken patties were produced: three patties for each treatment x four treatments (C, CP1, CP2 and CP3) x three storage times (1, 2 and 6 days) x two independent replications (using similar manufacturing processes). All samples were analysed on days 1, 2 and 6.

Table 1. Chicken patty formulation of treatments with different chili powder

Ingredients (g)	**Groups**			
	C	**CP1**	**CP2**	**CP3**
Chicken meat	108	108	108	108
Breadcrump	8.4	5.4	5.4	5.4
Olive oil	1.2	1.2	1.2	1.2
Salt	1.2	1.2	1.2	1.2
Distile water	1.2	1.2	1.2	1.2
Bird's eye chili powder	-	3	-	-
Jalapeño powder	-	-	3	-
Mexican chili powder	-	-	-	3

C: Control; CP1: Bird's eye chili powder added chicken patty; CP2; Jalapeño powder added chicken patty; CP3; Mexican chili powder added chicken patty.

2.2. Determination of Total Phenolic Content, Total Flavonoid Content and Antioxidant Activity of Chili Powders

Çetin Babaoğlu et al. (2024) proposed a modified method for obtaining the extract from the chili samples before the TPC, TFC, and DPPH assays. For this purpose, five grams of ground sample were suspended in a 70% methanol (v/v) solution, and they were then incubated in a shaking water bath (250 rpm) at

25°C for an hour. After incubation, centrifugation was used for 10 minutes at 10,000 rpm to collect the supernatant.

According to Lee et al. (1998), DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) was used to assess the extracts' capacity to scavenge free radicals. A spectrophotometer (UV-160 A, UV–Visible Recording Spectrophotometer, Shi-madzu, Tokyo, Japan) was used to measure the absorbance at 517 nm. A percentage of free radical scavenging activity (%) was used to represent the results.

The Folin-Ciocalteu procedure was employed to determine the extracts' total phenolic contents (Yoo et al., 2004). 2.5 mL of 10% Folin reagent (v/v), 0.1 mL of extract, and 0.4 mL of distilled water were put in a tube and left in the dark for two minutes in order to measure the complex's total phenolic content. Two milliliters of a 7.5% NaCO 3 (w/v) solution were then added to the sample tube, and it was incubated for five minutes at 50°C. A spectrophotometer was used to measure the samples' absorbance at 760 wavelengths. Using a gallic acid standard curve, the samples' total phenolic acid concentration was determined on a dry basis.

The total flavonoid concentration of the extracts was ascertained using the technique described by Chen and Chen (2011). 150 µL of 5% NaNO3 (w/v), 2 mL of distilled water, and 0.5 mL of extract were placed in a tube and left in the dark for six minutes in order to measure the total flavonoid content. After that, 200 µL of distilled water, 2 mL of 1 N NaOH, and 150 µL of 10% AlCl3 (w/v) solution were added to the sample tube, and it was allowed to sit for fifteen minutes. A spectrophotometer was used to test the samples' absorbance at 510 wavelengths. Using a catechin standard curve, the samples' total flavonoid concentration was determined on a dry basis.

2.3. pH Values of Chicken Patties

Using a pH meter and the procedure described by Lambooij et al., (1999). A pH meter was used to measure the chicken patties' pH levels at three distinct points on each sample. Prior to the analysis, the pH meter was calibrated using buffer solutions with pH values of 4, 7, and 10. To guarantee accuracy, the readings were obtained right after calibration.

2.4. Lipid Oxidation (Thiobarbituricacid (TBARS) Number) of Chicken Patties

As stated by Tarladgis et al. (1960) method was used to measure the TBARS number, a measure of lipid oxidation. Using a UV-160 A, UV-Visible Recorder Spectrophotometer (Shimadzu, Tokyo, Japan). Briefly, 10 g of sample was homogenized with 97.5 mL of distilled water (50 ◦C), then 2 mL of HCl was added and distilled at 125 ◦C. After approximately 45 ml of distillate was obtained, 5 ml of distillate was kept in a hot water bath (90 ◦C) with 5 ml of TBARS reagent for 35 min. The tubes were then cooled in a cold water bath. The absorbance of the supernatant was recorded at 530 nm. The TBARS number was then computed as mg malonaldehyde/kg sample by multiplying the absorption readings by the coefficient 7.03.

2.5. Color Properties of Chicken Patties

A colorimeter (Konica, Minolta CR 400, Osaka, Japan) with illuminant D65, 2◦ observer angle, diffuse/O mode, 8 mm aperture for illumination, and 8 mm for measurement was used to quantify the samples' *L** (lightness), *a** (redness), and *b** (yellowness) parameters. The mean values (*L**, *a**, and *b**) of each sample were analyzed after color measurements were taken at four distinct sites per sample, all perpendicular to the sample surface (Babaoğlu et al., 2022).

2.6. Statistical Analysis

In a completely randomized factorial design with two independent replications, four treatments (C, CP1, CP2, and CP3) and three storage durations (1, 2, and 6 days) were used. The generalized linear mixed model was used to do an analysis of variance (ANOVA) for the statistical analysis of the pH, TBARS, and color data. Replication was regarded as a random element, whereas the chili powder treatment, storage duration, and interaction were fixed components. To ascertain the differences between the means at a 5% significant level, Tukey Multiple Comparison Tests were employed in conjunction with the chili powder treatment, storage duration, and the interaction between the storage duration and the chili powder treatment.

3. Results and Discussion

3.1. Total Phenolic Content, Total Flavonoid Content and Antioxidant Activity

In Table 2, the DPPH (%), TFC (mg CE/100 mL), and TPC (mg GAE/100 mL) results of different chili varieties are summarized. The DPPH values of the samples range from 66.78 to 69.14%, with no significant statistical difference observed in terms of antioxidant activity ($P > 0.05$). In terms of total phenolic content, both Bird's eye chili and jalapeno are similar ($P > 0.05$), but have higher TPC values compared to Mexican chili ($P < 0.05$). When evaluated for total flavonoid content, the highest flavonoid content was found in jalapeno (32.95 mg CE/100 mL), while the lowest was observed in Mexican chili (22.35 mg CE/100 mL) ($P < 0.05$).

It is reported that capsaicin and capsaicinoids compounds contained in *Capsicum annuum* peppers have important effects on antioxidant, anti-obesity and other nutritional benefits. In particular, it has been reported that these compounds show anti-obesity effects through mechanisms such as inhibiting lipid oxidation, inhibiting the differentiation of adipocytes and increasing thermogenesis (Martínez et al., 2006). Since Jalapeño and Mexican chili are also included in *Capsicum annuum* species, it is likely that these peppers have similar antioxidant and anti-obesity effects. However, further research on the specific properties and effects of these species is needed.

In a study, the antioxidant activities and bioactive compounds of five different jalapeno pepper varieties (Grande, El Dorido, Red, Yellow, and Orange) were evaluated. The antioxidant capacity was measured using the DPPH radical scavenging assay, with Grande (87%) and El Dorido (83%) showing the highest DPPH radical scavenging activities. Additionally, these two varieties exhibited high reducing power and

total phenolic content, reaching levels comparable to BHT. As a result, it was reported that the antioxidant activities of jalapeno peppers are related to the presence of phenolic compounds and other bioactive compounds (flavonoids and vitamins) and these peppers may offer potential health benefits. The study also highlights that there is variability in antioxidant activity among different jalapeno pepper varieties, and their composition should be considered in agricultural production and consumption (Farhoudi et al., 2019).

Table 2. The antioxidant activity (DPPH), total phenolic (TPC) and total flavonoid (TFC) contents of *chili varieties*

Analysis	***Bird's eye chili***	***Jalapeño***	***Mexican chili***
DPPH (%)	66.78±1.19[a]	69.14±1.67[a]	67.28±0.48[a]
TFC (mg CE/100 mL)	25.27±0.46[b]	32.95±0.72[a]	22.35±0.26[c]
TPC (mg GAE/100 mL)	197.06±0.00[a]	192.58±2.17[a]	182.48±1.56[b]

Mean±standard dev. Within the same row values with different superscript letters indicate significant differences ($P < 0.05$) DPPH: The 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl. TPC: Total phenolic content, TFC: Total flavonoid content

3.2. pH

Table 3 illustrates the pH values of chicken patties during 6 days at 4^0C. On days 1 and 2, the addition of chili powder resulted in a significant reduction in pH levels compared to the control group ($P < 0.05$). On day 1, the highest pH value was observed in the control group (5,22), whereas the lowest values were recorded in treatments CP2 (5.15) and CP3 (5.14) ($P < 0.05$). On day 2, although the control group again exhibited the highest pH value (5.27) ($P < 0.05$), no statistically significant differences ($P > 0.05$) were found among the treatment groups, with pH values ranging between 5.17 and 5.21. On the last day, the highest pH value was measured in CP2 (5.15) and the lowest in the control group (4.94) ($P < 0.05$). While the addition of Jalapeño maintained the pH stability of the chicken patty samples throughout storage, the samples prepared with the addition of Bird's eye chili exhibited higher pH values on days 1 and 2 compared to the final day of the study ($P < 0.05$). Fluctuations in pH levels were observed in both the control group and the CP3 treatment group. The observed fluctuations in pH values during storage can be attributed to multiple factors. Primarily, the metabolic activity of residual microorganisms and enzymatic reactions during storage may lead to the production of acidic or basic compounds, thereby altering the pH. Additionally, the incorporation of different chili varieties could have contributed to these variations due to their distinct phytochemical compositions, including organic acids and phenolic compounds, which can influence the acidity or alkalinity of the chicken patty matrix. The interaction between chili seed components and the meat matrix may also affect buffering capacity, further impacting pH stability during storage. These factors collectively explain the statistically significant differences observed across samples.

In one study, pork sausage samples containing red sweet pepper or cayenne pepper (*Capsicum annuum*) (0.1%, 0.5%, or 2%) or black or white pepper (*Piper nigrum*) (0.1%, 0.5%, or 1%) were packaged in an atmosphere of 80% O_2 and 20% CO_2 and stored in the dark at 2 °C for 16 days. Based on pH

measurements conducted every four days, it was reported that the addition of chilli peppers had no significant effect on pH ($P > 0.05$). These findings are consistent with those observed in the group containing only jalapeño, suggesting that the differing acidic properties of various chilli pepper varieties may result in variable effects on pH (Martínez et al., 2006).

Table 3. The results of physicochemical analyses of chicken patty samples formulated with chili powders

Analyses	Groups	Storage day		
		1	2	6
pH	**C**	5.22 ± 0.01^{aB}	5.27 ± 0.00^{aA}	4.94 ± 0.01^{cC}
	CP1	5.17 ± 0.00^{bA}	5.21 ± 0.02^{bA}	5.10 ± 0.01^{abB}
	CP2	5.15 ± 0.01^{cA}	5.17 ± 0.01^{bA}	5.15 ± 0.02^{aA}
	CP3	5.14 ± 0.00^{cB}	5.19 ± 0.01^{bA}	5.08 ± 0.01^{bC}
L*	**C**	54.71 ± 0.77^{aA}	55.67 ± 0.19^{aA}	55.53 ± 0.29^{aA}
	CP1	47.72 ± 0.21^{bB}	48.63 ± 0.31^{bB}	55.53 ± 0.29^{aA}
	CP2	46.26 ± 0.31^{bcA}	46.73 ± 0.87^{bA}	45.02 ± 2.41^{bA}
	CP3	44.83 ± 0.00^{cA}	43.61 ± 0.14^{cA}	43.23 ± 1.28^{bA}
a*	**C**	8.05 ± 0.24^{cA}	7.66 ± 0.35^{cA}	7.84 ± 0.18^{cA}
	CP1	15.18 ± 0.24^{bA}	12.43 ± 0.32^{bB}	13.21 ± 0.11^{bB}
	CP2	1.59 ± 0.27^{dAB}	0.78 ± 0.14^{dB}	2.47 ± 0.48^{dA}
	CP3	22.66 ± 0.38^{aA}	21.92 ± 1.72^{aA}	23.94 ± 0.71^{aA}
b*	**C**	19.88 ± 0.71^{cA}	18.22 ± 0.55^{bA}	19.16 ± 0.07^{bA}
	CP1	31.44 ± 1.06^{bA}	30.02 ± 1.83^{aA}	29.81 ± 1.07^{aA}
	CP2	21.58 ± 0.07^{cA}	21.70 ± 1.08^{bA}	20.47 ± 0.62^{bA}
	CP3	36.21 ± 1.64^{aA}	29.43 ± 2.94^{aA}	33.42 ± 2.63^{aA}
	C	0.30 ± 0.01^{abC}	0.62 ± 0.07^{aB}	0.98 ± 0.02^{aA}
[1]TBARS number	**CP1**	0.30 ± 0.01^{abB}	0.49 ± 0.06^{abA}	0.62 ± 0.01^{bA}
	CP2	0.34 ± 0.04^{aB}	0.27 ± 0.02^{cB}	0.53 ± 0.01^{cA}
	CP3	0.22 ± 0.04^{bA}	0.35 ± 0.06^{bcA}	0.26 ± 0.01^{dA}

Mean ± standard error. Within the same row values with different uppercase superscript letters indicate significant differences ($P < 0.05$). Within the same column, values with different lowercase superscript letters indicate significant differences ($P < 0.05$). C: Control; CP1: Bird's eye chili powder added chicken patty; CP2; Jalapeño powder added chicken patty; CP3; Mexican chili powder added chicken patty. [1]: mg MA/kg sample.

3.3. TBARS Number

Table 3 presents the TBARS numbers of the chicken patty samples during 6 days at 4^0C. TBARS values on day 1 varied from 0.22 to 0.34 mg MA/kg sample, with the CP2 group exhibiting the highest value and the CP3 group the lowest ($P < 0.05$). On day 2, an increase in TBARS numbers was observed in the control and CP1 groups, likely due to oxidation ($P < 0.05$), while no statistically significant changes were detected in the samples containing Jalapeño and Mexican chili ($P > 0.05$).

On day 6, TBARS numbers further increased in the control and CP2 groups ($P < 0.05$), whereas no significant changes were recorded in the CP1 and CP3 groups compared to the previous analysis day ($P > 0.05$). The significant decrease in TBARS values observed in the chili powder–supplemented samples can be largely attributed to the presence of antioxidant phytochemicals such as phenolic acids and flavonoids. In the present study, the antioxidant activity of each chili variety was assessed through the DPPH radical scavenging assay, and both total phenolic and total flavonoid contents were determined. Among the tested varieties Jalapeno powder exhibited the highest antioxidant capacity (69.14% DPPH inhibition), as well as the highest levels of flavonoids (32.95 mg CE/100 ml). These compounds have been reported to prevent lipid oxidation by scavenging free radicals, donating hydrogen atoms, and

inhibiting pro-oxidant enzymes. Therefore, the inhibitory effect on lipid oxidation in the chili powders is likely due to these active constituents. Differences among the chili types in terms of their phytochemical composition may also explain the variability in lipid oxidation inhibition.

Overall, the TBARS numbers of the control group increased from 0.30 mg MA/kg sample on day 1 to 0.98 mg MA/kg sample by the end of the storage period ($P < 0.05$). However, the incorporation of different chili varieties in the formulation demonstrated a general protective effect against lipid oxidation. Among them, the use of Mexican chili (CP3) was found to be the most effective ($P < 0.05$), as it maintained stable TBARS numbers throughout the storage period without statistically significant changes. Similarly, Olorunsanya et al., (2009) investigated the effects of different *Capsicum species* (red hot pepper, bell pepper, tabasco, and habanero) on the oxidative stability of raw and cooked patties prepared from frozen pork. The authors reported that the addition of these pepper species significantly reduced lipid oxidation compared to both the control group and the group supplemented with α-tocopheryl acetate. Notably, red hot pepper exhibited the highest antioxidant activity, resulting in the lowest TBARS values among the treatments.

Our results were also found to be compatible with those of Menegali et al., (2020). In chicken burgers containing pink pepper, the addition of pink pepper extract significantly reduced lipid oxidation compared to both the control and BHT-added samples. It was reported that only the control group showed an increase in TBARS values during the storage period. Lipid free radicals can stay stable at low temperatures and may spread over greater distances, which aids in the advancement of oxidation, according to Kanner (1994). The necessity of using antioxidants is thus highlighted by the fact that keeping samples at refrigeration temperature (4^0C) is insufficient to considerably slow down the oxidative process. Kim (2020) indicates that the TBARS values, used to assess lipid oxidation, increased over time in control and formulated with pepper seed (*Capsicum annuum* L.). However, sausages containing pepper seed exhibited significantly lower TBARS values compared to the control group, indicating that pepper seed addition effectively retarded lipid oxidation. After 14 days, TBARS values were 0.38 μg MDA/mL for treatment group and 0.47 μg MDA/mL for control group. In conclusion, the results demonstrate that the incorporation of pepper seed contributes to the inhibition of lipid oxidation in chicken sausages.

In an another study evaluating the impact of *Capsicum annuum* (sweet red and hot cayenne) and *Piper nigrum* (black and white) pepper powders on the quality characteristics of chicken breast meat, polyphenolic and alkylamide compounds were extracted from the peppers. Treatment with the polyphenol fraction (PF, 6 mg/mL) led to a marked decrease in lipid oxidation, as evidenced by significantly lower TBARS values compared to both the control and other treatment groups (Ivane and Romeo, 2025).

3.4. Color Properties

The effects of incorporating various chili powders into the chicken patty formulation on the color parameters such as *L** (lightness), *a** (redness), and *b** (yellowness) of the samples are presented in Table 3. On days 1 and 2, all chili powder types resulted in darker-colored patties compared to the control group. The *L** values were highest in the control samples (54.71 and 55.67, respectively) and lowest in the CP3 samples (44.83 and 43.61, respectively) on days 1 and 2 ($P < 0.05$).

On day 6, the inclusion of Bird's eye chili in the formulation yielded patties with a color similar to that of the control group ($P > 0.05$) and brighter than those in the CP2 and CP3 groups ($P < 0.05$). While the *L** values of the control, CP2, and CP3 groups remained stable throughout the storage period, an increase was observed in the CP1 group on day 6 compared to earlier measurements ($P < 0.05$).

According to the Table 3, the CP3 group consistently exhibited the highest *a** values, while the CP2 group had the lowest *a** values across all analysis days ($P < 0.05$). This is likely attributed to the inherent redness of the chili varieties used in the formulations. While no significant changes in *a** values were observed in the control and CP3 groups during storage ($P > 0.05$), noticeable fluctuations occurred in the other treatment groups. The incorporation of Mexican chili contributed to the production of patties with a redder and more color-stable appearance throughout the storage period.

The lack of significant differences in color parameters (*L**, *a**, *b**) among the samples may be attributed to several factors. First, the concentration of chili powder (2.5%) used in the formulation may not have been sufficient to induce noticeable changes in color, especially considering it was incorporated by replacing an equivalent amount of breadcrumb. Moreover, the pigments in the chili powders—such as carotenoids or capsanthin—may not have been present in high enough quantities or may have had limited solubility and interaction within the meat matrix. The binding of pigments to muscle proteins and the relatively short diffusion distance in finely ground meat products could also limit their visual impact. Additionally, the natural color of chicken meat might have masked minor pigment contributions, leading to non-significant differences in instrumental color measurements.

The inclusion of Jalapeño powder in the formulation did not significantly affect the *b** values of the patties compared to the control group ($P > 0.05$) (Table 3). In contrast, higher *b** values were recorded in samples containing Bird's eye chili and Mexican chili ($P < 0.05$). No significant changes in *b** values were observed in any of the groups throughout the storage period ($P > 0.05$).

Martínez et al. (2006) packaged pork sausage samples containing red sweet pepper or cayenne pepper (*Capsicum annuum*) (0.1%, 0.5%, or 2%) or black or white pepper (*Piper nigrum*) (0.1%, 0.5%, and 1%) in an environment with 20% CO_2 and 80% O_2 and stored them at 2 °C in the dark for 16 days. The study reported that the incorporation of different pepper types into the sausage formulation did not significantly affect *L** and *b** values. However, red sweet pepper and hot cayenne pepper increased the *a** values of the sausages. Despite this, the addition of peppers was not effective in preventing discoloration during storage.

4. Conclusion

The present study demonstrated that the incorporation of chili powders—specifically Bird's eye chili, Jalapeño, and Mexican chili—into chicken patty formulations significantly influenced lipid oxidation, pH stability, and color characteristics during refrigerated storage. Among the tested varieties, Mexican chili was the most effective in limiting lipid oxidation, as evidenced by stable TBARS values throughout the 6-day storage period. Additionally, chili inclusion reduced pH values compared to the control, with Jalapeño maintaining pH stability over time. Color analysis revealed enhanced redness (*a**) in patties containing Mexican chili, supporting its role in improving both oxidative stability and visual quality. These findings highlight the potential of chili powders, particularly Mexican chili, as natural functional ingredients to improve the shelf life and quality attributes of poultry-based meat products. There is no data in the literature regarding the use of Bird's chili, jalapeno, or Mexican chili in chicken patties, and it is believed that the current study is significant in providing data in this area.

Conflicts of Interest

The authors declare no potential conflicts of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank Assoc. Prof. Kübra Ünal for her help in obtaining chili varieties.

Author Contributions

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

Compliance with ethics requirements

This manuscript does not contain any studies with human participants or animals performed by the author.

References

Akter R., Hossain M., Khan M., Rahman M., Azad M., Hashem M. Formulation of value added chicken meatballs by addition of Centella leaf (*Centella asiatica*) extracts. Meat Research 2022; 2(2): 1-7.

Alirezalu K., Pateiro M., Yaghoubi M., Alirezalu A., Peighambardoust SH., Lorenzo JM. Phytochemical constituents, advanced extraction technologies and techno-functional properties of selected Mediterranean plants for use in meat products. A comprehensive review. Trends in Food Science and Technology 2020; 100, 292-306.

Awodola-Peters O., Yahaya M., Oganija K., Adetoro B., Bolarinwa M., Saka A., Akinyemi A. Effect of dietary chili pepper (*Capiscum annum*) supplementation on carcass characteristics, proximate

composition and lipid profile of broiler chickens. Nigerian Journal of Animal Production 2021; 48(6): 209-216.

Babaoğlu AS., Unal K., Dilek NM., Poçan HB., Karakaya M. Antioxidant and antimicrobial effects of blackberry, black chokeberry, blueberry, and red currant pomace extracts on beef patties subject to refrigerated storage. Meat Science 2022; 187, 108765.

Baenas N., Belović M., Ilic N., Moreno DA., García-Viguera C. Industrial use of pepper (*Capsicum annum* L.) derived products: Technological benefits and biological advantages. Food Chemistry 2019; 274, 872-885.

Biplob M., Hossan M., Khatun H., Rahman M. Quality assessment of chicken meatball with different types of antioxidants in short-term preservation. Meat Research 2024; 4(6).

Chen G., Chen H. Extraction and deglycosylation of flavonoids from sumac fruits using steam explosion. Food Chemistry 2011; 126(4): 1934-1938.

Cetin-Babaoglu H., Aydın H., Kumas R., Arslan-Tontul S. Enhancing nutritional and functional properties of rice starch by modification with Matcha extract. Food Science and Nutrition 2024; 12(6): 4284-4291.

Devatkal SK., Thorat P., Manjunatha M. Effect of vacuum packaging and pomegranate peel extract on quality aspects of ground goat meat and nuggets. Journal of Food Science and Technology 2014; 51, 2685-2691.

Dilek NM., Gümrükçüoğlu A., Demirel G., Durmaz A., Torunoğlu EI., Aytar EC., Ünal K. Antioxidant and preservative effects of epilobium angustifolium extract in beef burgers products: Physicochemical properties, color stability, lipid oxidation, and molecular docking analyses. Food Science and Nutrition 2025; 13(4): e70125.

Domínguez R., Pateiro M., Gagaoua M., Barba FJ., Zhang W., Lorenzo JM. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. Antioxidants 2019; 8(10): 429.

Estévez M. Oxidative damage to poultry: from farm to fork. Poultry Science 2015; 94(6): 1368-1378.

Farhoudi R., Mehrnia MA., Lee DJ. Antioxidant activities and bioactive compounds of five Jalopeno peppers (*Capsicum annuum*) cultivars. Natural Product Research 2019; 33(6): 871-874.

Hailemariam A., Esatu W., Abegaz S., Urge M., Assefa G., Dessie T. Nutritional composition and sensory characteristics of breast meat from different chickens. Applied Food Research 2022; 2(2): 100233.

Hernández-Pérez T., Gómez-García MDR., Valverde ME., Paredes-López O. *Capsicum annuum* (hot pepper): An ancient Latin-American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 2020; 19(6): 2972-2993.

Huo W., Weng K., Gu T., Zhang Y., Zhang Y., Chen G., Xu Q. Effect of muscle fiber characteristics on meat quality in fast-and slow-growing ducks. Poultry Science 2021; 100(8): 101264.

Ivane NMA., Romeo F. Bioactive compounds in chili peppers: a study on chicken meat quality. International Journal of Food Science and Technology 2025; vvae081.

Ivane NMA., Wang W., Ma Q., Wang J., Liu Y., Haruna SA., Sun J. Retracted: The effect of different *Capsicum annuum* components on the quality and shelf-life of chicken breast meat. In: Elsevier 2024.

Jung S., Lee KH., Nam KC., Jeon HJ., Choe JH., Jo C. Quality assessment of the breast meat from WoorimatdagTM and broilers. Korean Journal for Food Science of Animal Resources 2014; 34(5): 709.

Kanner J. Oxidative processes in meat and meat products: quality implications. Meat Science 1994; 36(1-2): 169-189.

Karre L., Lopez K., Getty KJ. Natural antioxidants in meat and poultry products. Meat Science 2013; 94(2): 220-227.

Khanema P., Srisuwan A., Manasathien J. Effects of different plant parts and solvents on bioactive compounds and antioxidation in large fruit Bird's eye chili (*Capsicum annuum* L. cv. Superhot). Food Research 2024; 8(2): 209-218.

Kim YK. Quality Improvement of the chicken sausage with pepper seed (*Capsicum annuum* L.). Current Research in Nutrition and Food Science Journal 2020; 8(3): 829-836.

Lambooij E., Potgieter C., Britz C., Nortje G., Pieterse C. Effects of electrical and mechanical stunning methods on meat quality in ostriches. Meat Science 1999; 52(3): 331-337.

Lee SK., Mbwambo ZH., Chung H., Luyengi L., Gamez E., Mehta RG., Pezzuto JM. Evaluation of the antioxidant potential of natural products. Combinatorial Chemistry and High Throughput Screening 1998; 1(1): 35-46.

Liu Z., Cai S., Zhang S., Xiao Y., Devahastin S., Guo C., Yi J. A systematic review on fermented chili pepper products: Sensorial quality, health benefits, fermentation microbiomes, and metabolic pathways. Trends in Food Science and Technology 2023; 141: 104189.

Lorenzo JM., Pateiro M., Domínguez R., Barba FJ., Putnik P., Kovačević DB., Franco D. Berries extracts as natural antioxidants in meat products: A review. Food Research International 2018; 106, 1095-1104.

Martínez L., Cilla I., Antonio BJ., Roncalés P. Effect of *Capsicum annuum* (red sweet and cayenne) and *Piper nigrum* (black and white) pepper powders on the shelf life of fresh pork sausages packaged in modified atmosphere. Journal of Food Science 2006; 71(1): S48-S53.

Menegali BS., Selani MM., Saldaña E., Patinho I., Diniz JP., Melo PS., Contreras-Castillo CJ. Pink pepper extract as a natural antioxidant in chicken burger: Effects on oxidative stability and dynamic sensory profile using Temporal Dominance of Sensations. LWT 2020; 121, 108986.

Munekata PES., Rocchetti G., Pateiro M., Lucini L., Domínguez R., Lorenzo JM. Addition of plant extracts to meat and meat products to extend shelf-life and health-promoting attributes: An overview. Current Opinion in Food Science 2020; 31, 81-87.

Olorunsanya A., Olorunsanya E., Aliu O., Kayode R. Effects of different species of pepper (*Capsicum*) on oxidative stability of raw and cooked pork patties. Pakistan Journal of Nutrition 2009; 8(10): 1588-1591.

Pastsart U., Sresomjit F., Bochuai R., Pimpa O. Texture profile, water holding capacity, antioxidant activity and lipid oxidation of beef during retail display from cattle fed total mixed ration supplemented with *Capsicum frutescens* L. and *Curcuma longa* L. powders. Online Journal of Animal and Feed Research 2024; 14(1): 40-46.

Patriani P., Apsari NL. The effectiveness of curry leaves (*Murayya koenegii*) on the physical quality of chicken meatball. Paper presented at the E3S Web of Conferences 2021.

Sánchez Toledano BI., Camarena Gómez DMJ., López Santiago MA., Cuevas Reyes V. Consumer preferences of Jalapeño pepper in the mexican market. Horticulturae 2023; 9(6): 684.

Shahidi, F., Zhong, Y. Lipid oxidation and improving the oxidative stability. Chemical Society Reviews 2010; 39(11): 4067-4079.

Souza CS., Daood HG., Duah SA., Vinogradov S., Palotás G., Neményi A., Pék Z. Stability of carotenoids, carotenoid esters, tocopherols and capsaicinoids in new chili pepper hybrids during natural and thermal drying. LWT 2022; 163, 113520.

Tarladgis BG., Watts BM., Younathan MT., Dugan L. A distillation method for the quantitative determination of malonaldehyde in rancid foods. Journal of the American Oil Chemists Society 1960; 37, 44-48.

Verma AK., Pathak V., Singh VP., Umaraw P. Storage study of chicken meatballs incorporated with green cabbage (*Brassica olerecea*) at refrigeration temperature (4±1 C) under aerobic packaging. Journal of Applied Animal Research 2016; 44(1): 409-414.

Yoo KM., Lee KW., Park JB., Lee HJ., Hwang IK. Variation in major antioxidants and total antioxidant activity of Yuzu (*Citrus junos Sieb ex Tanaka*) during maturation and between cultivars. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2004; 52(19): 5907-5913.

Zhang J., Wang C., Wang J., Yang Y., Han K., Bakpa EP., Xie J. Comprehensive fruit quality assessment and identification of aroma-active compounds in green pepper (*Capsicum annuum* L.). Frontiers in Nutrition 2023; 9, 1027605.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1907-1925, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1907-1925, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Geri Dönüştürülmüş 3D Betonla Sürdürülebilir Kampüs Mobilyası Tasarımı

Tuğçe KALAYCI[1*], Alım Selin MUTDOĞAN[2]

[1]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mimarlık Tasarım Güzel Sanatlar Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, 80010, Osmaniye
[2]Hacettepe Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, 06800, Ankara

[1]https://orcid.org/0000-0003-4876-3974
[2]https://orcid.org/0000-0002-5845-123X
*Sorumlu yazar: tugcekalayci@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 20.02.2025
Kabul tarihi:26.06.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Geri dönüştürülmüş beton
3d beton
Sürdürülebilir tasarım
Kampüs mobilyası
İç mimarlık

ÖZ

Günümüzde tasarım eğitimi, yalnızca estetik ve işlevsellik değil; çevresel sürdürülebilirlik, yenilikçi üretim teknikleri ve malzeme farkındalığı gibi çok boyutlu yetkinlikleri de kapsayan bütüncül bir yaklaşıma dönüşmektedir. Bu bağlamda çalışma, iç mimarlık öğrencilerinin geri dönüştürülmüş 3D beton kullanarak sürdürülebilir kampüs mobilyaları tasarladıkları deneyim temelli bir eğitim sürecini ele almaktadır. Hacettepe Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü ile Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü iş birliğinde yürütülen projeye 36 öğrenci katılmıştır. Katılımcılardan, 3D beton baskı teknolojisini kullanarak çevre dostu, kullanıcı odaklı ve üretilebilir kampüs mobilyaları tasarlamaları beklenmiştir. Fonksiyonellik ve sürdürülebilirlik kriterleri doğrultusunda öne çıkan projeler, otobüs durağı yeniden tasarımı, bisiklet kullanıcıları için oturma modülleri, güneş enerjili birimler ve çok işlevli kentsel donatılar üzerine odaklanmıştır. Bulgular, geri dönüştürülmüş 3D betonun iç mimarlık eğitiminde hem teknik hem kavramsal kazanımları desteklediğini, disiplinler arası iş birliğini teşvik ettiğini ve sürdürülebilir tasarım anlayışını güçlendirdiğini göstermektedir.

Sustainable Campus Furniture Design with Recycled 3D Concrete

Research Article

Article History:
Received: 20.02.2025
Accepted: 26.06.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Recycled concrete
3d concrete
Sustainable design
Campus furniture
Interior Architecture

ABSTRACT

Design education today is transforming into a holistic approach that encompasses not only aesthetics and functionality but also multidimensional competences such as environmental sustainability, innovative production techniques and material awareness. This study addresses an experience-based educational process in which interior architecture students design sustainable campus furniture using recycled 3D concrete. The project was carried out in collaboration with Hacettepe University Faculty of Fine Arts, Department of Interior Architecture and Environmental Design and Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering. 36 students participated in the project. Participants were expected to design environmentally friendly, user-oriented and manufacturable campus furniture using 3D concrete printing technology. The projects that stood out in line with functionality and sustainability criteria focused on bus stop redesign, seating modules for bicycle users, solar-powered units and multifunctional urban equipment. The findings show that recycled 3D concrete supports both technical and conceptual gains in interior architecture education, encourages interdisciplinary collaboration and strengthens the understanding of sustainable design.

To Cite: Kalaycı T., Mutdogan AS. Geri Dönüştürülmüş 3D Betonla Sürdürülebilir Kampüs Mobilyası Tasarımı. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1907-1925.

1. Giriş

İklim değişikliği, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal düzeyde de etkileri giderek daha fazla hissedilen çok boyutlu bir mesele olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, yapı ve tasarım disiplinleri, söz konusu küresel soruna yönelik çözüm arayışlarında çevresel sürdürülebilirliği gözeten yaklaşımlara daha fazla yer vermektedir (Kobaş ve ark., 2011; Gökşen ve ark., 2017; Yüksel ve ark., 2019; Balçık ve ark., 2023). Kaynak tüketimi, atık yönetimi ve karbon salımı gibi faktörlerin yapı üretim süreçleriyle doğrudan ilişkili olması, alternatif malzeme kullanımı ve yenilikçi üretim tekniklerinin önemini artırmaktadır. Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş beton gibi çevresel etkisi azaltılmış malzemelerin ve 3D baskı gibi dijital üretim yöntemlerinin tasarım ve eğitim süreçlerine entegrasyonu, güncel araştırmalarda öne çıkan konular arasında yer almaktadır (Cohen, 2021; Özeren ve ark., 2023; Qurraie ve ark., 2024; Zhang, 2024). Küresel ölçekte karbon emisyonlarının azaltılması, bu hedeflere ulaşmada temel önceliklerden biridir ve bu emisyonların önemli bir bölümü, fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminden kaynaklanmaktadır. İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan geleneksel Portland çimentosu da bu soruna katkı sağlayan başlıca etmenlerden biridir; zira üretim süreci yüksek enerji tüketimiyle birlikte yoğun karbondioksit (CO_2) salımına yol açmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir yapı anlayışını destekleyen yeni nesil malzemelere olan ilgiyi ve gereksinimi her geçen gün artırmaktadır.

İnşaat sektörü, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları bakımından önemli bir etki alanına sahiptir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) 2009 tarihli "Bina ve İklim Değişikliği" başlıklı raporunda, küresel ölçekte binalardan kaynaklanan karbon salımının yıllık 86 milyar ton olduğu ve bu değerin 2030 yılına kadar artış göstereceği ifade edilmektedir. Aynı raporda, ABD'de inşaat sektörünün sera gazı emisyonları açısından üçüncü büyük kaynak olduğu belirtilmektedir. Türkiye ise hem inşaat sektöründeki gelişim eğilimi hem de coğrafi konumu itibarıyla iklim değişikliğinin potansiyel etkileriyle karşı karşıya olan ülkelerden biridir. UNEP'in "Akdeniz'de İklim Değişikliği" raporunda, Akdeniz Havzası'nın iklim değişikliğinden etkilenme düzeyinin küresel ortalamanın üzerinde olabileceğine dikkat çekilmektedir. Bu bağlamda, inşaat sektöründe çevresel etkileri azaltmaya yönelik stratejiler geliştirilmesi, bölgesel düzeyde de önem arz etmektedir.

Türkiye'de bu bölge içinde yer aldığından inşaat sektöründe acil önlemler alınması gereklidir. Bu anlamda Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de inşaat sektörünün sürdürülebilir olması için çeşitli uygulamalar hayata geçirilmeye başlanmıştır. İnşaat atıklarının azaltılması, inşaat malzemelerinde geri dönüştürülebilir veya geri dönüşümü yapılmış malzemelerin kullanılması, yapılarda pasif sistemler kullanılarak enerji ihtiyaç yükünün azaltılması, inşaat atıklarının yeniden kullanılması için çeşitli araştırmaların gerçekleştirilmesi gibi birçok farklı alanda araştırmalar yapılmaktadır (Stein ve ark., 1994; Öztürk, 2000; Huang ve ark., 2002; Samton, 2003; Kartam ve ark., 2005). Bu atıkların geri kazanımı ve tekrar kullanımı, çevresel ve ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Türkiye'de özellikle 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş ili Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde meydana gelen 7,8 Mw ve 7,5 Mw büyüklüklerindeki deprem felaketlerinin ardından ağır hasar alan veya yıkılan binalardan

oluşan bölgelerde 6303 Sayılı Kentsel Dönüşüm Yasası uyarınca bu mevcut yapıların yıkılması gerekmekte ve bu da büyük ölçüde inşaat yıkıntı atıklarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu yıkıntı alanları hem doğal çevreye zarar vermekte hem de baş edilemeyecek moloz döküm alanları yaratmaktadır. Araştırmalara göre 6 Şubat depreminden sonra sadece Maraş ve Hatay bölgelerinde oluşan moloz 138 milyon tondur. Bu inşaat atığı yeniden inşaatına başlanan bölgeler için doğal dengeyi bozacak bir tehdit unsuru olarak görülmektedir (Kaplan ve Soyluk, 2024).

İnşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesine yönelik ilk çalışmalar, İkinci Dünya Savaşı'nın ardından başlamıştır (Poon, 2007; Rao ve ark., 2007). İnşaat ve yıkıntı atıkları; başta beton olmak üzere kum, çakıl, tuğla, seramik, doğal taşlar, moloz, asfalt, ahşap, metal, cam, plastik, halı parçaları, yalıtım malzemeleri gibi birçok farklı bileşenden oluşabilir. Bunun yanı sıra, asbest ve kurşun gibi insan sağlığına zararlı bazı maddeleri de içerebilir (Öztürk, 2000; Samton, 2003; Rakshvir ve ark., 2006; Esin ve ark., 2007). Genel olarak, inşaat yıkıntı ve atıklarının yönetimi katı atık yönetimiyle benzer bir sistemle ele alınmaktadır. Süreç; atık miktarının azaltılması, kullanılabilir malzemelerin yeniden değerlendirilmesi, geri dönüştürülmesi ve kalan atıkların uygun alanlarda depolanması şeklinde ilerlemektedir. İnşaat yıkıntı atıklarıyla ilgili araştırmalarda öncelikli olarak atık miktarını en aza indirme gereği vurgulanmaktadır (Samton, 2003; Esin ve ark., 2007).

Geleneksel beton üretiminin çevresel etkilerini azaltma çabaları, geri dönüştürülmüş betonun kullanımını giderek daha önemli hale getirmiştir. İnşaat ve yıkıntı atıklarının değerlendirilmesiyle elde edilen geri dönüştürülmüş beton, sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında öne çıkarken, malzeme israfını en aza indirerek döngüsel ekonomiye katkı sağlamaktadır. Bu doğrultuda, son yıllarda inşaat sektöründe devrim yaratan 3D beton baskı teknolojisi hem malzeme kullanımında verimliliği artırmak hem de sürdürülebilir ve özelleştirilebilir yapılar üretmek amacıyla dikkat çekmektedir. Geri dönüştürülmüş beton bileşenlerinin 3D baskı süreçlerine entegrasyonu, gelecekte çevre dostu yapı sistemlerinin yaygınlaşmasını destekleyebilme potansiyeli taşımaktadır.

3D yazdırılan beton, bilgisayar kontrollü robotik sistemler aracılığıyla beton malzemenin katmanlar halinde sıralı olarak yerleştirilmesiyle üretilmektedir. Bu teknoloji, önceden hazırlanmış dijital tasarımları takip ederek 3D eklemeli üretim veya dijital imalat olarak adlandırılan süreci gerçekleştirme (Nilimaa,2023) ve inşaat sektöründe verimliliği artırma, özelleştirilmiş tasarımlar sunma ile çevresel sürdürülebilirliği destekleme gibi avantajlarıyla önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır.

Geleneksel beton döküm yöntemlerinden farklı olarak, 3D baskı sürecinde iskele veya kalıp desteğine ihtiyaç duyulmamaktadır. Beton, bilgisayar kontrollü sistemler aracılığıyla otomatik olarak katman katman yerleştirilerek inşa edilir. Bu yöntem; hızlı üretim, esneklik ve kalıp gerektirmemesi gibi avantajlar sunmaktadır (Wang ve ark., 2024). Ancak, kalıpsız üretim süreci, yüzeyin daha hızlı kurumasına ve buharlaşma oranının artmasına neden olabilir. Bu durum, 3D baskılı beton yapılarının kısıtlamalara tabi tutulduğunda büzülmeye ve çatlamaya karşı daha hassas hale gelmesine yol açmaktadır (Ma ve ark., 2024).

3D baskılı betonun öne çıkan özellikleri arasında yüksek geometrik esneklik, düşük işçilik maliyeti, hızlı inşaat süreci ve azaltılmış çevresel etkiler bulunmaktadır. Bununla birlikte, 3D baskılı betonların basınç dayanımı oldukça yüksek olup, genellikle basınca maruz kalan yapısal bileşenlerde tercih edilmektedir (Pen ve ark., 2023) Son yıllarda, 3D beton baskı teknolojisi mimari ve inşaat sektörlerinde yaygınlaşmaya başlamıştır. İlk olarak küçük ölçekli yapısal olmayan elemanlarla başlayan uygulamalar, zamanla ofis binaları, laboratuvarlar, yayalar için köprüler, konut yapıları ve hatta motorlu araç trafiğine uygun köprüler gibi daha büyük ölçekli projelere dönüşmüştür (Tay ve ark., 2017).



Şekil 1. Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü İleri Yapı Malzemeleri Araştırma Laboratuvarında 3D beton baskı görüntüleri (Yazarın kişisel arşivi, 2024).

Teknoloji desteği ile ölçek olarak büyüyen projelerde, yapıların yaşam döngüsü boyunca tanımladığı enerji verimliliği, malzeme kullanımı, atık yönetimi ve iklimle uyum gibi kriterlerin de dikkate alınması kaçınılmaz hâle gelmektedir. Geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri, özellikle beton gibi çevresel etkisi yüksek olanların yeniden kullanımı, bu süreçte hem doğal kaynakların korunmasına hem de döngüsel ekonomiye katkı sağlamaktadır (USGBC, 2023; Cemex Ventures, 2024). Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş betonun 3D baskı teknolojisiyle entegre edilmesi, sürdürülebilir yapı üretiminin teknik ve estetik boyutlarını bir araya getiren yenilikçi bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Bu yaklaşım yalnızca profesyonel uygulama düzeyinde değil, aynı zamanda tasarım eğitiminde de doğrudan karşılık bulmaktadır. Çünkü sürdürülebilirlik, mimarlık ve iç mimarlık disiplinleri açısından yalnızca çevresel kaygılarla sınırlı bir kavramsal çerçeve sunmamakta; aynı zamanda tasarımın ekonomik, sosyal ve kültürel boyutlarını da kapsayan bütüncül bir yaklaşım biçimi olarak değerlendirilmektedir. Bu anlamda sürdürülebilirlik ilkelerinin öğrenciler tarafından yalnızca kuramsal düzeyde kavranması yeterli olmamakta; bu ilkelerin tasarım sürecine entegrasyonunun uygulamalı ve deneyim temelli öğrenme yollarıyla desteklenmesi gerekmektedir. 3D baskı teknolojisinin tasarım eğitimine entegre edilmesi, öğrencilere dijital tasarımları üretilebilir gerçek nesnelere dönüştürme

imkânı sunmakta; böylece tasarımın teknik sınırlılıkları, malzeme davranışları ve üretim süreçleri hakkında doğrudan deneyim kazandırmaktadır.

Çalışma kapsamında paylaşılan teorik verileri uygulamaya geçirmek amaçlı ele alınan kent ve kampüs mobilyaları, mimari sürdürülebilirliğin somutlaştığı önemli tasarım ölçeklerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu tür yarı kamusal veya kamusal donatılar, yalnızca işlevsel ihtiyaçlara yanıt vermekle kalmayıp; kullanıcı konforunu artırma, sosyal etkileşimi destekleme ve çevresel farkındalık oluşturma gibi daha geniş bağlamsal işlevleri de yerine getirmektedir. Aynı zamanda bu mobilyalar, yerleştirildikleri fiziksel çevreyle ilişkili olarak kamusal mekânın kimliğini biçimlendirme potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle, kent ve kampüs mobilyası tasarımı yalnızca biçimsel estetik düzeyde değil; sürdürülebilirlik ilkeleri, malzeme seçimi ve üretim yöntemleriyle birlikte ele alınması gereken çok boyutlu bir tasarım alanı olarak öne çıkmaktadır.

Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı ve düşük atık üreten üretim tekniklerinin tercih edilmesi, söz konusu mobilya tasarımlarının sürdürülebilirlik ekseninde yeniden düşünülmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle yapı yıkıntılarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton gibi alternatif malzemeler, döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu olarak değerlendirilmekte ve karbon salımını azaltmaya yönelik somut katkılar sunmaktadır. Bu malzemelerin 3D beton baskı teknolojisiyle bir araya getirilmesi ise, üretim süreçlerinde verimliliği artırmakta; kalıpsız ve esnek üretim yapısıyla biçimsel çeşitliliği desteklemektedir. Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha az kaynak tüketen bu teknoloji hem ekonomik hem çevresel açıdan sürdürülebilir tasarım çözümlerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir.

Bu bağlamda, 3D beton baskı teknolojisi ile çalışan mühendislik, malzeme bilimi ve çevre tasarımı gibi disiplinlerle iş birliği, öğrencilerin tasarımlarını teknik ve çevresel kriterler doğrultusunda değerlendirmelerini sağlamaktadır. (Şensoy ve ark., 2015; Şekerci ve ark., 2023; Ümütlü ve ark.,2024). Bu çerçevede Hacettepe Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü ve Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü ile ortak bir çalışma yapılmıştır. İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı öğrencilerinin eğitim hayatı boyunca içinde bulundukları yapılı çevre ile daha derin bir bağ kurması, sürdürülebilirlik kavramlarına bütüncül bir yaklaşımla bakabilmeleri ve sorunlara çözüm üretme yeteneklerinin artırılması amacıyla bir proje geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında hem inşaat atığının nasıl geri dönüştürülebileceğine dair teknik bilginin peşine düşülmüş, hem de kampüs içinde var olan sorunlara çözümler getirilmesi amaçlanmıştır.

Araştırma Soruları

- 3D Beton teknolojisi ve geri dönüştürülmüş betonun tasarım sürecine etkileri nelerdir?
- 3D beton teknolojisi ve geri dönüştürülmüş betonun uygulanabilirliği ve sınırlılıkları nelerdir?
- Öğrencilerin kullanıcı odaklı tasarım anlayışı, kampüs mobilyası projelerinde daha fonksiyonel ve kullanıcı dostu çözümler geliştirmelerini sağlar mı?
- Kampüs mobilyası tasarımında 3D beton teknolojisi, geleneksel yöntemlere kıyasla ne tür yenilikçi ve esnek çözümler sunar?

- Disiplinler arası iş birliği, inşaat mühendisliği ile iç mimarlık eğitiminde öğrencilerin tasarım ve teknik bilgi becerilerini nasıl geliştirir?

2. Materyal ve Metot

2.1.Araştırmanın Tasarımı

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü ile Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü iş birliğinde, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü'nde 2023-2024 Bahar döneminde açılan İÇT 490 Sürdürülebilir Kent ve Mekân isimli seçmeli ders kapsamında yürütülen projeye dayanmaktadır. Proje, dönem boyunca (14 hafta) sürdürülen uygulamalı bir stüdyo çalışması olarak tasarlanmıştır. Dersi 3. ve 4. Sınıf düzeyindeki 36 öğrenci kendi isteğiyle seçmiştir. Çalışma kapsamında dersi seçen 36 öğrenci 6 adet gruba ayrılmıştır. Her grup öncelikle kavramsal araştırmalarını takiben bireysel tasarımlarını sunmuş daha sonra tasarım yaklaşımları yakın olan kişiler 2'li çalışma gruplarına ayrılmıştır. Bu metinde ders kapsamında tasarımı yapılan 4 adet projeye yer verilmiştir. Söz konusu çalışmalar tüm süreci doğru yönetmiş ve süreç içinde gelişim göstermişlerdir. Kapsam dışı bırakılan projelerde süreç doğru akışta ilerletilemediği için çalışmaya dahil edilmemiştir.

2.2. Veri Toplama Süreci

Bu araştırmanın veri toplama süreci, proje tabanlı bir ders kapsamında yürütülen gözlem, analiz ve uygulama temelli faaliyetleri içermektedir. Dersin amacı doğrultusunda hem kuramsal bilgilerin aktarılması hem de uygulamalı çalışmaların gerçekleştirilmesi hedeflenmiş; böylelikle öğrencilerin sürdürülebilirlik, kullanıcı ihtiyaçları ve üretim teknolojileri ekseninde tasarım geliştirmeleri teşvik edilmiştir.

İlk iki haftalık süreçte öğrencilere dersin genel çerçevesi tanıtılmış, öğrenme çıktıları ve proje hedefleri paylaşılmıştır. Bu kapsamda, **kamusal alan**, **kent mobilyası** ve **sürdürülebilir tasarım** gibi temel kavramlar teorik olarak işlenmiş; bu kavramların iç mekân tasarımı bağlamındaki yeri örneklerle tartışılmıştır. Öğrenciler, bu teorik zemine dayalı olarak bağlamsal, çevresel ve işlevsel tasarım hedefleri üzerine düşünmeye yönlendirilmiştir.

Üçüncü ve dördüncü haftalarda yürütülen alan çalışması ve analiz aşamasında, öğrencilerden Hacettepe Üniversitesi Beytepe Kampüsü'ndeki farklı mekânlarda doğrudan gözlemler yapmaları ve sürdürülebilirlik kriterleri çerçevesinde mevcut kent mobilyalarını incelemeleri istenmiştir. Bu bağlamda:

- Kampüs genelinde mevcut kentsel donatılar belgelenmiş,
- Sosyalleşmeyi teşvik eden, çoklu kullanım sunan, ders çalışma veya yemek yeme gibi işlevlere hizmet eden alanlar analiz edilmiştir,
- Güvenlik, erişilebilirlik ve kullanıcı çeşitliliği gibi etkenler değerlendirilmiş,
- Hayvan dostu tasarımlar gibi sosyal sürdürülebilirlik unsurlarına da dikkat edilmiştir.



Şekil 2. İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı öğrencilerinin ders kapsamında İleri Yapı Malzemeleri Araştırma Laboratuvarı ziyareti, (Yazarın kişisel arşivi, 2024).

Beşinci haftada gerçekleştirilen teknik gezi kapsamında, proje sürecinde kullanılacak 3D beton baskı teknolojisi hakkında öğrencilere Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü İleri Yapı Malzemeleri Araştırma Laboratuvarı'nda hem teorik hem de uygulamalı bilgi aktarımı sağlanmıştır. Bu ziyaret sırasında:

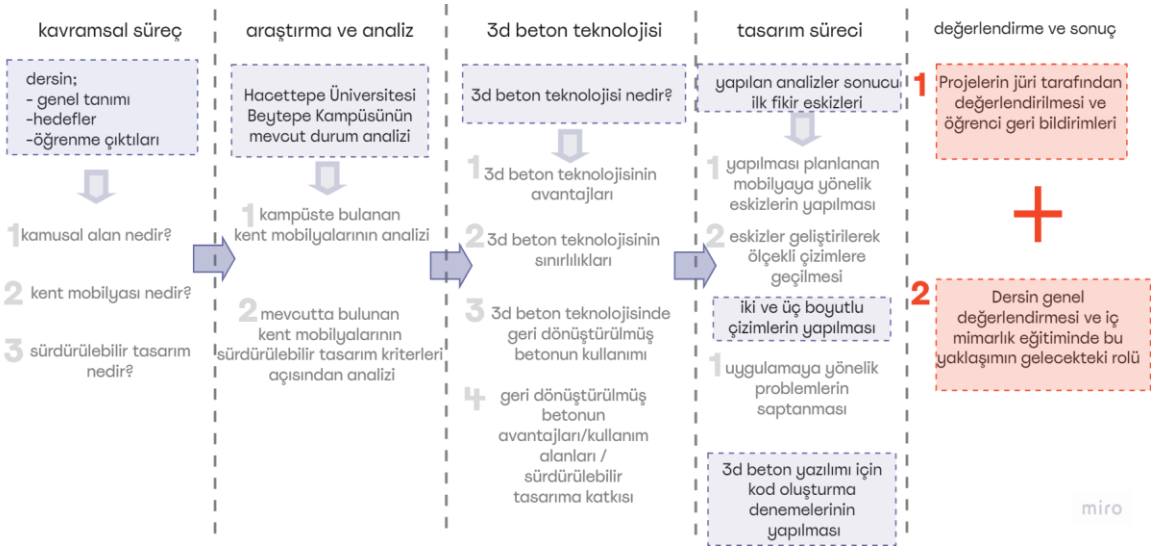
- 3D betonun üretim süreci, avantajları ve sınırlılıkları,
- Geri dönüştürülmüş betonun çevresel katkısı ve teknik özellikleri,
- Dijital üretime uygun tasarım ilkeleri,

öğrencilere detaylı biçimde sunulmuştur. Bu bilgiler, öğrencilerin proje sürecinde kullanacakları malzeme ve teknolojileri daha bilinçli bir şekilde entegre etmelerine olanak tanımıştır.

Altıncı haftadan itibaren başlayan sekiz haftalık tasarım sürecinde, öğrenciler ilk olarak kavramsal eskizler geliştirmiş, ardından bu tasarımları ölçekli teknik çizimlere ve üç boyutlu temsillere dönüştürmüştür. Dokuzuncu haftada gerçekleştirilen ara jüri sunumları, veri toplama sürecinin çıktılarının hem teknik hem tasarım olarak değerlendirildiği önemli bir aşamayı oluşturmuştur. Bu sunumlarda:

- Teknik yeterlilik,
- Özgünlük,
- Sürdürülebilirlik,
- Üretilebilirlik,
- Sunum kalitesi,

gibi kriterler doğrultusunda jüri üyelerinden geri bildirimler alınmıştır. Öğrenciler, bu geri bildirimleri dikkate alarak projelerini detaylandırmış ve uygulamaya yönelik çözümlemelerle son hâline getirmiştir. Böylece hem gözlem ve analizle başlayan veri toplama süreci hem de jüri temelli değerlendirme döngüsü tamamlanarak somut tasarım çıktıları elde edilmiştir.



Şekil 3. Ders işleyiş akışı, (Yazar tarafından oluşturulmuştur).

2.3. Veri Analizi Süreci

Veri setini; öğrenci projelerinin tasarım süreçleri, jüri sunumları, uygulama dosyaları ve jüri üyeleri tarafından yapılan değerlendirme puanları oluşturmuştur. Analiz süreci, öğrenci projelerinin teknik, işlev ve tasarım yönlerini ortaya koyacak şekilde yapılandırılmıştır.

Projeler, önceden belirlenmiş beş temel kriter doğrultusunda değerlendirilmiştir:

- **Fonksiyonellik ve Kullanıcı Odaklılık:** Tasarımların belirlenen kullanıcı profiline uygunluğu, ergonomik nitelikleri ve kullanım pratiklerine sağladığı katkılar incelenmiştir.
- **Yenilikçilik ve Tasarım Yaklaşımı:** 3D beton baskı teknolojisinin yaratıcı biçimde kullanımı, geleneksel çözümlerden farklılaşan yönler ve özgün tasarım anlayışı değerlendirilmiştir.
- **Sürdürülebilirlik ve Malzeme Kullanımı:** Geri dönüştürülmüş betonun çevresel etkiler ve döngüsel ekonomi bağlamındaki katkıları göz önünde bulundurulmuş, malzeme seçimi ve sürdürülebilirlik stratejileri analiz edilmiştir.
- **Teknik Uygunluk ve Üretilebilirlik:** Tasarımların teknik çizimlerle ifade edilebilirliği, üretim sürecine entegrasyon potansiyeli ve 3D baskı teknolojisine olan uygunluğu değerlendirilmiştir.
- **Sunum Kalitesi ve Açıklayıcılık:** Proje paftalarının, teknik açıklamaların ve sözlü sunumların anlaşılırlığı, tutarlılığı ve ifade gücü dikkate alınmıştır.

Değerlendirme süreci, her biri ilgili uzmanlık alanını temsil eden toplam dört jüri üyesi tarafından yürütülmüştür. Jüri; H.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden iki öğretim üyesi ile H.Ü. İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü'nden iki öğretim üyesinden oluşmaktadır. Bu disiplinler arası yapı sayesinde projeler hem teknik mühendislik kriterleri hem de tasarım odaklı estetik ve kullanıcı deneyimi açısından çok yönlü olarak değerlendirilmiştir.

Her jüri üyesi, projeleri bireysel olarak puanlamış; değerlendirme formlarında yer alan her kriter için 20 üzerinden puanlama yapılmıştır, beş kriter toplamında 100 tam puan elde edilmiştir. Elde edilen puanlar üzerinden aritmetik ortalamalar hesaplanmış ve projelerin genel başarı düzeyi belirlenmiştir. Bu yapılandırılmış değerlendirme sistemi, öğrencilerin projelerindeki güçlü ve gelişime açık yönlerin sistematik olarak analiz edilmesine olanak tanımıştır.

Veri analiz süreci sonucunda ulaşılan bulgular, sadece projelerin teknik ve kavramsal niteliklerini ortaya koymakla kalmamış; aynı zamanda proje tabanlı ve disiplinler arası öğrenme süreçlerinin iç mimarlık eğitimi bağlamındaki katkılarını da görünür kılmıştır.

3. Bulgular

Bu çalışma kapsamında, iç mimarlık öğrencileri tarafından geliştirilen kampüs mobilyası projeleri çok boyutlu bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Geri dönüştürülmüş beton kullanılarak 3D baskı teknolojisiyle üretilebilirlik ilkesi çerçevesinde geliştirilen tasarımlar, tasarımın fonksiyonelliği, yenilikçiliği, sürdürülebilirliği, teknik uygunluğu ve sunum kalitesi gibi kriterler üzerinden yapılandırılmış bir değerlendirme süreciyle analiz edilmiştir. Aşağıda yer alan değerlendirme ölçütleri, projelerin bütünsel niteliklerini ortaya koymak ve öğrenme hedefleriyle ne ölçüde örtüştüğünü belirlemek amacıyla oluşturulmuştur.

Fonksiyonellik ve kullanıcı odaklılık açısından, tasarımların hedeflenen kullanıcı kitlesine ne kadar uygun olduğu, ergonomi ve günlük kullanım pratikliği değerlendirilirken, kampüs yaşamına entegrasyonu da önemli bir faktör olarak ele alınmıştır. Yenilikçilik ve tasarım yaklaşımı çerçevesinde; projenin geleneksel yöntemlerden farklı, yaratıcı ve özgün çözümler sunup sunmadığına, 3D beton baskı teknolojisinin nasıl kullanıldığına ve projeye sağladığı avantajlara odaklanılmıştır. Sürdürülebilirlik ve malzeme kullanımı bağlamında; geri dönüştürülmüş beton ve çevre dostu malzemelerin projeye nasıl entegre edildiğini, çevresel etkilerin nasıl azaltıldığını ve döngüsel ekonomi ilkelerine ne kadar uygun olduğunu değerlendirilmiştir. Teknik uygunluk ve üretilebilirlik yaklaşımında; tasarımın ölçekli çizimleri ve teknik detaylarının yeterliliği, 3D beton baskı sürecine uygunluğu ve üretilebilirliğini göz önünde bulundurulmuştur. Son olarak, sunum kalitesi ve açıklayıcılık bağlamında, proje raporunun, teknik çizimlerin ve sunumun ne kadar anlaşılır olduğunu, tasarım sürecinin açıkça ifade edilip edilmediğini ve jüri değerlendirmesinde ne kadar etkili savunulduğunu analiz edilmiştir. Bu değerlendirme kriterleri, projelerin bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını sağlayarak hem akademik hem de uygulama odaklı bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır.

Proje1



Şekil 4. Proje1 tasarım paftası

Proje 1; Hacettepe Üniversitesi kampüsünde yer alan yurtların ve yemek alanlarının bulunduğu bölgede, kent mobilyası eksikliğini gidermeye yönelik bisiklet kullanıcılarına özel modüler yapılar ve oturma alanları tasarlanmıştır. Proje, kampüsün yurt bölgesini çalışma alanı olarak belirlemiş ve bu bölgeye özgü sorunları tespit ederek, bu sorunlara yönelik yenilikçi çözümler geliştirmeyi hedeflemiştir.

Tasarım sürecinde, kullanıcı odaklı bir yaklaşım esas alınmış, bu çerçevede bisiklet kullanıcılarının ihtiyaçları ve kampüs yaşamına dair dinamikler dikkatle analiz edilmiştir. Kullanıcıların konforu, güvenliği ve fonksiyonel ihtiyaçları göz önünde bulundurularak, modüler yapılar ve oturma alanları en uygun şekilde tasarlanmıştır. Bu odak, sadece fiziksel ihtiyaçları karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda kullanıcı deneyimini zenginleştirecek ergonomik çözümleri de içermektedir. Tasarımın 3d beton üretim teknolojisine de uyum sağlaması olumlu görülmektedir. Fakat tasarımların monoblok olması çeşitlenebilir olma ihtimalini kısıtlamaktadır. Tasarımın çıkış noktası olumlu bulunmakla birlikte projenin detaylarının yeterince ele alınmaması tasarımın ham halde kalmasına sebep olmuştur.

Tablo1. Proje 1 değerlendirme

Değerlendirme Kriterleri	**Değerlendirme**
Fonksiyonellik ve Kullanıcı Odaklılık	Bisiklet kullanıcılarının ihtiyaçları detaylı analiz edilerek çözümler üretilmiş, ancak ergonomi ve detaylı kullanım senaryoları tam olarak ele alınmamış.
Yenilikçilik ve Tasarım Yaklaşımı	3D beton teknolojisine uygunluk açısından olumlu olsa da, tasarım monoblok yapısı nedeniyle çeşitlenebilirliği sınırlıyor. Daha esnek bir modüler yapı geliştirilebilirdi.
Sürdürülebilirlik ve Malzeme Kullanımı	Geri dönüştürülmüş betonun entegrasyonu başarılı, ancak proje atık yönetimi ve çevresel etki konusunda daha fazla veri içerebilir.
Teknik Uygunluk ve Üretilebilirlik	3D beton üretim sürecine uygun olsa da, tasarımın monoblok yapısı üretim sürecini zorlaştırabilir. Daha fazla detaylandırma gerekebilir.
Sunum Kalitesi ve Açıklayıcılık	Proje süreci iyi anlatılmış ancak teknik detaylar ve ölçekli çizimlerin yetersizliği sürecin eksik kalmasına sebep olmuş.

Proje 2



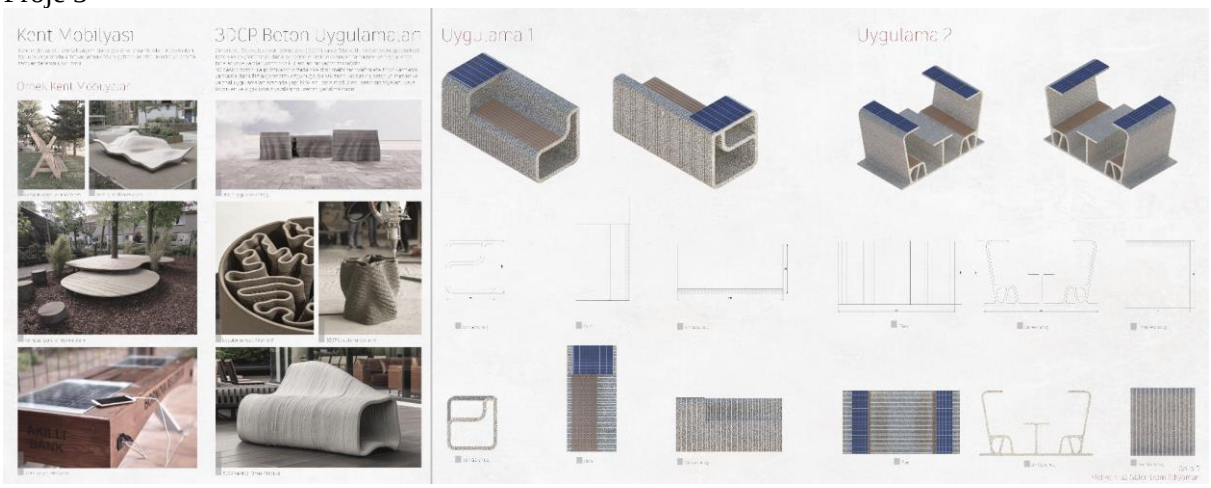
Şekil 5. Proje 2 tasarım paftası

Proje 2; kampüs içerisindeki otobüs duraklarının yeniden ele alınarak, kullanıcı odaklı ve çağdaş bir yaklaşımla enerji etkin bir durak tasarımına dönüştürülmesini hedeflemektedir. Bu proje, sürdürülebilirlik, estetik ve işlevsellik ilkeleri doğrultusunda şekillendirilmiş olup hem kullanıcı deneyimini iyileştirmek hem de kampüsün genel görünümüne katkı sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Projede kullanıcıların otobüs beklerken rahat edebileceği, güvenli ve korunaklı bir alan sunmayı amaçlamaktadır. Tasarımda oturma alanlarının ergonomisine özel bir önem verilmiştir; böylece kullanıcıların uzun süre rahatça oturabilmeleri sağlanmıştır. Ayrıca, durağın güneş ve yağmur gibi hava koşullarına karşı koruma sağlayan üst yapısı, kullanıcıların konforunu artırmayı hedeflemektedir. Bu fonksiyonel özellikler, durağın kullanıcı dostu olmasını sağlayarak, günlük kullanımda pratik ve konforlu bir deneyim sunmaktadır. Ayrıca, tasarımın mimari karakteri, durağın hem işlevsel hem de görsel açıdan kampüsün mimari kimliğine bir katkı sağlamaktadır. Projede kullanılan 3D beton üretim teknolojisi, tasarım sürecine önemli bir yenilikçi boyut kazandırmıştır. Bu ileri teknoloji, durağın karmaşık geometrik formlarının ve detaylarının oluşturulmasında etkili bir şekilde entegre edilmiştir. 3D beton teknolojisinin sağladığı esneklik ve yüksek hassasiyet, tasarımın estetik ve işlevsel unsurlarının uyum içerisinde bir araya getirilmesine olanak tanımıştır. Özellikle, durağın modern ve özgün formu, bu teknoloji aracılığıyla somutlaştırılmış olup, geleneksel yapı tekniklerine kıyasla daha çağdaş bir yorum getirmiştir. Bu bağlamda, 3D beton teknolojisi, projenin yenilikçi karakterini vurgulayan temel bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Projenin en dikkat çekici özelliklerinden biri de modüler tasarım yaklaşımıdır. Bu modüler yapı, durağın farklı ölçü ve modüllerle bir araya getirilmesine olanak tanımaktadır. Bu esneklik, projenin farklı kampüs alanlarına ve ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilmesini sağlamaktadır. Modüler tasarım sayesinde, durağın farklı versiyonları oluşturulabilmekte ve çeşitli alanlara uygun hale getirilebilmektedir. Bu, projenin ölçeklenebilirliğini artırarak, farklı mekanlara uyarlanabilmesini sağlamaktadır. Tasarım süreci boyunca, mimari proje detaylandırılmış ve üretime yönelik çizimler detaylı bir şekilde hazırlanmıştır. Ölçekli çizimlerin ve detaylandırmaların yapılması, durağın üretim aşamasında hatasız bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır. Her bir modülün, üretim teknolojilerine uygun olarak tasarlanması, projenin hayata geçirilmesi sırasında karşılaşılabilecek zorlukları minimize etmeyi amaçlamaktadır.

Tablo 2. Proje2 değerlendirme

Değerlendirme Kriterleri	**Değerlendirme**
Fonksiyonellik ve Kullanıcı Odaklılık	Kullanıcı konforu ön planda tutularak ergonomik oturma alanları tasarlanmış, ancak durağın güvenlik ve aydınlatma gibi unsurları daha fazla ele alınabilirdi.
Yenilikçilik ve Tasarım Yaklaşımı	3D beton baskı teknolojisi etkili bir şekilde kullanılmış, modüler yapı yaklaşımı projeye uyarlanabilirlik kazandırmış.
Sürdürülebilirlik ve Malzeme Kullanımı	Geri dönüştürülmüş beton ile sürdürülebilir malzeme kullanımı desteklenmiş, ancak malzeme seçiminde enerji verimliliği daha fazla vurgulanabilir.
Teknik Uygunluk ve Üretilebilirlik	3D baskı süreciyle uyumlu tasarım geliştirilmiş, ancak montaj süreci ve üretim aşamaları daha detaylı ele alınmalı.
Sunum Kalitesi ve Açıklayıcılık	Proje detayları ve ölçekli çizimler açık ve anlaşılır, iyi bir sunum hazırlanmış.

Proje 3



Şekil 6. Proje 3 tasarım paftası

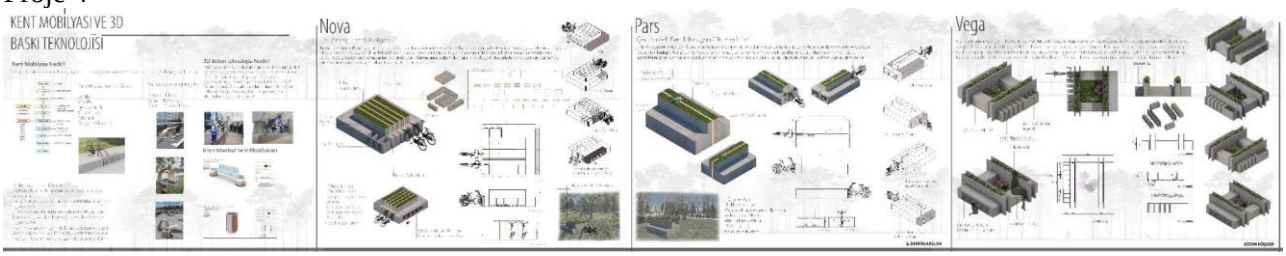
Proje 3; kent mobilyası eksikliklerini gidermek ve kullanıcıların hem dinlenme hem de enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanmış, yenilikçi bir kent mobilyası çözümüdür. Proje kapsamında, öğrencilerin dinlenme sırasında güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren paneller aracılığıyla elektronik cihazlarını (telefon, tablet, laptop vb.) şarj edebilecekleri bir oturma modülü tasarlanmıştır. Bu oturma birimleri, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek, çevresel sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sunmaktadır. Güneş panelleriyle donatılmış yapılar, enerji verimliliği sağlamanın yanı sıra, kampüs kullanıcılarına çevreye duyarlı bir yaşam tarzı benimseme imkânı tanımaktadır. Ayrıca, tasarım sürecinde farklı alternatiflerin çalışılması ve çeşitlendirilmesi, projenin adaptasyon kapasitesini artırmakta ve farklı kullanım senaryolarına uyum sağlama esnekliği sunmaktadır. Bununla birlikte, tasarımın yekpare yapısı, modülerlik açısından bazı sınırlamalar getirmektedir. Yekpare yapı, bir yandan dayanıklılık ve estetik açıdan avantaj sağlarken, diğer yandan modüler bir yapının sağladığı esnekliğin önüne geçebilmektedir. Proje, 3D beton üretim teknolojisiyle

uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde, 3D beton üretim tekniklerinin gerektirdiği teknik ve yapısal özellikler dikkate alınmış ve bu doğrultuda uygun çözümler geliştirilmiştir. 3D beton teknolojisinin sağladığı hassasiyet ve esneklik, tasarımın hem estetik hem de işlevsel unsurlarını başarıyla bir araya getirmiştir. Tasarıma ait uygulama çizimlerinin detaylandırılmış olması, projenin üretilebilirliğini destekleyen önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Proje, kampüs içerisinde hem dinlenme hem de enerji ihtiyaçlarını karşılayan, aynı zamanda çevre dostu bir çözüm sunmaktadır.

Tablo 3. Proje 3 değerlendirme

Değerlendirme Kriterleri	**Değerlendirme**
Fonksiyonellik ve Kullanıcı Odaklılık	Kullanıcı ihtiyaçlarını doğrudan karşılayan bir tasarım geliştirilmiş, elektronik cihazların şarj edilebilmesi yenilikçi bir özellik olmuş.
Yenilikçilik ve Tasarım Yaklaşımı	Sürdürülebilir enerji kullanımını teşvik eden bir yaklaşıma sahip, ancak tasarımın modüler olmaması esneklik açısından bazı sınırlamalar getirmiş.
Sürdürülebilirlik ve Malzeme Kullanımı	Enerji verimliliği açısından önemli bir katkı sunuyor, geri dönüştürülmüş malzemeler etkili kullanılmış.
Teknik Uygunluk ve Üretilebilirlik	3D beton teknolojisine uygun tasarım yapılmış ancak yekpare yapının üretim sürecinde zorluklar oluşturabileceği gözlemlenmiş.
Sunum Kalitesi ve Açıklayıcılık	Açıklayıcı paftalar hazırlanmış ancak üretim sürecinin aşamaları daha detaylı anlatılabilirdi.

Proje 4



Şekil 7. Proje 4 Tasarım paftası

Proje 4; kampüs içerisinde merkezi yerlerde konumlandırılmak üzere tasarlanmıştır. Birçok işlevi içerisinde barındıran bir kent mobilyasıdır. Oturma, atık toplama ve bisiklet park etme fonksiyonlarının yanı sıra diğer projelerde kullanılmayan peyzaj tasarımına da bu projede yer verilmiştir. Tasarımın modüler yapısı, farklı alanlar için esnek çözümler sunarak, çeşitli kullanım senaryolarına uyum sağlayabilmektedir. Örneğin, bisiklet kullanımının mümkün olmadığı yerlerde, tasarım yalnızca oturma fonksiyonunu yerine getirecek şekilde adapte edilebilmektedir. Projenin modüler olması, tasarımın konumlandırılacağı mekâna göre farklı boyut ve kombinasyonlarda uygulanabilmesine olanak tanımaktadır. Bu, projenin kampüs genelinde çeşitli alanlara uyarlanabilirliğini artırmaktadır. Bununla birlikte, 3D beton teknolojisi ile uyumlu olarak tasarlanmış olmasına rağmen, büyük monoblok parçalardan oluşması, taşıma ve montaj sürecinde potansiyel kırılma ve hasar risklerini beraberinde getirebilmektedir. Bu durum, tasarımın yeniden gözden geçirilmesi ve hafifletilmesi amacıyla bazı

denemelerin yapılmasını gerekli kılabilir. Önerilen bu denemeler, tasarımın yapısal dayanıklılığını artırarak, taşınabilirlik ve montaj kolaylığı açısından optimize edilmesine katkı sağlayabilir. Tasarıma ait uygulama çizimlerinin detaylandırılmış olması, projenin üretilebilirliğini destekleyen önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Projenin yalnızca bir kent mobilyası olarak değil, aynı zamanda kampüs içerisindeki sosyal ve fiziksel çevreyi zenginleştiren bir peyzaj öğesi olarak da değerlendirildiği söylenebilmektedir.

Tablo 4. Proje değerlendirme

Değerlendirme Kriterleri	**Değerlendirme**
Fonksiyonellik ve Kullanıcı Odaklılık	Çok fonksiyonlu yapısı sayesinde geniş bir kullanıcı kitlesine hitap ediyor. Ancak, bazı bölümlerin işlevselliği daha detaylı analiz edilmeli.
Yenilikçilik ve Tasarım Yaklaşımı	Farklı işlevleri bir arada sunan modüler bir sistem tasarlanmış, ancak taşınabilirlik ve montaj açısından bazı kısıtlar var.
Sürdürülebilirlik ve Malzeme Kullanımı	3D beton ve geri dönüştürülmüş malzemeler etkin şekilde kullanılmış, ancak üretim sırasında malzeme tüketimi daha verimli hale getirilebilir.
Teknik Uygunluk ve Üretilebilirlik	Modüler tasarım avantajlı olsa da, montaj ve taşıma süreçleri için yapısal iyileştirmeler gerekli.
Sunum Kalitesi ve Açıklayıcılık	Proje sunumu detaylı hazırlanmış, uygulama sürecini net bir şekilde ortaya koyuyor.

4.Tartışma

Bu çalışma, iç mimarlık eğitiminde sürdürülebilirlik odaklı malzeme kullanımı ve yenilikçi üretim teknolojilerinin eğitime katkılarını değerlendirmek amacıyla yürütülmüş; özellikle 3D beton baskı ile geliştirilen kampüs mobilyaları üzerinden öğrenci kazanımları ve disiplinler arası öğrenme biçimleri irdelenmiştir. Elde edilen bulgular, sürdürülebilirlik bilincinin geliştirilmesi, teknik üretim sürecine aktif katılım, kullanıcı odaklı düşünme becerisinin kazandırılması ve yerel bağlama duyarlı tasarımlar oluşturulması gibi çok katmanlı eğitsel çıktılarla hem teorik hem de uygulamalı düzeyde önemli kazanımlar sağlandığını göstermektedir.

Literatürde sürdürülebilir kent mobilyası tasarımı üzerine birçok örnek bulunmakla birlikte, bu örneklerin önemli bir kısmı yalnızca çevresel etkiler veya estetik kaygılar üzerinden değerlendirme yapmaktadır (Şatır, 2015; Kahveci ve ark., 2020; Kılıç ve ark., 2021; İmert, 2023; Şatıroğlu ve ark., 2023; Şerifzade ve ark., 2023). Ancak yapılan bu çalışmada, sürdürülebilirlik yalnızca malzeme tercihleriyle sınırlı kalmamış; malzemenin geri dönüşüm potansiyeli, enerji verimliliği, yapısal dayanıklılığı ve yerel bağlama uygunluğu gibi birçok ölçüt çok yönlü bir biçimde değerlendirilmiştir. Öğrencilerin bu kriterler doğrultusunda geliştirdikleri projelerde, malzeme seçimi ve tasarım kararlarının yalnızca görsel ya da biçimsel değil, çevresel ve toplumsal sorumluluk bilinciyle şekillendiği görülmektedir. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilirliği bütüncül bir eğitimsel stratejiye dönüştürme açısından literatürdeki örneklerden ayrılmaktadır.

Disiplinler arası iş birliği boyutu da çalışmanın dikkat çeken yönlerinden biridir. Literatürde, kampüs mobilyası tasarımına ilişkin çok sayıda çalışma olsa da (Karaca ve ark., 2020; Hergül, 2021; Güngör ve ark., 2023; Kulak Torun ve ark., 2024), çoğu örnekte disiplinler arası iş birlikleri genellikle sınırlı kalmakta veya yalnızca danışmanlık düzeyinde sürdürülmektedir. Bu çalışmada ise, inşaat mühendisliği bölümü öğretim elemanları sürece doğrudan entegre edilmiştir. Bu durum, iç mimarlık öğrencilerine yalnızca estetik veya kullanıcı odaklı değil, aynı zamanda malzeme bilimi, yapısal mantık ve üretim teknolojisi gibi alanlarda da düşünme becerisi kazandırmıştır. Bu bütüncül yaklaşım, Hergül'ün (2021) disiplinler arası öğrenme modeline yaptığı vurgu ile de örtüşmektedir.

Kampüs ölçeğinde kullanıcı odaklı çözümler geliştirme çabası, bu çalışmanın literatürdeki diğer örneklerden bir diğer önemli ayrışma noktasıdır. Şatıroğlu ve ark. (2023) ve Güngör ve ark. (2023) gibi çalışmalarda kampüs mobilyalarının genel kullanıcı ihtiyaçlarına yanıt verme kapasitesi analiz edilmiştir. Ancak bu çalışmalarda tasarımlar genellikle mevcut mobilyaların değerlendirilmesi veya kullanıcı memnuniyeti ekseninde kalmaktadır. Oysa bu çalışmada öğrenciler, kampüs bağlamında belirli bir kullanıcı grubuna (öğrenciler, akademik-idari personel) hitap edecek, kampüsün mevcut fiziksel altyapısı ve sosyal dinamikleriyle uyumlu tasarımlar geliştirmiştir. Böylece tasarımlar, yerel bağlamla güçlü bir ilişki kurarak özgünleşmiştir.

Son olarak, öğrenci katılımının sistematik biçimde yapılandırılmış olması sebebiyle diğer çalışmalardan farklılaşmaktadır. Kurdoğlu ve ark. (2018) gibi çalışmalarda öğrenci katkıları genellikle atölye ya da serbest tasarım etkinlikleri düzeyinde kalmakta, değerlendirme süreçleri ise çoğunlukla nitel gözleme dayanmaktadır. Bu çalışmada ise, öğrencilerin projeleri belirli ölçütler doğrultusunda akademik jüri tarafından puanlanmış, böylece sürecin hem şeffaf hem de akademik ölçütlere dayalı biçimde yürütülmesi sağlanmıştır. Bu yöntem, aynı zamanda öğrencilere eğitim sürecinde öz değerlendirme ve eleştirel bakış geliştirme imkânı sunmuştur.

5.Sonuç

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü'nde yürütülen bir ders kapsamında, iç mimarlık öğrencilerinin 3D beton baskı teknolojisi ve geri dönüştürülmüş beton kullanarak kampüs mobilyaları tasarlamalarını sağlamayı ve bu süreçte sürdürülebilir, yenilikçi, kullanıcı odaklı çözümler geliştirmelerini teşvik etmeyi amaçlamıştır.

Çalışma kapsamında yürütülen süreç, iç mimarlık eğitiminde uygulamalı, deneyime dayalı ve teknolojik üretim temelli bir öğrenme modelinin güçlü yönlerini açığa çıkarmıştır. Özellikle 3D beton baskı teknolojisinin öğrenme ortamına entegre edilmesi, öğrencilerin yalnızca dijital modelleme becerilerini değil; aynı zamanda üretim süreci, malzeme bilgisi ve çevresel etkiler üzerine eleştirel düşünme yetilerini de geliştirmelerine katkı sağlamıştır. Bu yöntem, eğitim sürecinde teori ile pratiği bütünleştirerek, öğrencilere gerçek dünya problemleriyle doğrudan temas kurma fırsatı sunmuştur. Ayrıca, üretim süreçlerinin laboratuvar ortamında gözlemlenmesi ve deneyimlenmesi, teknik altyapının öğrenci öğrenmesine doğrudan katkı sağladığını göstermiştir.

Bu bağlamda araştırmanın ilk iki sorusu olan *"3D beton teknolojisi ve geri dönüştürülmüş betonun tasarım sürecine etkileri ile bu teknolojilerin uygulanabilirliği ve sınırlılıkları nelerdir?"* soruları, proje sürecinde doğrudan yanıt bulmuştur. Malzemelerin çevresel sürdürülebilirlik açısından taşıdığı potansiyelin öğrencilerce fark edilmesi sağlanırken, teknik sınırlılıkların (donma süresi, akışkanlık, baskı hızı gibi) tasarım kararlarını nasıl etkilediği somut biçimde deneyimlenmiştir.

Üçüncü araştırma sorusu olan *"Öğrencilerin kullanıcı odaklı tasarım anlayışı, kampüs mobilyası projelerinde daha fonksiyonel çözümler geliştirmelerini sağlar mı?"* sorusu bağlamında elde edilen çıktılar, kullanıcı gereksinimlerine duyarlı, çok işlevli, kamusal alanı destekleyici çözümlerin geliştirildiğini göstermektedir. Kullanıcı kitlesi yalnızca öğrencilerle sınırlı kalmamış, akademik-idari personel ve kampüs içi canlılar gibi diğer gruplar da dikkate alınmıştır.

"Kampüs mobilyası tasarımında 3D beton teknolojisi, geleneksel yöntemlere kıyasla ne tür yenilikçi ve esnek çözümler sunar?" sorusuna yanıt olarak, öğrencilerin bu teknoloji sayesinde kalıpsız, form açısından özgün ve üretim açısından daha verimli çözümler geliştirdikleri gözlemlenmiştir. Malzeme israfını azaltan, üretim süresini kısaltan ve biçimsel çeşitliliğe olanak tanıyan bu yöntem, geleneksel üretim anlayışına alternatif bir öğrenme alanı oluşturmuştur.

Son olarak, *"Disiplinler arası iş birliği, iç mimarlık eğitiminde öğrencilerin tasarım ve teknik bilgi becerilerini nasıl geliştirir?"* sorusu, inşaat mühendisliği ile yürütülen ortak çalışmalarla karşılık bulmuştur. Malzeme davranışı, üretim tekniği ve yapısal çözümleme gibi mühendislik bilgileri, öğrencilerin tasarım sürecine çok yönlü bakabilmesini sağlamış ve disiplinler arası öğrenmenin katkısı açık biçimde deneyimlenmiştir.

Bu çalışmanın güçlü yönleri arasında; sürdürülebilirlik odaklı malzeme bilgisinin uygulanabilir üretimle birleşmesi, deneyim temelli bir öğrenme modelinin başarıyla yürütülmesi, teknik ve kavramsal bilgi alanlarının entegrasyonu ve disiplinler arası etkileşimin doğrudan projeye yansıtılması yer almaktadır. Ayrıca, öğrencilerin yalnızca tasarım yapmayı değil, aynı zamanda tasarımı üretimle ilişkilendirmeyi öğrenmeleri, teorik bilgilerin somut çıktılara dönüşmesini mümkün kılmıştır.

Bununla birlikte, çalışmanın sınırlılıkları arasında zaman kısıtı, 3D beton baskı altyapısının sınırlı erişilebilirliği ve bazı öğrenci gruplarının üretim deneyimi konusunda yaşadığı teknik yetersizlikler sayılabilir. Ayrıca, kullanıcı geri bildirimlerinin uzun dönemli olarak izlenememiş olması, tasarımların kalıcı etkilerine dair daha ileri düzey analizleri sınırlamıştır.

Genel olarak, bu araştırma; iç mimarlık eğitiminde teknolojik yeniliklerin, sürdürülebilir üretim pratiklerinin ve disiplinler arası iş birliklerinin entegre edilmesiyle, öğrencilerin yalnızca tasarım becerilerinde değil, çevresel, teknik ve sosyal farkındalık düzeylerinde de gelişim gösterdiğini ortaya koymuştur. 3D beton teknolojisi gibi çağdaş üretim yöntemlerinin eğitim ortamlarına aktarımı, geleneksel eğitim modellerinin ötesine geçen esnek, eleştirel ve yaratıcı düşünme odaklı yeni bir öğrenme alanı sunmaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, 3D beton baskı teknolojisi ve geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının iç mimarlık projelerinde farklı ölçek ve bağlamlarda nasıl uygulanabileceği daha derinlemesine

incelenebilir. Ayrıca, geliştirilen tasarımların uzun vadeli kullanıcı deneyimlerine etkisi, kullanım pratikleri ve çevresel sürdürülebilirlik performansı ölçülebilir verilerle değerlendirilebilir. Disiplinler arası iş birliğinin öğretim süreçlerine katkısı, diğer alanlarla kurulacak ilişkiler bağlamında genişletilebilir. Son olarak, dijital üretim teknolojilerinin iç mimarlık eğitimine entegrasyonuna yönelik yenilikçi öğretim stratejileri geliştirilerek, öğrenci performansını izleyen ve tasarım sürecini destekleyen esnek öğrenme modelleri oluşturulabilir.

Teşekkür

Prof. Dr. Mustafa Şahmaran ve Arş. Gör. Hüseyin Ilcan'ın İleri Yapı Malzemeleri Araştırma Laboratuvarı'ndaki değerli çalışmaları, bu araştırmanın temelini oluşturan bilimsel yaklaşımlara önemli katkılar sunmuştur. 3D baskılı çimentolu sistemler ve katmanlar arası mekanik bağ dayanımı konularındaki öncü araştırmaları (İlcan ve ark., 2022; 2024a; 2024b) bu çalışmanın teorik ve deneysel çerçevesini şekillendirmede büyük rol oynamıştır. Kendilerine, bu alandaki değerli katkıları ve bilim dünyasına sundukları rehberlik için 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

Balçık S., Yamaçlı R. Sürdürülebilir kalkınma sürecinde mimari tasarım eğitimi. Online Journal of Art and Design 2023; 215-232.

Cemex Ventures. Recycled concrete: Sustainable and Efficient Construction Material 2024; https://www.cemexventures.com/recycled-concrete/

Cohen Z. Recasting concrete: A case study in concrete 3D printing as an architectural pedagogy. ACSA 109th Annual Meeting: Expanding the View 2021; March: 192-199.

Esin T., Coşgun N. A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey. Building and Environment 2007; 42: 1667-1674.

Gökşen F., Güner C., Koçhan A. Sürdürülebilir kalkınma için ekolojik yapı tasarım kriterleri. Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi 2017; 3(1): 92-107.

Güngör K., Şatıroğlu E. A study on urban furniture in Rize Recep Tayyip Erdoğan University Zihni Derin Campus. Academic Socıal Resources Journal 2023; 3462-3470.

Hergül ÖC. Sürdürülebilir kampüs için kent mobilyası tasarımı: Bir Stüdyo Deneyimi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 374-380.

https://www.unep.org/unepmap/resources/factsheets/climate-change (Erişim 07.07.2024).

Huang WL., Lin DH., Chang NB., Lin KS. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. Resources, Conservation and Recycling 2002; 37: 23-37.

İlcan H., Külak AY., Şahmaran M. 3D-printable construction and demolition waste-based geopolymer: Investigating the effects of additives on engineering properties. Journal of Building Engineering 2024a; 87.

İlcan H., Özkılıç H., Tuğluca M., Şahmaran M. Interlayer mechanical performance of 3D-printed cementitious systems: A comprehensive study on operational and material parameters. Construction and Building Materials 2024b; 419.

İlcan H., Şahin O., Kul A., Yıldırım G., Şahmaran M. Rheological properties and compressive strength of construction and demolition waste-based geopolymer mortars for 3D printing. Construction and Building Materials 2022; 328.

İmert H. Sürdürülebilir kent mobilyası üretiminde robotik 3d Baskı: Şehrini Yazdır Projesi Örneği. FBU-DAE 2023; 22-34.

Kahveci H., Göker P. Kent mobilyaları tasarım dersi stüdyo çalışması; Üst örtü-oturma birimi ve piknik donatısı tasarımı. Bartın Orman Fakültesi Dergisi 2020; 693-707.

Kaplan E., Soyluk A. Deprem sonrası atık yönetimi: Atık betonun geri dönüşümü ve mimaride kullanımı için öneriler. Journal of Architectural Sciences and Applications 2024; 9(Special Issue): 140-162.

Kartam N., Al-Mutairi N., Al-Ghusain I., Al-Humoud J. Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. Waste Management 2004; 24: 1049-1059.

Karaca Ö., Bolkaner MK., İnançoğlu S., Asilsoy İ. Kent mobilyası üzerine bir çalışma: Yakın Doğu Üniversitesi Kampüsü. Yakın Mimarlık Dergisi 2020; 34-45.

Kılıç M., Sungurlu A. Sürdürülebilir kent mobilyaları. Online Journal of Art and Design 2021; 276-286.

Kobaş B., Bahadır Ö. Mimarlık müfredatında sürdürülebilirlik. Eko Yapı 2011; Mayıs-Haziran 44-51.

Kurdoğlu BÇ., Bayramoğlu E., Konakoğlu SSK. Kampüslerde yaya ve bisiklet yollarına uygun sürdürülebilir donatı tasarım kriterleri. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Dergisi 2018; 493-502.

Ma L., Jia Z., Chen Y., Jiang Y., Huet B., Delaplace A., Zhang Q. Water loss and shrinkage prediction in 3D printed concrete with varying w/c and specimen sizes. Cement and Concrete Composites 2024; 149: 105523.

Nilimaa J. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. Developments in the Built Environment 2023; 100177.

Özeren Ö., Özeren EB., Top SM., Qurraie BS. Learning-by-Doing using 3D printers: Digital fabrication studio experience in architectural education 2023; 1-6.

Pan Z., Si D., Tao J., Xiao J. Compressive behavior of 3D printed concrete with different printing paths and concrete ages. Case Studies in Construction Materials 2023; 18: e01949.

Poon CS. Management of construction and demolition waste. Waste Management 2007; 27: 159-160.

Qurraie BS., Özeren Ö., Özeren EB. The impact of 3D printing on architectural student design skills 2024; 1-5.

Rakshvir M., Barai SV. Studies on recycled aggregates-based concrete. Waste Management & Research 2006; 24: 225-233.

Rao A. Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete. Indian Institute of Technology Department of Civil Engineering Master's Thesis, Kanpur, India, 2005.

Rao A., Jha KN., Misra S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, Conservation and Recycling 2007; 50: 71-81.

Samton G. Construction and demolition waste manual. City of New York; 2003.

Şatır Ş. Sürdürülebilir kentsel mekânlar & Kent mobilyaları. Tasarım+ Kuram 2015; Mayıs; 1-18.

Şatıroğlu E., Dinçer D., Korgavuş B. Urban furniture in the context of sustainable materials. Kent Akademisi 2023; 566-576.

Şekerci C., Oral M. İç mimarlık eğitim müfredatının oluşturulmasında güncel yaklaşımlar. Sanat Yazıları 2023; 215-226.

Şensoy G., Yamaçlı R. Disiplinler arası bir içerik olarak mimarlık. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2015; 329-339.

Şerifzade T., Şahin BE. Kent mobilyası tasarımında sürdürülebilirlik: Bakü örneği. Online Journal of Art and Design 2023; 510-526.

Tay YWD., Panda B., Paul SC., Noor Mohamed NA., Tan MJ., Leong KF. 3D printing trends in building and construction industry: A review. Virtual and Physical Prototyping 2017; 12(3): 261-276.

Torun KF., Torun A. Urban furnıture for Atatürk University Campus: Design processes and evaluations. International Social Mentality And Researcher Thinkers Journal 2024; 731-742.

USGBC. Toward a Circular Economy in Building Materials. U.S. Green Building Council 2023; https://www.usgbc.org/articles/toward-circular-economy-building-materials.

Ümütlü ŞB., Onaran BS. On experience-oriented material learning in ınterior architecture education. Planarch- Design and Planning Research 2024; 250-259.

Von Stein EL., Savage GM. Current practices and applications in construction and demolition debris recycling. Resource Recycling 1994; 85-93.

Wang L., Wang F., Li R., Wang Q. Interfacial constitutive model of 3D printed fiber reinforced concrete composites and its experimental validation. Case Studies in Construction Materials 2024; 20: e02807.

Yüksel GCF., Seçer KF. Konut iç mekanına sürdürülebilir yaklaşımlar. Yakın Mimarlık Dergisi 2019; Nisan:27-39.

Zhang H. Investigating the use of 3D printing in fine arts education: A Case Study on Student Artistic Development 2024; 284-299.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1926-1940, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1926-1940, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

In Vitro Wound Healing and Antibiofilm Potential of β-Glucan and L-EPS Obtained from *Lactiplantibacillus plantarum* GD2

Mesut ABANUZOĞLU[1], Serap NIGDELIOGLU DOLANBAY[2*]

[1,2] Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara, Türkiye

[1]https://orcid.org/0009-0005-1416-4617
[2]https://orcid.org/0000-0002-1238-0894
*Corresponding author: serapdolanbay@gazi.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 10.03.2025
Accepted: 11.07.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Antibiofilm
β-glucan
Exopolysaccharide
Lactiplantibacillus plantarum GD2
Wound healing

ABSTRACT

This study aims to evaluate the *in vitro* wound healing and antibiofilm potential of commercial β-glucan and L-EPS derived from *Lactiplantibacillus plantarum* GD2. Biocompatibility, cell migration and biofilm formation inhibitory effects of biopolymers were investigated. Cytotoxicity was analyzed using the MTT assay on L929 mouse fibroblast and RAW264.7 mouse macrophage cell lines. Antibiofilm activity was assessed based on microbial colonization prevention, while wound healing potential was evaluated using the scratch test. The statistical significance of the results was tested. Both β-glucan and L-EPS were found to be biocompatible in individual and combined applications. Antibiofilm analyses revealed that these biopolymers can prevent microbial colonization, maintaining a sterile wound environment. Scratch test results demonstrated that they promoted cell migration and accelerated wound closure. The combination showed similar or enhanced effects compared to individual applications, suggesting synergistic properties. β-glucan and L-EPS derived from *L. plantarum* GD2 are promising biomaterials with wound healing acceleration and biofilm prevention properties. However, further *in vivo* and clinical studies are required to confirm their biomedical potential.

β-Glukan ve *Lactiplantibacillus plantarum* GD2'den Elde Edilen L-EPS'nin *İn Vitro* Yara İyileştirici ve Antibiyofilm Potansiyeli

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 10.03.2025
Kabul tarihi:11.07.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Antibiyofilm
β-glukan
Ekzopolisakkarit
Lactiplantibacillus plantarum GD2
Yara iyileşmesi

ÖZ

Bu çalışma, ticari β-glukan ve *Lactiplantibacillus plantarum* GD2'den elde edilen L-EPS'nin *in vitro* yara iyileşmesi ve antibiyofilm potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Biyopolimerlerin biyouyumluluk, hücre göçü ve biyofilm oluşumunu önleyici etkileri incelenmiştir. Sitotoksisite, L929 fare fibroblast ve RAW264.7 fare makrofaj hücre hatlarında MTT testi ile analiz edilmiştir. Antibiyofilm aktivitesi mikrobiyal kolonizasyonu önleme yeteneğiyle, yara iyileşme potansiyeli ise çizik testiyle değerlendirilmiştir. Sonuçların istatistiksel anlamlılığı test edilmiştir. Hem β-glukan hem de L-EPS, bireysel ve kombine uygulamalarda biyouyumlu bulunmuştur. Antibiyofilm analizleri, bu biyopolimerlerin mikrobiyal kolonizasyonu önleyerek steril yara ortamını koruyabileceğini ortaya koymuştur. Çizik testi, hücre göçünü teşvik ederek yara kapanmasını hızlandırdıklarını göstermiştir. Kombinasyon, bireysel uygulamalara kıyasla benzer veya daha güçlü bir etki göstermiş, bu da sinerjik etkilere bağlanmıştır. *L. plantarum GD2* kaynaklı β-glukan ve L-EPS, yara iyileşmesini hızlandırıcı ve biyofilm oluşumunu önleyici etkileriyle umut verici biyomalzemelerdir. Ancak, biyomedikal

uygulamalardaki potansiyellerini doğrulamak için ileri *in vivo* ve klinik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

To Cite: Abanuz M., Nigdelioglu Dolanbay S. In Vitro Wound Healing and Antibiofilm Potential of β-Glucan and L-EPS Obtained from Lactiplantibacillus plantarum GD2. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1926-1940.

1. Introduction

Our skin is the largest organ covering the entire body. Its most basic function is to prevent dehydration by providing insulation of the water-rich internal organs from the external environment (Swann, 2010). The skin also has the function of protecting internal tissues and organs from mechanical damage, microbial infections, ultraviolet radiation and various hot/cold environments. Since the skin acts as an external barrier that comes into contact with all kinds of external environments, it is the organ that is most exposed to injury (Rodrigues et al., 2019). The breakdown of this barrier through any effect, the disruption of tissue-organ integrity and the resulting loss of function are considered as ‘’wounds’’ (Koyutürk and Soyaslan, 2016). Wounds are classified as acute or chronic wounds according to the healing process. Acute wounds refer to situations where the normal wound healing processes that heal spontaneously are not interrupted and result in full healing; while chronic wounds refer to situations where the wound healing process does not continue or continues unhealthily at any stage of the wound healing process (Tottoli et al., 2020). Non-healing chronic wounds impose significant burdens on global health systems in terms of care costs (Olsson et al., 2019). Patients with diabetes, the elderly, and patients with genetic disorders such as sickle cell are prone to non-healing chronic wounds that lead to long-term tissue damage (Rodrigues et al., 2019; Goldberg and Diegelmann, 2020). There is a great demand for the development of innovative alternative wound dressings to traditional dressings to overcome the costs of care of non-healing chronic wounds (Dhivya et al., 2015; Costa et al., 2021). In studies conducted in line with this demand, many natural (bio) and synthetic polymers are used. The use of biopolymers as innovative wound dressings has a wide scope due to their properties such as biocompatibility, ability to support cell growth, regenerative potential, antibiofilm activity, biodegradability and durability (Dickinson and Gerecht, 2016; Hamdan et al., 2017; Sahana and Rekha, 2018). While the biopolymer β-glucan accelerates wound healing by increasing macrophage and fibroblast activity with its immunomodulatory properties (Muthuramalingam et al., 2019), exopolysaccharides (EPSs) contribute to tissue regeneration by promoting cell migration (Dilna et al., 2015; Majee et al., 2017; Tükenmez and Aslım, 2018; Laubach et al., 2021; Hamidi et al., 2023). In the literature, it has been stated that β-glucan-based innovative wound dressings support angiogenesis, reduce inflammation and show an infection-preventing effect (Choi et al., 2022). Similarly, EPS from *Lactiplantibacillus plantarum* EI6 has been reported to accelerate the epithelialization process by increasing fibroblast proliferation (Zaghloul and Ibrahim, 2022). These properties enable β-glucan and EPS-based biopolymers to be used as an innovative alternative in smart wound dressings, hydrogel-based dressings or biomaterial-supported wound healing applications.

Although it has been reported in the literature that these two different biopolymers are effective on wound healing processes separately, no study has been found in which these biopolymers are considered together. In particular, the mechanism of action of probiotic bacterial EPS on wound healing has not been fully elucidated. Therefore, the aim of this study was to reveal the mechanisms of action of commercially purchased β-glucan and EPS obtained from *Lactiplantibacillus plantarum* GD2 strain, which are microbial biopolymers, on wound healing, both alone and in combination.

2. Material and Methods

2.1. Bacterial strains used in the study

The bacterial strains used in the study are *Lactiplantibacillus plantarum* GD2 [The genus name of the *Lactobacillus* plantarum GD2 strain has been updated to *Lactiplantibacillus* plantarum GD2, taking into account the study by Zheng et al.,2020], *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) ATCC 43300, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 23893 and *Escherichia coli* ATCC 35218. The strains used belong to Gazi University, Faculty of Science, Department of Biology, Biotechnology Laboratory Culture Collection.

2.2. Development and preservation of bacterial strains used in the study

Biochemical and physiological analyses of *L. plantarum* GD2 strain, from which EPS used in the study was isolated, were carried out within the scope of theses and projects under the supervision of Prof. Dr. Belma ASLIM. In these studies, molecular analyses were performed based on the 16S rRNA gene region, which is the RNA subunit of the strain used, and its probiotic properties were revealed (Tükenmez and Aslım, 2018; Tukenmez et al., 2019; Sirin and Aslim, 2020; Sirin and Aslim, 2021).

The bacterial strain was developed by incubating it in MRS broth medium with 2% inoculations at 37°C for 18 hours and activating it twice. Before the studies, the gram staining of the bacterial strain and single colony cultivation on agar medium (1.5% agarose added to MRS broth) were performed and the work with pure bacteria was continued. After these stages, the bacterial culture was ready for experiments.

S. aureus ATCC 25923, *S. aureus* (MRSA) ATCC 43300, *P. aeruginosa* ATCC 23893 and *E. coli* ATCC 35218 bacterial strains were used in antibiofilm studies. Bacterial strains were activated twice by incubating them for 18 hours at 37°C with 2% inoculations in nutrient broth liquid medium. Before the study, gram staining of bacterial strains was performed and pure bacteria were continued to be studied. The bacterial strains used in the study were stored in cryovials at -30°C as 10% glycerol and 90% active bacterial culture (Tukenmez et al., 2019).

2.3. Cell lines used in the study

For *in vitro* cell experiments conducted within the scope of the study, L929 mouse fibroblast cell line (ATCC®, CCL-1™) and RAW264.7 mouse macrophage cell line (ATCC®TIB-71™) were used. Cells

were obtained from Gazi University, Faculty of Science, Department of Biology, Biotechnology Laboratory.

2.4. Development and preservation of cells

In the *in vitro* cell experiments conducted within the scope of the study, the L929 mouse fibroblast cell line and the RAW264.7 mouse macrophage cell line were used. The cell lines studied were opened from the stock and checked with the mycoplasma test kit. While preparing the medium for the cells, 5 mL fetal bovine serum (FBS) and 500 µL penicillin-streptomycin antibiotic mixture were prepared for 50 mL Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) (Gibco) and passed through a 0.22 nm filter to provide a sterile medium. The medium to be used only in the serum starvation phase of the *in vitro* wound model does not contain FBS (Liang et al., 2007; Santhini et al., 2018). The cultured cells were developed in T75 flasks in a 5% CO_2 oven (Panasonic) at 37 °C. For cell preservation, cells were collected from flasks with Trypsin-EDTA (Carpricorn Scientific) and centrifuged at 2400 rpm for 4 min to remove trypsin. The cell pellet was thawed in medium containing 10% dimethyl sulfoxide (DMSO, Sigma-Aldrich) and transferred to cryovials. Then, cryovials were first frozen for 1 hour at -20 °C, then overnight at -80 °C, and finally placed in a nitrogen tank and gradually frozen at -196 °C until further study (Lima-Neto et al., 2010).

2.5. Dissolution of commercial β-glucan

A stock solution was prepared from commercially available β-glucan. For this, 1000 µg of β-glucan was dissolved in 100 µL of NaOH solution overnight and then diluted with 900 µL of distilled water to neutralize the pH. Thus, 1000 µg/mL of parent stock β-glucan solution was prepared. The parent stock was diluted again with medium (15 µg/mL) and applied to the cells (Kataoka et al., 2002).

2.6. Obtaining lyophilized EPS from L. plantarum GD2 strain

Active bacterial culture was cultured in 800 mL MRS broth at 2% and incubated at 37 °C for 48 hours. At the end of incubation, it was left in a hot water bath at 95 °C for 10 minutes and 4% trichloroacetic acid (TCA) (Merck) was added at room temperature and mixed with a magnetic stirrer (Heidolph) for 2 hours. After this process, the mixture was centrifuged (Nüve) at 4000 rpm for 25 minutes and then treated with at least twice the amount of 96% cold alcohol (Teksol) and kept at +4 °C overnight. After incubation overnight, EPS was obtained by centrifuging at 4000 rpm for 25 minutes. The obtained EPS was dissolved in 1 mL of sterile distilled water, distributed into vials as 500 µL, and kept at -80 ° C for at least 1 night. After this stage, EPSs were lyophilized by freeze-drying in a lyophilizer (Christ Alpha) (Demir, 2022).

2.7. Application groups used in studies

The application groups used in bacterial and cell studies are given in Table 1.

Table 1. Application groups used in studies

Application groups	Application conditions	Studies using applications
Control application	No application medium	The control group of all experiments was designed in this way.
Serum starvation application	FBS-free DMEM medium	It was used only for the serum starvation phase of the *in vitro* wound model (scratch assay).
β-glucan application	Medium containing 15 µg/mL β-glucan	It was used in the β-glucan application group of all experiments.
GD2 L-EPS application	Medium containing 1000 µg/mL L-EPS	It was used in the L-EPS application group of all experiments.
β-glucan/GD2 L-EPS combination application	Medium containing 15 µg/mL β-glucan/1000 µg/mL L-EPS combination	It was used in the β-glucan/L-EPS combination group of all experiments.

2.8. Determination of cytotoxicity of biopolymers by MTT analysis

MTT test involves the conversion of water-soluble yellow 3-(4.5-dimethylthiazol-2-yl)-2.5-diphenyltetrazolium bromide (MTT) into insoluble purple formazan crystals by the action of a mitochondrial reductase. Dense formazan crystals and intense purple color indicate intense mitochondrial activity. The density of this color is read by optical density measuring devices and cell viability (%) calculations are made according to the control group of the experiment (Kumar et al., 2018). The effects of different times and concentrations of applications on cell viability in L929 mouse fibroblast and RAW264.7 mouse macrophage cell lines were determined by MTT analysis. MTT analysis was prepared in 96 well plates with approximately 1×10^4 cells per well. After the applications, all the medium in the 96 well plates was removed and replaced with medium containing 0.5 mg/mL MTT (Sigma-Aldrich). The 96 well plate was incubated for 4 hours at 37 °C in a 5% CO_2 incubator, then the MTT solution was removed and the cells were lysed with 200 µL of dimethyl sulfoxide (DMSO) (Sigma-Aldrich). The 96 well plate was then read at 570 nm using a microplate reader (Biotek Instruments). Absorbance values were expressed as percentage of control cells (control = 100%).

2.9. Determination of antibiofilm effect of biopolymers

In this study, the antibiofilm effect of biopolymers (β-glucan, L-EPS, and the β-glucan/L-EPS combination) was evaluated using the crystal violet staining method in a 96-well microplate system. Bacterial stocks stored at -30°C were activated in Nutrient broth medium, and contamination control was performed using the Gram staining method. The overnight-incubated cultures were centrifuged at 4100 rpm, and bacterial pellets were separated, washed with physiological serum, and centrifuged again to adjust the turbidity to McFarland 0.5 standard. In the biofilm experiment, each well was supplemented with 20 µL of bacterial suspension, 15 µg/mL β-glucan, 1000 µg/mL L-EPS, or their combination, and 180 µL of Mueller-Hinton broth (supplemented with 1% glucose). The plates were incubated at 37°C for 48 hours, followed by the removal of the liquid phase, and wells were washed 3-5 times with sterile physiological serum. To fix the biofilm layer, the wells were treated with 95%

methanol and stained with 1% crystal violet solution. After staining, the wells were washed 3-5 times with distilled water and treated with an ethanol-acetone (4:1) solution for biofilm measurement, which was performed at 570 nm using a microplate reader. For the experiment, a negative control group (bacteria-free Mueller-Hinton broth supplemented with 1% glucose) and a growth control (medium containing bacterial suspension and biopolymers) were included. The percentage of biofilm inhibition was calculated using the following formula described by Sarikaya (2014), Haney et al. (2018), and Kırmusaoglu (2019): Biofilm formation inhibition (%) = (ODcontrol-ODsample) /ODcontrol x100

2.10. In vitro wound model (Scratch assay)

In vitro wound model is an analysis in which a scratch is made in order to mimic a wound in cell culture and the efficiency of cells in migration and thus wound closure is measured. This protocol consists of 4 main elements: Culturing the cells, creating a scratch wound model, imaging of cell migration and analysis of data (Martinotti and Ranzato, 2020). In this study, the L929 mouse fibroblast cell line cultured was transferred to 24 well plates at 5×10^4 cells per well. The cells were incubated overnight at 37 °C in a 5% CO_2 incubator. Then, the medium of the cells was changed to FBS-free medium and left for 8 hours of serum starvation. At the end of serum starvation, an artificial wound area was created in the wells using a 200 µL pipette tip. Appropriate wells where the artificial wound was created were selected with the help of a microscope and applications were made to the relevant wells. After the applications, images were taken at 0 hours, 18 hours and 24 hours. The images were analyzed with the Image-J program and the results were given as wound closure percentage (%) and percentage (%) efficiency.

% Wound closure = (Δ0h-Δth) / Δ0h x 100 (Δ0h: 0th hour wound area / Δth: t. hour wound area).

% Efficiency = [(application % closure x 100) / control % closure]-100 (Liang et al., 2007; Santhini et al., 2018).

2.11. Statistical analyses

All experiments were repeated three times and mean values are presented. Results are given as mean ± standard deviation (SD). Statistical analyses were performed using SPSS. Pearson correlation analysis was used to define the statistical significance of differences between values ($p<0.05$).

3. Results and Discussion

Studies in the literature have reported that β-glucan concentrations of 0-40 µg/mL are effective in both wound closure and cell migration (Wei et al., 2002; Vetvicka and Vetvickova, 2011; van den Berg et al., 2014; Seo et al., 2019). For this reason, a β-glucan concentration of 15 µg/mL was selected for use in our study. The selected concentration is among the β-glucan concentrations shown to be effective in the literature.

In the master's thesis study under the supervision of Prof. Dr. Belma ASLIM, the L-EPS obtained from *L. plantarum* GD2 strain was determined by the phenol sulfuric acid method and the L-EPS amount was determined as 398±4.4 mg/L. In addition, again in this thesis study, the 1000 µg/mL concentration of L-EPS obtained from *L. plantarum* GD2 strain gave effective results in terms of cell viability and cell migration on the L929 mouse fibroblast cell line. For this reason, the 1000 µg/mL concentration of L-EPS was selected to be used in our study (Demir, 2022).

3.1. Cytotoxicity results of biopolymers

The cytotoxic effects of biopolymers (β-glucan, L-EPS and β-glucan/L-EPS combination) on L929 mouse fibroblast and RAW264.7 mouse macrophage cell lines were determined within the scope of the study (Figures 1 and 2). According to ISO 10993-5 standards, a decrease in cell viability below 70% is an indication of the cytotoxic potential of the application. According to the results obtained from the study, β-glucan (15 µg/mL), L-EPS (1000 µg/mL) and the combination of the two biopolymers (15 µg/mL β-glucan/1000 µg/mL L-EPS) did not show any cytotoxic effects on L929 mouse fibroblast and RAW264.7 mouse macrophage cell lines. Since cell viability in the application groups was above 70%, the use of biopolymers can be considered safe.

In the current literature, no specific study has been found in which β-glucan and L-EPSs were used together on the L929 mouse fibroblast cell line. However, the cytotoxic effects of these biopolymers have been investigated in separate studies. In the study conducted by Filiz et al. (2021), the cytotoxic effect of β-glucan (62.5-500 µg/mL) was tested in the L929 mouse fibroblast cell line and the results showed that β-glucan did not have a cytotoxic effect on the L929 mouse fibroblast cell line. In the study conducted by Khalil et al. (2022), *S. thermophilus* DSM 24731, *L. delbrueckii* ssp. *bulgaricus* DSMZ 20081T, *L. fermentum* DSMZ 20049 and *B. longum* ssp. *longum* DSMZ 200707 strains were determined to have cytotoxic effects. Cell viability in the application groups was over 90%. In our study, no cytotoxic effect of β-glucan and L-EPS was observed, and studies conducted at higher concentrations in the literature did not show any cytotoxicity. This finding supports that β-glucan and L-EPS have high biocompatibility on cells and do not show toxicity. In addition, this finding shows that these biopolymers have the potential to be used as active ingredients in innovative wound dressing materials.

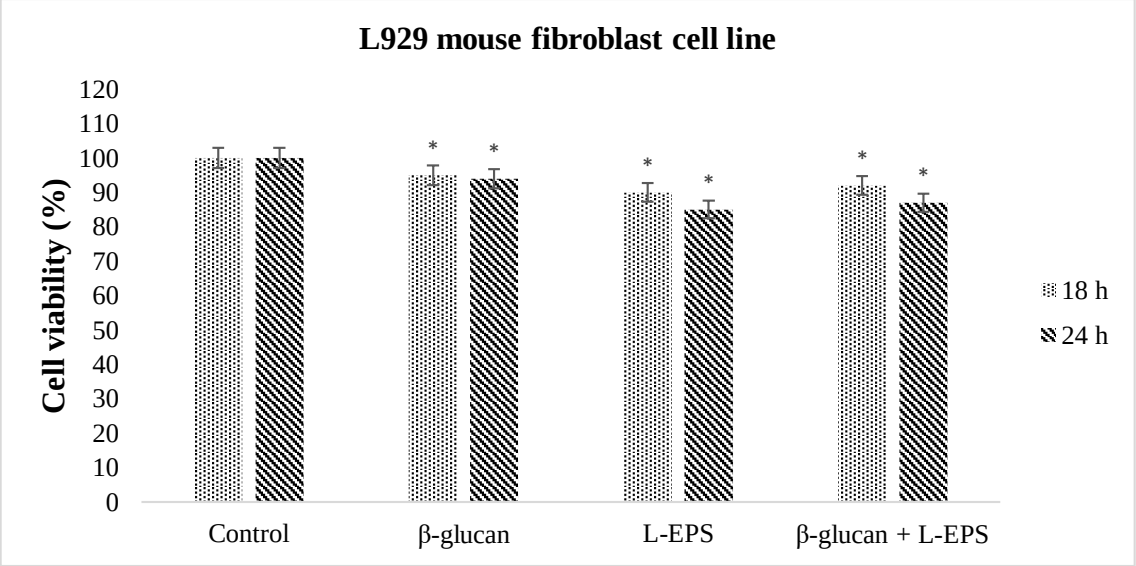


Figure 1. Cytotoxic effect of β-glucan, L-EPS, and their combination on cell viability (%) in L929 mouse fibroblast cell line after 18 h and 24 h of treatment. Data are presented as mean ± SD (n = 3). Asterisk (*) indicates a statistically significant difference compared to the control group ($p < 0.05$).

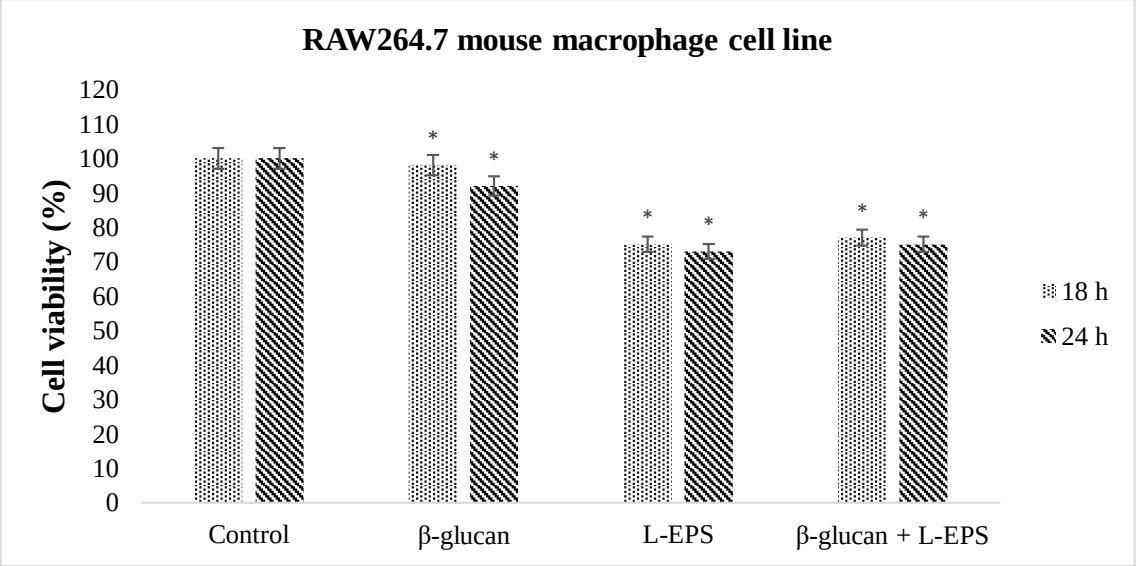


Figure 2. Cytotoxic effect of β-glucan, L-EPS, and their combination on cell viability (%) in RAW264.7 mouse macrophage cell line after 18 h and 24 h of treatment. Data are expressed as mean ± SD (n = 3). Asterisk (*) indicates statistically significant difference compared to the control group ($p < 0.05$).

3.2. Antibiofilm results of biopolymers

In the scope of the study, the biofilm formation inhibitory effect of biopolymers (β-glucan, L-EPS and β-glucan/L-EPS combination) on biofilm producer *S. aureus* ATCC 25923, methicillin-resistant *S. aureus* (MRSA) ATCC 43300, *P. aeruginosa* ATCC 23893 and *E. coli* ATCC 35218 strains that cause wound infections was determined (Figure 3).

No antibiofilm effect was observed on biopolymers on *S. aureus* ATCC 25923 and methicillin-resistant *S. aureus* (MRSA) ATCC 43300 strains (p>0.05). All application groups of biopolymers, especially the β-glucan/L-EPS combination group, showed an inhibitory effect on biofilm formation on *P. aeruginosa* ATCC 23893 strain (p<0.05). In *E. coli* ATCC 35218 strain, only β-glucan (15 µg/mL) application showed an inhibitory effect on biofilm formation (p<0.05).

The anti-biofilm activity of β-glucan and L-EPS may be due to their role in disrupting biofilm formation; they may disrupt the integrity of pathogen membranes and ensure the flow of soluble proteins; they may accelerate the colonization of probiotics on the surface of the gastrointestinal tract and increase competition with pathogenic bacteria in the host (Soliemani et al., 2022).

In the current literature, no specific study has been found that addresses the inhibitory effect of β-glucan and L-EPS on biofilm together. However, the inhibitory effect of these biopolymers on biofilm has been examined in separate studies. Khadam and Salman (2024) showed that β-glucan (0.78-400 mg/mL) has an inhibitory effect on biofilm formation in isolates causing wound infections. It was determined that biofilm formation decreased in all isolates compared to the control group at 24, 48 and 72 hours of incubation. At the end of 24 hours, the inhibition percentage was measured as 18-87% for 8 different *P. aeruginosa* PAO1 strains. Wu et al. (2021) found in their study that EPS273 showed anti-biofilm effect by regulating the expression of genes involved in biofilm formation of *P. aeruginosa*. This effect was achieved by suppressing gene expression of the PhoP-PhoQ two-component system and the LasI/LasR and RhlI/RhlR quorum sensing (QS) systems.

These findings suggest that β-glucan and L-EPS have potential as biofilm inhibitors. However, in our study, no inhibitory effect on biofilm formation was observed especially in *S. aureus* ATCC 25923 and *S. aureus* (MRSA) ATCC 43300 strains, suggesting that the effects of these biopolymers on gram-positive and gram-negative bacteria may differ. The apparent anti-biofilm effect of biopolymers on gram-negative bacteria, especially on *P. aeruginosa* ATCC 23893 strain, suggests that the biofilm structure and cell wall components of this bacteria may be more sensitive to the effects of β-glucan and L-EPS. Considering that β-glucan has range of inhibition (18-87%) against *P. aeruginosa* in the literature, the 40% inhibition rate in our study suggests that it offers a moderate effect. The fact that only β-glucan was found to be effective in *E. coli* ATCC 35218 strain may suggest that the effect of EPS may be strain specific or that it does not show a synergistic interaction with β-glucan in certain bacteria. In general, these results emphasize the need for more detailed studies depending on the bacterial species and biopolymer dose to understand and optimize the antibiofilm properties of biopolymers. In addition, the antibiofilm activity of biopolymers (β-glucan and L-EPS) is an important factor that strengthens the potential of these polymers as wound dressing materials. Biofilm formation is one of the major causes of chronic wound infections and complicates the treatment process by causing bacteria to become resistant to antibiotics and the immune system. Therefore, wound dressings containing biofilm inhibitors can accelerate the healing process by reducing the risk of infection.

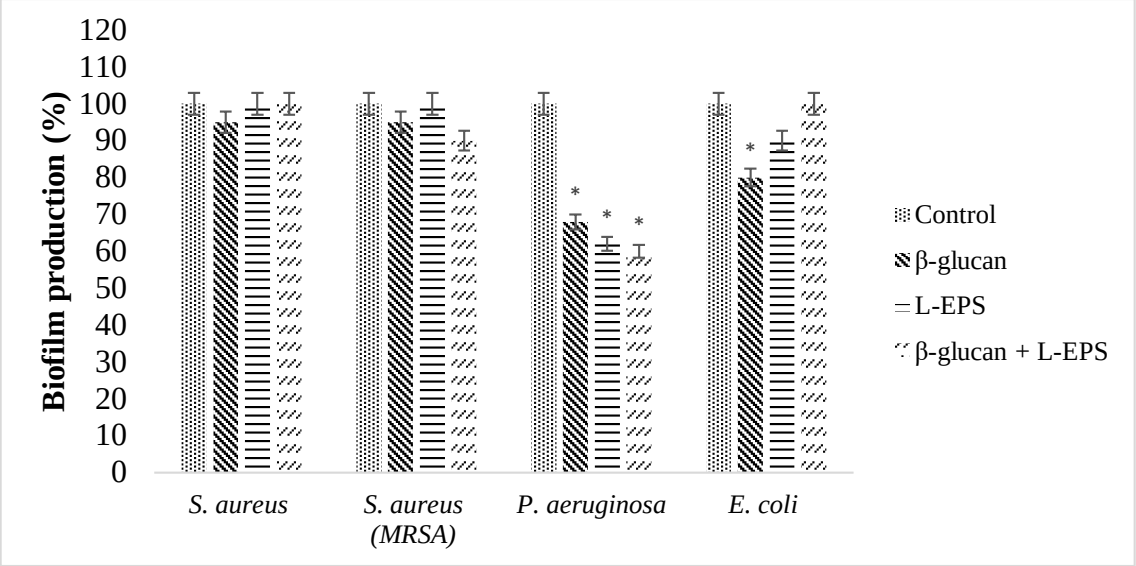


Figure 3. Inhibitory effect of β-glucan, L-EPS, and their combination on biofilm production (%) in different bacterial strains including *S. aureus* ATCC 25923, *S. aureus* (MRSA) ATCC 43300, *P. aeruginosa* ATCC 23893, and *E. coli* ATCC 35218. Data are shown as mean ± SD (n = 3). Asterisk (*) indicates a statistically significant reduction in biofilm formation compared to the control group ($p < 0.05$).

3.3. Wound closure results of biopolymers

Within the scope of the study, the wound closure effects of biopolymers (β-glucan, L-EPS and β-glucan/L-EPS combination) in the *in vitro* wound model created in the L929 mouse fibroblast cell line were determined at 0, 18 and 24 hours (Figure 4). According to the findings, the wound closure rates of the application groups compared to the control group varied between 63-74% ($p<0.05$). According to the results, the wound closure rate was determined as 63% in the control group at the 18th hour. At the same hour, wound closure was measured as 65.5% in the β-glucan group, 68.0% in the L-EPS group and 72.5% in the β-glucan + L-EPS group. According to the 24th hour data, wound closure reached 66.0% in the β-glucan group, 69.3% in the L-EPS group and 74.0% in the β-glucan + L-EPS group. These findings show that the application of β-glucan and L-EPS alone and together have positive effects on wound healing; especially, the healing was more pronounced in the 15 µg/mL β-glucan/1000 µg/mL L-EPS combination group.

In the current literature, no specific study was found that addressed the wound closure effect of β-glucan and EPS together. However, the wound closure effect of these biopolymers was examined in separate studies. Choi et al. (2022) concluded in their study that 1 µg/mL β-glucan promotes angiogenesis in HUVEC cells. Zaghloul and Ibrahim (2022) showed that EI6-EPS significantly promoted cell migration using the human dermal fibroblast (HSF) cell line scratch test. In this study, the wound closure rate after 24 hours was reported as 50% in EI6-EPS-treated cells, while it was 41% in the control group. In the same study, these rates were reported as 77% and 60% at the end of 48 hours, respectively. The results of our study are largely consistent with the findings in the literature. This study provides the first

findings that the combination of β-glucan and L-EPS can promote wound healing and indicates that more detailed studies should be conducted in the future.

The effects of β-glucan and L-EPS on wound healing occur through various biological mechanisms. In particular, β-glucan strengthens the immune system, provides protection against infections, and supports wound healing with its anti-inflammatory properties. It also accelerates tissue repair by promoting cell proliferation and migration (Şirinyıldız and Mavi Bulut, 2022). L-EPS is also thought to contribute to wound healing by supporting intercellular communication and tissue regeneration. The synergistic effects of these biopolymers may explain the positive effects on cell migration and wound closure observed in the scratch assay results.

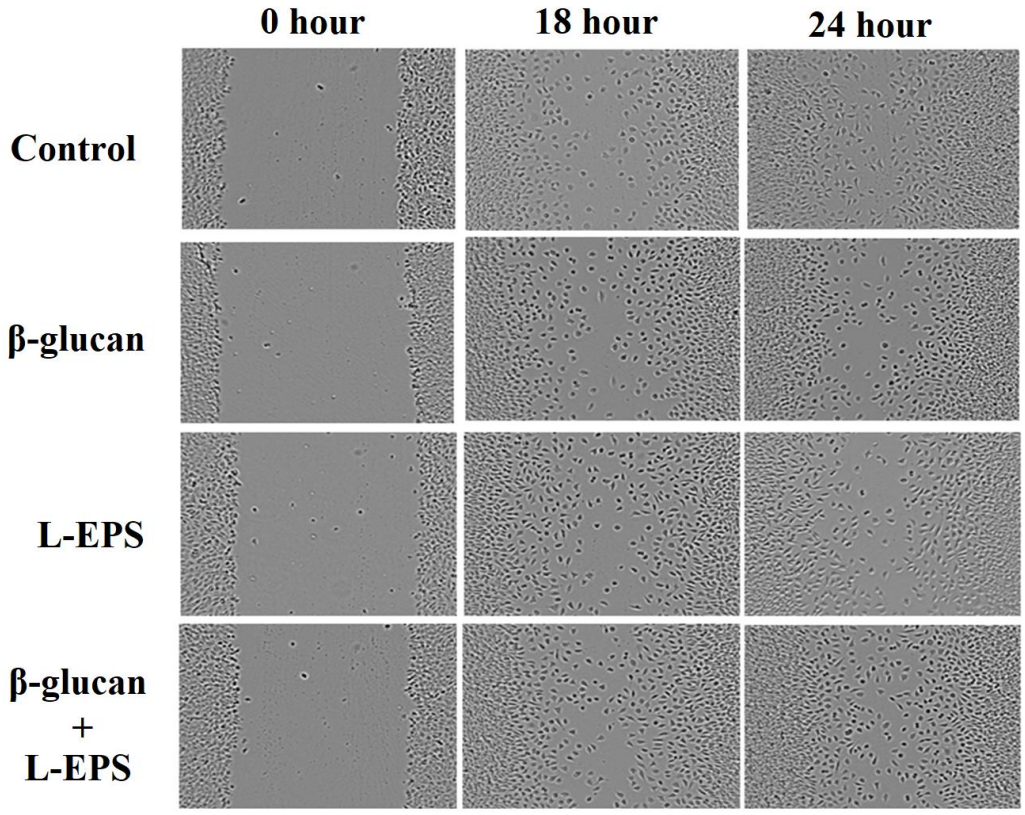


Figure 4. Representative images from the wound healing assay showing the effect of β-glucan, L-EPS, and their combination on cell migration in L929 fibroblast cells at 0, 18, and 24 hours. Reduced wound closure in the treatment groups compared to the control indicates inhibitory effects on cell migration. Images are representative of three independent experiments.

4. Conclusion

In this study, the effects of commercially available β-glucan and L-EPS obtained from *L. plantarum* GD2 on *in vitro* wound healing were determined. Cytotoxicity analysis of biopolymers was determined by MTT test, while antibiofilm activity and wound healing potential were examined by scratch test model. The obtained findings showed that β-glucan and L-EPS, both individually and in combination, did not have a significant cytotoxic effect on L929 mouse fibroblast cell line and RAW264.7 mouse macrophage cell line, thus they were biocompatible. In addition, scratch test results revealed that these biopolymers positively affected wound closure by promoting cell migration. The combination of β-glucan and L-EPS showed a similar or increased effect compared to individual applications; this could be attributed to the synergistic properties of the compounds. In addition, antibiofilm analysis revealed that these biopolymers can help prevent microbial colonization, which is important for maintaining a sterile wound environment. The statistical analyses confirmed that the observed effects were significant, supporting that β-glucan and L-EPS can be used as potential biological agents in wound healing processes. As a result, β-glucan and L-EPS obtained from *L. plantarum* GD2 stand out as promising biomaterials with their wound healing accelerating and biofilm formation preventing effects. Advanced *in vivo* and clinical studies are needed to fully understand the therapeutic potential of these compounds and to evaluate their applicability in the biomedical field.

Statement of Conflict of Interest

The authors of the article declares that they have no conflict of interest.

Author's Contributions

Conceptualization: M.A., S.N.D.;
Methodology: M.A., S.N.D.;
Investigation: M.A., S.N.D.;
Data curation: M.A., S.N.D.;
Writing – original draft: M.A., S.N.D.;
Writing – review & editing: M.A., S.N.D.;
Supervision: M.A., S.N.D.

Acknowledgment

The authors would like to express their sincere gratitude to Prof. Dr. Belma Aslım for her valuable guidance, encouragement, and continuous support throughout the course of this work.

References

Choi M., Lee SM., Lee JW., Kim I., Pack CG., Ha CH. Yeast beta-glucan mediates histone deacetylase 5-induced angiogenesis in vascular endothelial cells. International Journal of Biological Macromolecules 2022; 211: 556-567.

Costa R., Costa L., Rodrigues I., Meireles C., Soares R., Tamagnini P., Mota R. Biocompatibility of the biopolymer Cyanoflan for applications in skin wound healing. Marine Drugs 2021; 19(3): 147.

Demir A. Potansiyel probiyotik *Lactobacillus plantarum* GD2 tarafından üretilen ekzopolisakkarit'in (EPS) yara iyileşme özelliklerinin araştırılması (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2022.

Dhivya S., Padma VV., Santhini E. Wound dressings—A review. BioMedicine 2015; 5(4): 22.

Dickinson LE., Gerecht S. Engineered biopolymeric scaffolds for chronic wound healing. Frontiers in Physiology 2016; 7: 341.

Dilna SV., Surya H., Aswathy RG., Varsha KK., Sakthikumar DN., Pandey A., Nampoothiri KM. Characterization of an exopolysaccharide with potential health-benefit properties from a probiotic *Lactobacillus plantarum* RJF4. LWT - Food Science and Technology 2018; 64: 1179-1186.

Filiz AK., Joha Z., Yulak F. Mechanism of anti-cancer effect of β-glucan on SH-SY5Y cell line. Bangladesh Journal of Pharmacology 2021; 16(4): 122-128.

Goldberg SR., Diegelmann RF. What makes wounds chronic. Surgical Clinics of North America 2020; 100(4): 681–693.

Hamdan S., Pastar I., Drakulich S., Dikici E., Tomic-Canic M., Deo S., Daunert S. Nanotechnology-driven therapeutic interventions in wound healing: Potential uses and applications. ACS Central Science 2017; 3(3): 163–175.

Hamidi M., Okoro OV., Ianiri G., Jafari H., Rashidi K., Ghasemi S., Castoria R., Palmieri D., Delattre C., Pierre G., Mirzaei M., Nie L., Samadian H., Shavandi A. Exopolysaccharide from the yeast *Papiliotrema terrestris* PT22AV for skin wound healing. Journal of Advanced Research 2023; 46: 61–74.

Haney EF., Trimble MJ., Cheng JT., Vallé Q., Hancock REW. Critical assessment of methods to quantify biofilm growth and evaluate antibiofilm activity of host defence peptides. Biomolecules 2018; 8(2): 29.

Kataoka K., Muta T., Yamazaki S., Takeshige K. Activation of macrophages by linear (1→3)-β-D-glucans: Implications for the recognition of fungi by innate immunity. Journal of Biological Chemistry 2002; 277(39): 36825-31.

Khadam AA., Salman JA. Antibacterial and antibiofilm of purified β-glucan from *Saccharomyces cerevisiae* against wound infections causative bacteria. Iraqi Journal of Science 2024; 2397-2409.

Khalil MA., Sonbol FI., Al-Madboly LA., Aboshady TA., Alqurashi AS., Ali SS. Exploring the therapeutic potentials of exopolysaccharides derived from lactic acid bacteria and bifidobacteria: Antioxidant, antitumor, and periodontal regeneration. Frontiers in Microbiology 2022; 13: 803688.

Kırmusaoğlu S. The methods for detection of biofilm and screening antibiofilm activity of agents. In: Antimicrobials, Antibiotic Resistance, Antibiofilm Strategies and Activity Methods. IntechOpen 2019. DOI: 10.5772/intechopen.84411.

Koyutürk A., Soyaslan D. Yara ve yanık tedavisinde kullanılan örtüler. Mehmet Akif Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2016; 1: 58-65.

Kumar P., Nagarajan A., Uchil PD. Analysis of cell viability by the MTT assay. Cold Spring Harbor Protocols 2018; 2018(6): pdb.prot095505.

Laubach J., Joseph M., Brenza T., Gadhamshetty V., Sani RK. Exopolysaccharide and biopolymer-derived films as tools for transdermal drug delivery. Journal of Controlled Release 2021; 329: 971–987.

Liang CC., Park AY., Guan JL. In vitro scratch assay: A convenient and inexpensive method for analysis of cell migration in vitro. Nature Protocols 2007; 2(2): 329–333.

Lima-Neto JF., Fernandes CB., Alvarenga MA., Golim MA., Landim-Alvarenga FC. Viability and cell cycle analysis of equine fibroblasts cultured in vitro. Cell and Tissue Banking 2010; 11(3): 261–268.

Majee SB., Avlani D., Biswas GR. Rheological behavior and pharmaceutical applications of bacterial exopolysaccharides. Journal of Applied Pharmaceutical Science 2017; 7(9): 224-232.

Muthuramalingam K., Choi SI., Hyun C., Kim YM., Cho M. β-Glucan-based wet dressing for cutaneous wound healing. Advances in Wound Care 2019; 8(4): 125–135.

Olsson M., Järbrink K., Divakar U., Bajpai R., Upton Z., Schmidtchen A., Car J. The humanistic and economic burden of chronic wounds: A systematic review. Wound Repair and Regeneration 2019; 27(1): 114–125.

Rodrigues M., Kosaric N., Bonham CA., Gurtner GC. Wound healing: A cellular perspective. Physiological Reviews 2019; 99(1): 665–706.

Sahana TG., Rekha PD. Biopolymers: Applications in wound healing and skin tissue engineering. Molecular Biology Reports 2018; 45(6): 2857–2867.

Santhini E., Pramila VM., Shalini M., Vignesh Balaji R., Chellamani KP. Preparation and characterization of PLGA-based biocompatible nanoparticles for sustained delivery of growth factor for wound healing applications. Current Science 2018; 115(7): 1287–1296.

Sarıkaya H. Laktik asit bakterilerinin kültür filtratları ve ekzopolisakkaritlerinin (EPS) bifidobakterilerin gelişimini düzenleyici (BGD) ve antibiyofilm etkilerinin belirlenmesi (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2014.

Seo G., Hyun C., Choi S., Kim YM., Cho M. The wound healing effect of four types of beta-glucan. Applied Biological Chemistry 2019; 62: 20.

Sirin S., Aslim B. Characterization of lactic acid bacteria derived exopolysaccharides for use as a defined neuroprotective agent against amyloid beta1–42-induced apoptosis in SH-SY5Y cells. Scientific Reports 2020; 10: 8124.

Sirin S., Aslim B. Protective effect of exopolysaccharides from lactic acid bacteria against amyloid beta1-42-induced oxidative stress in SH-SY5Y cells: Involvement of the AKT, MAPK, and NF-κB signaling pathway. Process Biochemistry 2021;106: 50-59.

Şirinyıldız F., Mavi Bulut A. Beta glukanların bağışıklık üzerine etkileri: Güncel yaklaşımlar. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi 2022; 7(1): 173-178.

Soliemani O., Salimi F., Rezaei A. Characterization of exopolysaccharide produced by probiotic *Enterococcus durans* DU1 and evaluation of its anti-biofilm activity. Archives of Microbiology 2022; 204(7): 419.

Swann G. The skin is the body's largest organ. Journal of Visual Communication in Medicine 2010; 33(4): 148–149.

Tottoli EM., Dorati R., Genta I., Chiesa E., Pisani S., Conti B. Skin wound healing process and new emerging technologies for skin wound care and regeneration. Pharmaceutics 2020; 12(8): 735.

Tukenmez U., Aktas B., Aslim B., Yavuz S. The relationship between the structural characteristics of *Lactobacilli*-EPS and its ability to induce apoptosis in colon cancer cells in vitro. Scientific Reports 2019; 9(1): 8268.

Tükenmez Ü., Aslım B. Probiyotik kaynaklı, muhtemel prebiyotik özelliğe sahip ekzopolisakkarit (EPS'lerin) biyolojik ve fonksiyonel özellikleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi 2018; 25(4): 487-497.

van den Berg LM., Zijlstra-Willems EM., Richters CD., Ulrich MM., Geijtenbeek TB. Dectin-1 activation induces proliferation and migration of human keratinocytes enhancing wound re-epithelialization. Cellular Immunology 2014; 289(1-2): 49-54.

Vetvicka V., Vetvickova J. β (1-3)-D-glucan affects adipogenesis, wound healing and inflammation. Oriental Pharmacy and Experimental Medicine 2011; 11: 169-175.

Wei D., Zhang L., Williams DL., Browder IW. Glucan stimulates human dermal fibroblast collagen biosynthesis through a nuclear factor-1 dependent mechanism. Wound Repair and Regeneration 2002; 10(3): 161-168.

Wu Z., Zheng R., Zhang J., Wu S. Transcriptional profiling of *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 in response to anti-biofilm and anti-infection agent exopolysaccharide EPS273. Journal of Applied Microbiology 2021; 130(1): 265-277.

Zaghloul EH., Ibrahim MI. Production and characterization of exopolysaccharide from newly isolated marine probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* EI6 with in vitro wound healing activity. Frontiers of Microbiology 2022; 13: 903363.

Zheng J., Wittouck S., Salvetti E., Franz CM., Harris HM., Mattarelli P., Lebeer S. A taxonomic note on the genus Lactobacillus: description of 23 novel genera, emended description of the genus Lactobacillus Beijerinck 1901, and union of Lactobacillaceae and Leuconostocaceae. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2020; 70(4): 2782-2758.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1941-1952, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1941-1952, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Endüstriyel Ön Montaj Hatlarında İyileştirme Stratejileriyle Alan Verimliliğinin Artırılması

Ülge TAŞ[1*]

[1]Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-2376-3735
*Corresponding author: ulge.tas@aksaray.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 26.06.2025
Kabul tarihi:11.07.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Vaka analizi
Yalın uygulama
Ön montaj hatları
Alan verimliliği

ÖZ

Günümüzün rekabetçi üretim ortamında, alan verimliliği operasyonel performansın kritik bir yönü haline gelmiştir. Bu çalışma, 5S (Seiri -Seiton-Seiso-Seiketsu-Shitsuke) ve poka-yoke dahil olmak üzere yalın iyileştirme stratejilerini uygulayarak endüstriyel ön montaj hatlarında alan kullanımını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma bir üretim şirketinde Mart-Haziran 2025 arasında bir vaka çalışması olarak yürütülmüştür. Veriler yerinde gözlemler, iş akışı analizi ve personel görüşmeleri yoluyla toplanmıştır. Metodoloji, mevcut düzeni değerlendirmeyi, yalın araçlarını uygulamayı ve iyileştirmelerden önce ve sonra performans ölçümlerini karşılaştırmayı içermektedir. Bulgular, dört temel alanda önemli ilerlemeler olduğunu göstermektedir: malzeme yönetimi, düzen ve akış optimizasyonu, envanter ve alan kullanımı ve ergonomik tasarım. En önemli kazanımlar malzeme yönetimi ve mekansal optimizasyonda gözlemlenmiştir. Ek olarak, ergonomik iyileştirmeler işçi güvenliğine katkıda bulunmuş ve gereksiz hareketleri azaltmıştır. Poka-yoke tekniklerinin uygulanması, iç kusurların ortadan kaldırılmasını sağlayarak kalite ve güvenilirliği artırmıştır. Bu çalışma, alan verimliliği iyileştirmelerinin veri odaklı, gerçek vaka analizini sağlayarak mevcut literatürdeki bir boşluğu doldurmakta ve sektör paydaşları için pratik içgörüler sunmaktadır.

Enhancing Space Efficiency Through Improvement Strategies in Industrial Pre-Assembly Lines

Research Article

Article 26.06.2025
Accepted:11.07.2025
Online Publishing:16.09.2025

Keywords:
Case study
Lean practices
Pre-assembly line
Space efficiency

ABSTRACT

In today's competitive manufacturing environment, space efficiency has become a critical aspect of operational performance. This study aims to enhance space utilization in industrial pre-assembly lines by applying lean improvement strategies, including 5S (Seiri -Seiton-Seiso-Seiketsu-Shitsuke) and poka-yoke. A case study was conducted in a manufacturing company from March to June 2025. Data were collected through on-site observations, workflow analysis, and staff interviews. The methodology involved assessing the current layout, implementing lean tools, and comparing performance metrics before and after the improvements. The findings indicate substantial advancements in four key areas: material management, layout and flow optimization, inventory and space utilization, and ergonomic design. The most significant gains were observed in material management and spatial optimization. Additionally, ergonomic improvements contributed to worker safety and reduced unnecessary motions. The application of poka-yoke techniques led to the elimination of internal defects, thereby enhancing quality and reliability. This study fills a gap in the existing literature by providing a data-driven, real-world analysis of space efficiency improvements and offers practical insights for industry stakeholders.

To Cite: Taş Ü. Enhancing Space Efficiency Through Improvement Strategies in Industrial Pre-Assembly Lines. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1941-1952.

1. Introduction

In the highly competitive manufacturing industry, continuous improvement practices are essential for enhancing operational efficiency, product quality, and responsiveness to market demands. One such practice is lean principles, a Japanese management philosophy focused on incremental and sustained improvement. The lean-based approache of 5S have gained significant attention for their practical applications and measurable effects in manufacturing. The Poka-yoke technique is commonly used in manufacturing systems to prevent human errors by implementing fail-safe mechanisms in processes (Shingo, 1986). Combining Poka-yoke with lean manufacturing systems improves standardization and supports continuous improvement practices in industrial environments (Abdulmalek and Rajgopal, 2007). These methods emphasize employee engagement, standardization, and systematic problem-solving. These methods alligns closely with lean-based principles and is particularly effective in high-volume, quality-critical sectors, such as manufacturing.

The 5S methodology, originally developed in Japan's manufacturing sector, particularly within the Toyota Production System (TPS), has become a global strategy for reducing waste, improving safety, and supporting continuous improvement (Gapp et al., 2008). It serves as a tool for cultural transformation, aligning employee habits with lean values and laying the groundwork for further lean initiatives (Ahmed et al., 2010). Thus, 5S is not just a housekeeping tool but also a key driver of productivity and quality across various industries.

In the manufacturing industry, where production complexity and quality demands are extremely high 5S, Poka-Yoke, and other similar methods have gained widespread use due to their compatibility with lean manufacturing principles (Womack and Jones, 2016). Research has demonstrated that lean practices help eliminate non-value-added activities, reduce cycle times, and improve Overall Equipment Effectiveness (OEE) as well as defect rates (Shah and Ward, 2003; Bhamu and Sangwan, 2014). These results are significant for industrial manufacturers, as efficiency and quality are crucial competitive advantages. While the theoretical benefits of improvement strategies such as lean are widely discussed in the literature, there is still a need for more data-driven and context-specific studies that examine their real-world implementation and long-term outcomes (Bateman and David, 2002; Dale et al., 2007).

The lean tools, particularly 5S and poka-yoke, are practical expressions of broader production management philosophies such as the TPS. It focuses on eliminating waste, standardizing processes, and respecting people. Within this framework, 5S is fundamental for establishing visual control and process discipline, while poka-yoke is essential for ensuring quality at the source by preventing errors before they happen. From the perspective of production management, these tools significantly impact performance metrics such as throughput time, resource utilization, and operational flexibility. Consequently, the application of 5S and poka-yoke in this study is not isolated; it is integrated into the strategic goals of lean production systems, which seek to achieve continuous improvement, just-in-time

delivery, and total quality management (Shah and Ward, 2003). This theoretical integration highlights the interconnected nature of lean practices and places the current case study within a comprehensive production strategy context.

Numerous studies have been proposed and examined in the literature (Boysen et al., 2015; Kilic and Durmusoglu, 2015). The importance of space management in effectively governing manufacturing systems is well established and has been extensively studied (Neely et al., 2005; Choong, 2014). In this context, lean metrics have emerged as valuable tools for practitioners (Wan and Frank, 2008). The first attempt to measure space efficiency within a factory, using lean principles, was conducted by Chien et al. (2016b). This research specifically addresses the utilization of floor space at the workstation level. Shraddha et al. (2015) implemented the 5S methodology at Samsonite to address unorganized workstations and excessive waste. This initiative successfully improved working conditions and employee satisfaction. Vipulkumar and Thakkar (2014) explained the methods and techniques of lean used to increase the efficiency of all processes in the company, which can be used in all types of companies. Agrahari et al. (2015) examined the implementation of the lean methodology in small-scale industries, which showed significant improvements in space efficiency and housekeeping. Burggräf et al. (2021) showed that using a space efficiency approach is essential for improving the sustainability of factory areas by optimizing space usage. Hertwig et al. (2023) highlight that enhancing space efficiency through smart eco-factory designs is fundamental for supporting sustainability. Braglia et al. (2024) found a systematic and quantifiable method to evaluate and enhance space utilization in industrial workstations, facilitating more efficient layout and design decisions. Mun et al. (2025) find that combining energy-efficient technologies with optimized space efficiency strategies is crucial for creating feasible and sustainable plant factory systems that enhance resource utilization.

Previous research has not sufficiently explored lean improvement strategies as a case study for space efficiency, leading to a lack of comprehensive analyses in this area. From a lean perspective, an essential step towards continuous waste reduction is to implement structured savings that allow for measuring the effective and efficient use of space in production across all business processes. This study aims to fill that gap by providing a unique case study focused on space improvement. By doing so, this article seeks to contribute valuable insights to both the academic literature and the industry. This research aims to enhance space efficiency in industrial pre-assembly lines by utilizing 5S and Poka-Yoke, etc., as operational tools. The study focuses on key performance indicators such as time savings, cost savings, space savings, and line efficiency to identify measurable improvements resulting from lean.

The organization of this paper is as follows: Section 2 outlines the methodology used to selected the case study. Section 3 presents and discusses the findings, while Section 4 concludes with key implications and recommendations for future research.

2. Materials and Methods

By adopting a case-study approach, this study provides practical insights into how continuous improvement can translate into quantifiable operational gains in complex production environments. To contribute to the relevant literature and industry, this article presents a case study of the pre-assembly line of the industry. From March to June 2025, the case study was conducted on a large scale in an organization that operates in the manufacturing sector in Aksaray. The selection of the case company was based on several criteria. First, the company operates in a high-mix, low-volume manufacturing environment, where space efficiency and material handling present ongoing operational challenges. Second, the organization had already started basic lean awareness activities, creating a solid foundation for implementing structured lean tools. The period from March to June 2025 was chosen due to a planned restructuring of the pre-assembly area, which offered an opportunity for a natural experiment and real-time observation of improvements. A case study is a research approach that allows for in-depth and multi-faceted examination or understanding of complex issues (Crowe et al., 2011). This study examines the reduction of space pre-assembly lines in a manufacturing company, focusing on the implementation of space efficiency measures. Based on data collected through on-site observations, workflow-related documents, and interviews, the information was analyzed, and the findings were compiled into a report outlining potential solutions. The collected data was assessed for analysis suitability, and results were reported once the data was finalized. During the data analysis, lean practices were implemented under the leadership of the researcher.

By combining the goal of space savings with the lean approach, the study created an environment that fosters motivation for continuous improvement.

The activities conducted throughout the implementation period are listed as follows: (a) determining the current situation, (b) implementing lean practices, and (c) reporting the difference between the before and after situations.

3. Findings and Discussion

In the application made in the pre-production line, the current status was examined. The current status layout of the pre-production line that could be improved is illustrated in Figure 1.

Figure 1 shows the pre-production line layout. According to this layout, lean-based field improvement studies can be summarized in five stages under the title:

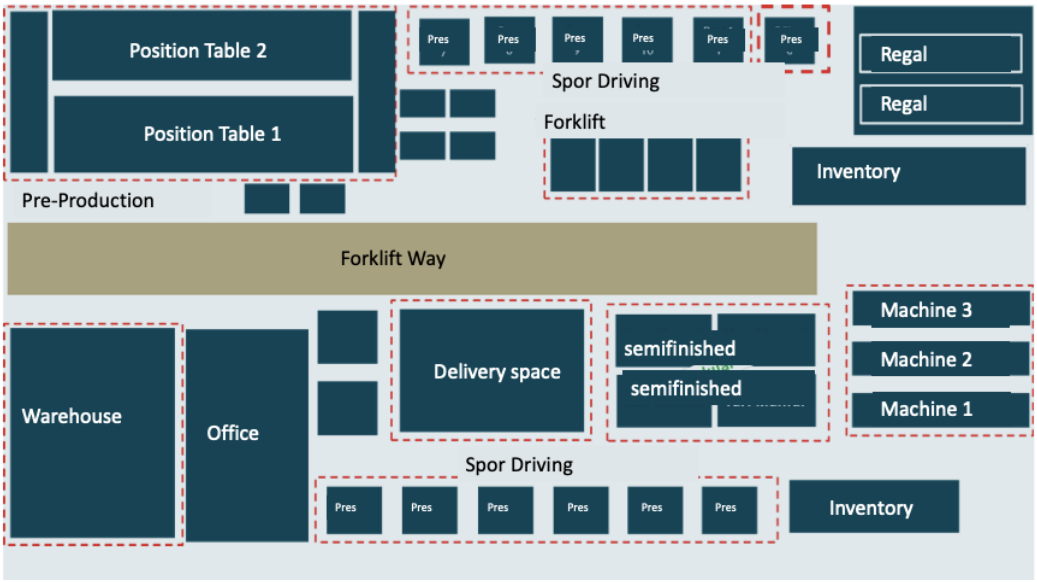


Figure 1. Current status layout of pre-production line

3.1. Material Management Improvements

The transition from manually updated Excel spreadsheets to a Kanban-based tracking system brought about significant improvements in operations. Monthly material preparation and stock tracking processes were streamlined, which helped reduce excess inventory and the labor time associated as illustrated in Figure 2.

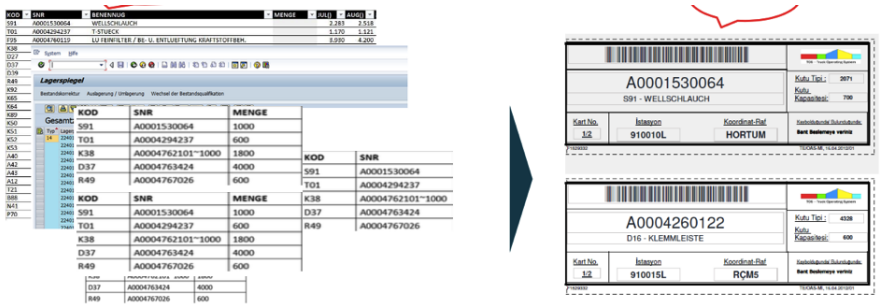
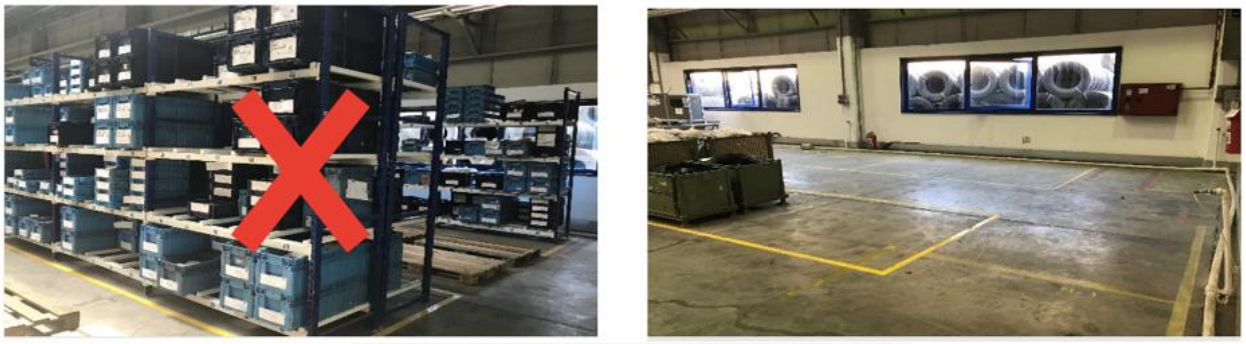


Figure 2. Material management

Figure 2 illustrates that monthly workload of 11.25 hours for office staff and 28.75 hours for blue-collar workers was eliminated, leading to an annual cost saving of approximately €5,130. Additionally, by removing unnecessary stock racks, we saved 25 m² of floor space, which resulted in space cost savings of €18,750 as shown in Figure 3.

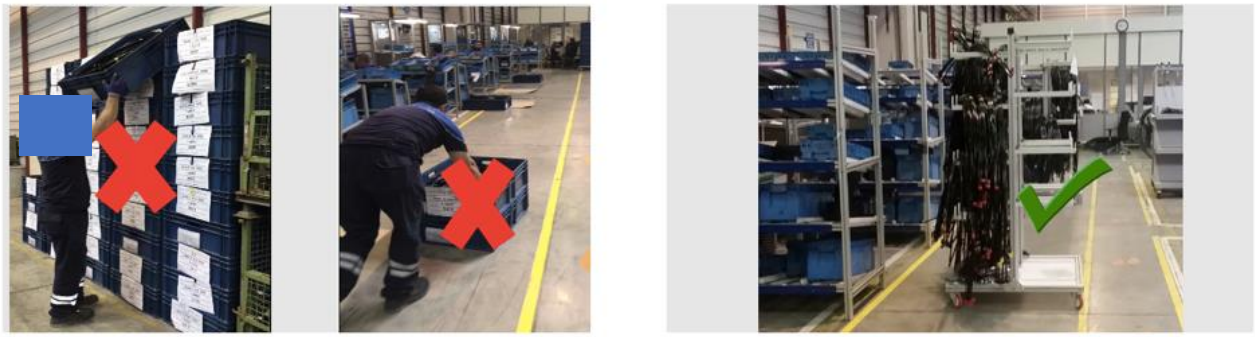


Before After

Figure 3. Space improvement

3.2. Layout and Flow Optimization

5S was made to optimize the physical layout and streamline material flow in Figure 4.



Before After

Figure 4. 5S application

Figure 4 shows that by eliminating unnecessary transfers between baskets, a daily time savings of 12.5 minutes was achieved, resulting in an annual cost reduction of €635. Additionally, redesigning processes to follow a linear flow reduced employee walking distances, saving 28.6 minutes per day and generating an annual labor cost reduction of €1,460. Additionally, the repositioning of the workstation has eliminated unnecessary movement.

3.3. Stock Reduction and Spatial Utilization

Inventory optimization significantly decreased the number of intermediate products on the floor, from 350 to 86 equivalents as illustrated in Figure 5.



Before After

Figure 5. Reduce inventory

This reduction led to a 15 m² reduction in space, worth €11,250. An additional €18,750 was gained by eliminating unused areas and delivery carts, freeing up 25 m² of valuable space for pro-ductive use.

3.4. Ergonomics and Move Saving

The introduction of ergonomic racks and lifting aids has significantly improved worker safety and reduced physical strain. Previously, workers had to bend over into baskets to retrieve parts, which was both inefficient and posed safety risks as shown in Figure 6.



Figure 6. Ergonomics

The new material handling systems have decreased daily time loss by 12.5 minutes, resulting in an annual savings of €635. Additionally, repurposing idle lifting equipment has eliminated the need for unnecessary manual transport of heavy hose reels. The movements of the workers are drawn with a spaghetti diagram and are shown in Figure 7. A spaghetti diagram is a visual tool used in lean manufacturing to represent the flow of people, materials, or information within a workspace. It helps identify inefficiencies, such as excessive movement or transportation, by mapping the actual paths taken during a process. By analyzing the diagram, organizations can redesign their layouts to minimize waste and enhance operational efficiency.

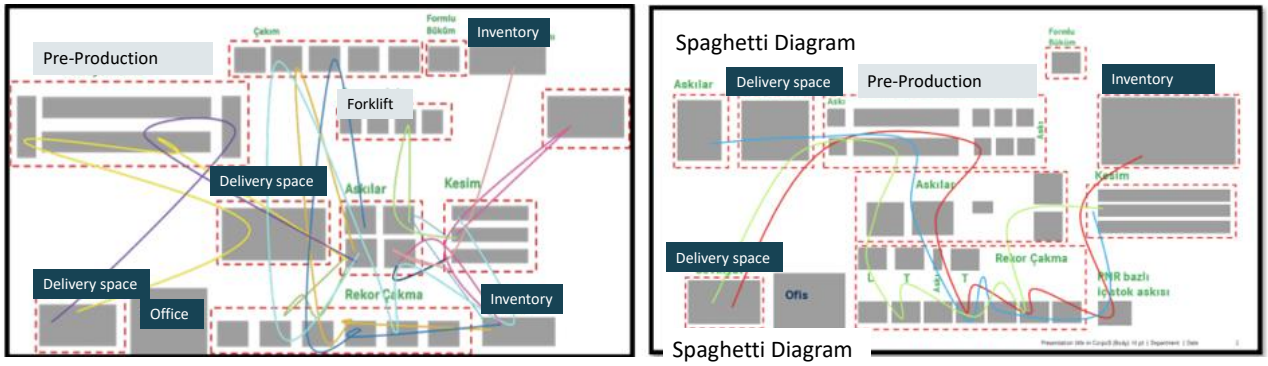


Figure 7. Move saving

Figure 7 illustrates that by adjusting the positioning and location of pre-production tables, workers were able to reduce their daily movement by 28 minutes, leading to annual savings of €1,423.

3.5. Poka-Yoke

To reduce internal defects resulting from incorrect crimping of similar parts, we implemented poka-yoke mechanisms. This included physically separating the crimping dies for components in Figure 8.

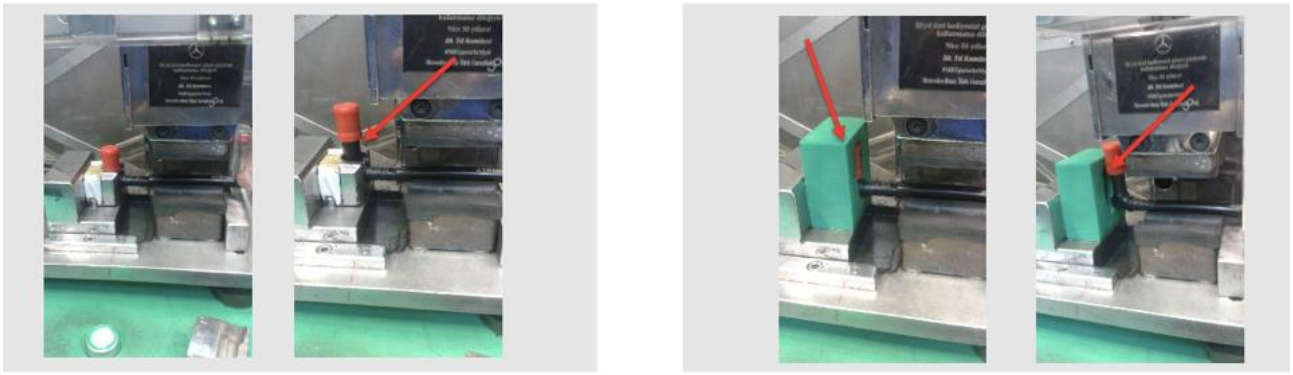


Figure 8. Poka-Yoke

As a result, 16 internal quality defects recorded between March and June were eliminated, thereby enhancing process reliability and overall product quality. To assess the effectiveness of the implemented improvement strategies, a comprehensive analysis was conducted, focusing on time savings, space utilization, and cost reduction across various production functions. The interventions targeted four key areas: material management, layout optimization, inventory and space utilization, and ergonomics. Each initiative was carefully evaluated for its measurable impact on operational performance, particularly in the pre-assembly area. Table 1 presents the quantified outcomes of these initiatives, highlighting the tangible benefits achieved through systematic process improvements.

Table 1. Space efficiency cost savings

	Time savings (hour)	Space savings (m²)	Cost savings (€)
Material Management Improvements			
Office workers	11.25		5,130
Operators	27.85		
Space efficiency		25	18,750
Layout and Flow Optimization			
Redesign process	0.21		635
Move improvement	0.48		1,460
Stock Reduction and Space Utilization			
Reduce inventory		15	11,250
Space efficiency		25	18,750
Ergonomics and Move Saving			
Handling	0.21		635
Move improvement	0.47		1,423
Total Savings			**€58,033**

The implementation of targeted improvement strategies across pre-assembly lines resulted in total annual cost savings of €58,033.

4. Conclusion

The article discusses the application of lean practices in pre-assembly lines to reduce time, space, and costs. The implementation of focused improvement strategies across pre-assembly lines led to total annual cost savings of €58,033. The most significant contributions came from improvements in material management, which led to a cumulative time savings of 39.1 hours—11.25 hours saved by office workers and 27.85 hours saved by operators. Additionally, 25 m² of space was freed up, resulting in €23,880 in cost savings. Notably, improvements in space efficiency alone accounted for €18,750 of this total. Layout and Flow Optimization significantly enhanced both time and cost efficiency. Although the time saved was modest at 0.69 hours, the redesign of the process and improvements in movement flows resulted in a total cost reduction of €2,095. This demonstrates the effectiveness of making small but targeted changes. Also contributed to both time and cost efficiency. Although the time saved was relatively modest (0.69 hours), redesigning the process and improving movement flows yielded a combined cost reduction of €2,095, demonstrating the effectiveness of small but focused changes. In the context of Stock Reduction and Space Utilization, space efficiency emerged as a crucial factor. By reducing physical inventory by 15 m² and improving overall space utilization by 25 m², we achieved significant cost savings of €30,000. This highlights the importance of floor space in manufacturing

environments. Additionally, our focus on Ergonomics and Move-Saving strategies—aimed at minimizing handling and unnecessary movement—resulted in time savings of 0.68 hours and cost benefits totaling €2,058. This study presents important managerial and theoretical implications. For production managers, it shows that low-cost lean tools, such as 5S and poka-yoke, can lead to significant operational gains when applied systematically. The case demonstrates that small, structured interventions can result in measurable savings in time, space, and labor, aiding decision-making in factory layout and resource planning. The study also emphasizes the need to align daily improvements with broader lean principles like waste elimination and continuous improvement. Future research could explore cross-industry comparisons and the long-term sustainability of these interventions to further enhance production management practices.

There are several avenues for future research that could further advance both academic knowledge and industrial applications. First, future studies could conduct cross-industry comparative analyses to determine whether similar lean interventions produce consistent benefits across different manufacturing sectors, such as automotive, electronics, and aerospace. Second, future research could incorporate quantitative simulation models, such as discrete event simulation or system dynamics, to predict the effects of lean initiatives before implementation. Additionally, further investigation is required into the human-centric aspects of lean practices, particularly in terms of ergonomics and operator well-being.

These ergonomic improvements not only increased efficiency but also likely contributed to better worker health and safety. This study filled the gap by providing a unique case study focused on space improvement. By doing so, this article is thought to contribute to both the academic literature and the industry.

Conflict of Interest Declaration

The author of the article do not have any conflict of interest.

References

Abdulmalek FA., Rajgopal J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. International Journal of Production Economics 2007; 107: 223-236.

Agrahari RS., Dangle PA., Chandratre KV. Implementation of 5S methodology in the small-scale industry: A case study. International Journal of Scientific & Technology Research 2015; 4: 180-187.

Ahmed S., Hassan MH., Taha Z. Implementation of 5S practices in the manufacturing companies: A case study. American Journal of Applied Sciences 2010; 7(8): 1182–1189.

Bateman N., David A. Process improvement programmes: A model for assessing sustainability. International Journal of Operations & Production Management 2002; 22(5): 515–526.

Bhamu J., Sangwan KS. Lean manufacturing: Literature review and research issues. International Journal of Operations & Production Management 2014; 34(7): 876–940.

Boysen N., Emde S., Hoeck M., Kauderer M. Part logistics in the automotive industry: decision problems, literature review and research agenda. European Journal of Operational Research 2015; 242(1): 107-120.

Braglia M., Gallo M., Marrazzini L., Santillo LC. Operational space efficiency (OpSE): a structured metric to evaluate the efficient use of space in industrial workstations. International Journal of Productivity and Performance Management 2024; 73(4): 1027-1049.

Burggräf P., Dannapfel M., Uelpenich J. Sustainability of factories in urban surroundings enabled by a space efficiency approach. In Proceedings of the Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference and the World Mass Customization & Personalization Conference 2021; 987-996.

Chien CF., Peng JT., Yu JT. Building energy saving performance indices for cleaner semiconductor manufacturing and an empirical study. Computers and Industrial Engineering 2016b; 99: 448-457.

Choong KK. The fundamentals of performance measurement systems: a systematic approach to theory and a research agenda. International Journal of Productivity and Performance Management 2014; 63(7): 879-922.

Crowe S., Cresswell K., Robertson A., Huby G., Avery A., Sheikh A. The case study approach, Medical Research Methodology 2011; 11(100): 1-9.

Dale BG., van der Wiele T., van Iwaarden J. Managing Quality 2007; Blackwell Publishing: Hong Kong.

Gapp R., Fisher R., Kobayashi K. Implementing 5S within a Japanese context: An integrated management system. Management Decision 2008; 46(4): 565–579.

Hertwig M., Lentes J. Smart eco-factory—Aspects for next generation facilities supporting sustainable and high-tech production. In Intelligent and Transformative Production in Pandemic Times: Proceedings of the 26th International Conference on Production Research 2023; 661-670.

Kilic HS., Durmusoglu MB. Advances in assembly line parts feeding policies: A literature review. Assembly Automation 2015; 35(1): 57-68.

Mun HS., Lagua EB., Hong SK., Ryu SB., Sharifuzzaman M., Hasan MK., ... Yang CJ. Energy-Efficient Technologies and Strategies for Feasible and Sustainable Plant Factory Systems. Sustainability 2025; 17(7): 3259.

Neely A., Gregory M., Platts K. Performance measurement system design: a literature review and research agenda. International Journal of Operations and Production Management 2005; 25(12): 1228-1263.

Shingo S. A revolution in manufacturing: The SMED system. 1986; Productivity Press: Cambridge.

Shraddha PD., Vipul VD., Merang LP., Akshay BK. Implementation of ‘5s’ technique in a manufacturing organization: A case study, International Journal of Research in Engineering and Technology 2015; 4: 136-148.

Shah R., Ward PT. Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance. Journal of Operations Management 2003; 21(2): 129-149.

Vipulkumar CP., Thakkar H. Review on implementation of 5s in various organization, International Journal of Engineering Research and Applications 2014; 4: 774-779.

Wan H., Frank CF. A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives. International Journal of Production Research 2008; 46(23): 6567-6584.

Womack JP., Jones DT. Lean thinking: Yalın Düşünce, (Çev: Oygur Yamak) 2016; Optimist Kitap: İstanbul.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1953-1963, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1953-1963, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Cu_2BaSnS_4/Polyanilin Kompozitlerinde CO_2 Adsorpsiyonu: Sinerjik Bir Yaklaşım

Süleyman Gökhan ÇOLAK[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Iskenderun Technical University, Hatay, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-4978-1499
*Corresponding author: sgokhan.colak@iste.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 18.02.2025
Kabul tarihi: 30.07.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Cu_2BaSnS_4
CO_2 adsorpsiyon
Polyanilin
Komposite

ÖZ

İletken polimerlerin kalkojenit bazlı malzemelerle birleştirilmesi, CO_2 adsorpsiyon performansını artırmada umut verici umutlar göstermiştir. Bu makalede, yeni bir Polianilin/Cu_2BaSnS_4 (PANI/CBTS) kompoziti, Cu_2BaSnS_4 gözenekleri içinde anilinin polimerizasyonu ile sentezlenmiş ve CBTS'nin PANI'de CO_2 alımı ve salınımı davranışı üzerindeki sinerjik etkisi araştırılmıştır. Tüm kompozit malzemeler çeşitli CBTS içerikleriyle hazırlanmış ve %5 CBTS ilavesi en umut verici sonuçları göstermiştir. BET yüzey alanı üzerinden yapılan çalışmalar, CBTS'nin PANI'ye eklenmesinin kompozit malzemenin gözenekliliğini yüzey özellikleriyle birlikte optimize ettiğini ve bozulmamış PANI'ye göre CO_2 adsorpsiyon kapasitesinin artmasına neden olduğunu ortaya koymuştur. Bu arada, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-ışını Kırınım (XRD) analizleri CBTS partiküllerinin kompozit içinde homojen dağılımını ve CBTS'nin kristal bütünlüğünü doğrulamıştır. CO_2'nin adsorpsiyon-desorpsiyon döngüleri, CBTS ilavesini takiben alımında keskin bir düşüş gösterdi çünkü PANI'nin mikro ve mezo gözenekleri CBTS partikülleri tarafından bloke edildi ve adsorpsiyon-desorpsiyon sürecini engelledi. Bununla birlikte, elde edilen PANI/CBTS5 kompoziti, CO_2 yakalama uygulamaları için nispeten umut verici bir performans göstermiş ve adsorban malzemelerde etkili ve sürdürülebilir gelişim arayışları için yeni yollar açmıştır.

CO_2 Adsorption in Cu_2BaSnS_4/Polyaniline Composites: A Synergistic Approach

Research Article

Article History:
Received: 18.02.2025
Accepted: 30.07.2025
Published online: 16.09.2025

Keywords:
Cu_2BaSnS_4
CO_2 adsorption
Polyaniline
Composite

ABSTRACT

The incorporation of conductive polymers with chalcogenide-based materials has shown promising prospects in enhancing CO_2 adsorption performance. In this paper, a novel Polyaniline/Cu_2BaSnS_4 (PANI/CBTS) composite was synthesized by the polymerization of aniline inside the pores of Cu_2BaSnS_4 for investigating the synergistic effect of CBTS incorporation on CO_2 uptake and release behavior in PANI. All composite materials were prepared with varied content of CBTS, and addition of 5% of CBTS showed the most promising results. The studies via BET surface area revealed that introduction of CBTS in PANI optimizes the porosity of composite material along with its surface properties and results in enhancement of CO_2 adsorption capacity over pristine PANI. Meanwhile, the Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) analysis confirmed the homogeneous dispersion of CBTS particles in the composite and the crystalline integrity of CBTS. The adsorption-desorption cycles of CO_2 showed a sharp decrease in uptake following the addition of CBTS because the micro- and mesopores of PANI were blocked by CBTS particles, impeding the adsorption-desorption process. However, the as-received PANI/CBTS5 composite demonstrated relatively

promising performance for CO_2 capture applications and opened up new avenues for the pursuit of effective and sustainable development in adsorbent materials.

To Cite: Çolak SG. CO_2 Adsorption in Cu_2BaSnS_4/Polyaniline Composites: A Synergistic Approach. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1953-1963.

1. Introduction

Since the Industrial Revolution, the intensive use of fossil fuels has led to severe air pollution and a rapid increase in CO_2 emissions, significantly contributing to global climate change. Reducing CO_2 emissions is crucial to mitigating environmental impacts and ensuring the sustainable use of resources (Nunes, 2023). One of the most effective strategies to reduce anthropogenic CO_2 emissions involves exploring cost-effective and scalable CO_2 capture technologies at emission sources. Among the various CO_2 capture techniques, sorption (absorption and adsorption), membranes, biological conversions, and cryogenic methods have emerged as prominent approache (Song et al., 2019; Lei et al., 2020; Zhang et al., 2020) s. Currently, aqueous amine solutions are the most used absorbents for capturing CO_2 from industrial emissions. However, despite their effectiveness, amine-based processes face challenges, particularly in operation and regeneration, which can raise economic and environmental concerns (Zaker et al., 2023).

Solid sorbents have garnered significant attention due to their selective adsorption of gases such as CO_2, H_2, and CH_4 (Gupta et al., 2015). Various classes of solid materials, including zeolites, silicas, porous carbons, porous organic polymers, covalent organic frameworks, and metal-organic frameworks, have been developed for CO_2 capture and conversion applications (Dziejarski et al., 2023). In recent years, transition metal sulfides have gained extensive research interest due to their excellent stability, unique band structures, and semiconductor properties, making them promising candidates for optoelectronic applications (Cao et al., 2023). One such material, copper barium tin sulfide (CBTS), has emerged as a potential photocathode material for CO_2 reduction due to its favorable conduction band position and suitable bandgap (~1.9 eV). CBTS, a quaternary compound semiconductor, is known for its exceptional light absorption capacity, low cost, environmental friendliness, and abundant availability (Khattak et al., 2019). Recent studies have considered CBTS films as a promising photovoltaic material for high-efficiency thin-film solar cells (Guo et al., 2019). Although CBTS has mainly been investigated for photovoltaic applications, its band structure and semiconductor properties make it a promising candidate for photocatalytic CO_2 reduction and hydrogen production. Despite these advantages, CBTS has not been sufficiently explored in the field of photocatalytic fuel production, particularly for short-chain carbon-based fuels such as CO, CH_4, H_2, and CH_3OH. The main challenge lies in the high carrier recombination rates and low photoelectric conversion efficiencies inherent to single semiconductor materials (Cao et al., 2023). To overcome these limitations, strategies such as incorporating co-catalysts, forming heterojunctions, modifying surface passivation layers, and adjusting material morphology have been explored (Cao et al., 2023).

Polyaniline (PANI) has gained significant research attention due to its simple synthesis method and high environmental stability. PANI has a decomposition temperature of approximately 400°C and contains abundant amine groups, which enhances its potential for CO_2 capture (Khalili et al., 2016). The nanostructures of PANI (such as nanowires, nanofibers, nanotubes, and nanorods) support rapid gas diffusion within the structure due to their small diameters, large surface areas, and high penetration depth for gas diffusion, thereby increasing CO_2 adsorption capacity (Fratoddi et al., 2015; Khalili et al., 2016). CO_2 molecules interact chemically with the surface of PANI through the partial formation of carbonates and bicarbonates, improving gas capture efficiency (Khalili et al., 2016). To increase the affinity of nanomaterials to CO_2 and thereby improve the separation efficiency, composites with polymers such as polyethyleneimine (PEI) and PANI have been synthesized. PANI, one of the well-known conductive polymers, has recently been loaded onto MIL-101(Cr), resulting in a significant increase in CO_2 selectivity against N_2 (Aliev et al., 2016). Although the amount of adsorbed CO_2 decreased slightly compared to pure MIL-101(Cr) (for example, the amount adsorbed at 1 bar decreased from 3.35 mmol/g to 2.26 mmol/g when PANI was loaded), CO_2 selectivity improved significantly. This decrease could be attributed to the substantial reduction in porosity due to the large amount of PANI loaded onto MIL-101(Cr); the BET surface area of MIL-101(Cr) decreased from 3580 m^2/g to 631 m^2/g after PANI loading. Additionally, a recent study reported that increasing the amount of PANI loaded onto mesoporous SBA-15 also enhanced CO_2 capture capacity (Boukoussa et al., 2018). These findings suggest that modifying nanomaterials with PANI is a feasible strategy to enhance CO_2 capture performance.

While PANI has previously been introduced into materials like MIL-101(Cr) to promote CO_2 selectivity, its combination with CBTS for CO_2 adsorption has not been documented. In this work, we concentrate on the influence of CBTS integration on the CO_2 uptake performance of PANI. The composite was created by polymerizing aniline inside the pores of CBTS, resulting in a hybrid material with possibly increased adsorption capabilities. By injecting 5% CBTS into PANI, we systematically investigated the influence of this alteration on CO_2 adsorption capabilities based on BET surface area analysis. This study intends to give insights into the synergistic impact of PANI and CBTS in composite materials and provides a fresh viewpoint on their potential for effective CO_2 capture applications.

Although both CBTS and PANI have individually demonstrated promising properties for CO_2 capture and photocatalytic applications (Khalili et al., 2016; Boukoussa et al., 2018; Khattak et al., 2019; Cao et al., 2023), their integration into a single composite material has not yet been reported. This study is the first to investigate the synergistic interaction between CBTS and PANI for CO_2 adsorption applications. By leveraging the high surface functionality and conductive polymeric nature of PANI (Khalili et al., 2016; Boukoussa et al., 2018) with the favorable band structure and chemical stability of CBTS (Khattak et al., 2019; Cao et al., 2023), the designed composite is expected to overcome the intrinsic limitations of the individual components, such as low photoelectric conversion efficiency in CBTS (Cao et al., 2023) and reduced porosity in PANI-based systems. Furthermore, the strategy of

polymerizing aniline within the CBTS framework not only provides improved CO_2 adsorption capacity but also offers a new approach for tuning the structural and textural properties of hybrid sorbents. This novel design concept broadens the application scope of CBTS beyond its traditional photovoltaic role and provides a rational pathway for developing multifunctional hybrid materials for next-generation CO_2 capture technologies.

2. Material and Methods

All compounds used in the production of the materials were used without any purification process. Copper chloride ($CuCl_2$) (Sigma Aldrich), Barium sulfate ($BaSO_4$) (Across Organics), Stann chloride ($SnCl_4$) (TCI Chemical) and Thiocarbamide ($CS(NH_2)_2$) (Across Organics) were supplied from commercial sources. In the production of PANI, Aniline hydrochloride (Thermo-scientific, purity: 99%) was used as monomer, ammonium persulfate (Acros Organics APS, purity: 98+%) was used as initiator, and sulfuric acid (95-98% wt) supplied by Sigma Aldrich was used as solvent. Water used in the synthesis process was purified with Millipore Milli-Q system (Millipore Inc., Ω = 18 MΩ cm).

2.1. Synthesis of CBTS

CBTS was produced using a conventional solution-based synthesis process that we used in our previous study (Güngör et al., 2024). First, the precursor solution was prepared by dissolving $CuCl_2$, $BaSO_4$, $SnCl_4$ and $(CS(NH_2)_2)$ in ethylene glycol solvent at a stoichiometric molar ratio=2:1:1:8. Then, the solution was transferred to a Teflon-coated stainless-steel autoclave to be heated at 200 °C 24h to ensure the formation of the basic kesterite phase. The obtained product was washed with ethanol and water using the centrifugation method and dried in a 90 °C oven (Ali et al., 2021; Levcenko et al., 2021) (Figure 1A).

2.2. Synthesis of PANI

The Aniline monomer (1 mmol) was dissolved in 10 mL of 1 M perchloric acid ($HClO_4$) solution and stirred for 10 min. In a separate beaker, ammonium persulfate (APS) (1 mmol) was added to 100 mL of 1 M $HClO_4$ and stirred for 10 min. APS solution was slowly added dropwise to the aniline solution under constant stirring at room temperature. The start of the polymerization reaction was understood when the solution turned dark green. The reaction mixture was cooled to 4 °C and left to react for 24 h to obtain pure PANI. The obtained product was collected by centrifugation, washed with ethanol and distilled water, and dried at 70 °C for 24 h (Chiou et al., 2008) (Figure 1B).

2.3. Synthesis of PANI/CBTS

The PANI synthesis method was followed with minor changes to synthesize PANI: CBTS nanocomposites prepared by doping 5% CBTS by mass (w/w, %)). Aniline and CBTS powder in 10 mL of 1 M $HClO_4$ were sonicated for 30 min. The APS solution prepared in another beaker was added

dropwise to the CBTS solution to ensure polymerization. The reaction mixture was cooled to 4°C and left to react for 24 h. The resulting product was added to ethanol and washed with distilled water and dried at 70 °C for 24 hours (Figure 1C). The obtained nanocomposites were coded as PANI: CBTS5.

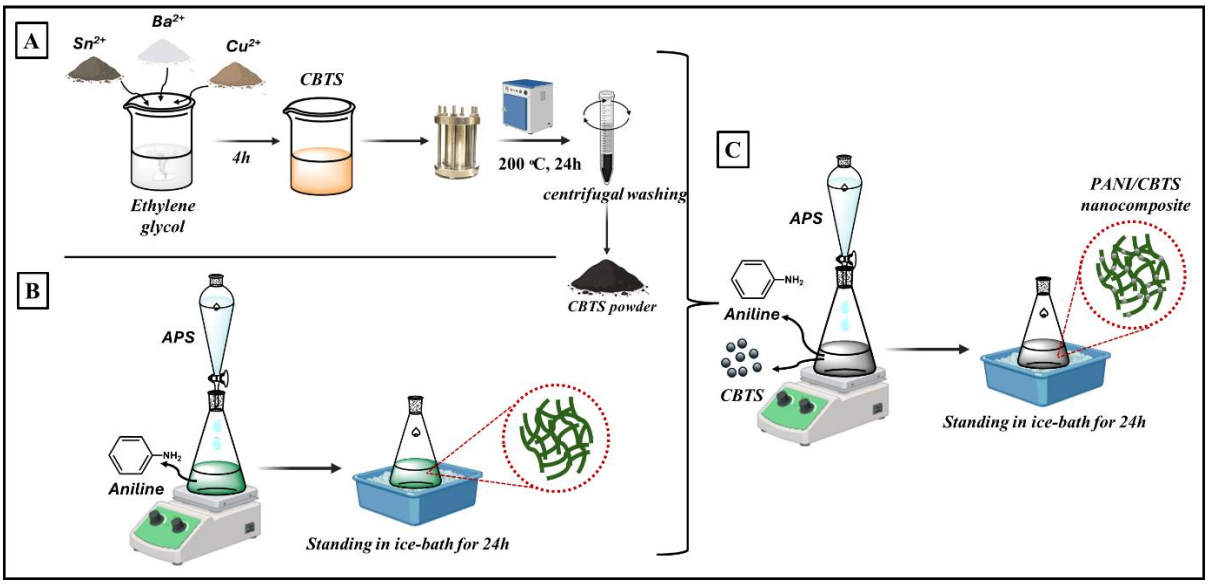


Figure 1. Schematic representations of the synthesis of (A) CZTS, (B) PANI, and (C) PANI/CBTS 10 nanocomposites.

3. Results and Discussion

The structural, morphological, and surface properties of the synthesized materials were thoroughly analyzed to evaluate their appropriateness for CO_2 collection and energy storage applications. The synergistic combination of PANI and CBTS in the PANI/CBTS5 composite was specifically examined to assess the impact of the material's microstructure, crystallinity, and surface characteristics on its overall performance. The findings derived from SEM, XRD, and BET investigations provide significant insights into the materials' structure, emphasizing their potential for advanced functional applications.

Figure 2 presents SEM images for the investigated materials. The SEM micrographs below show that the PANI nanomaterials exhibit a homogenous morphology with diameters within the range of 45-65 nm, as shown in Figure 2a. Such nanostructures form a cable-like structure that stretches along the longitudinal axis towards micrometer-scale lengths, hence increasing the porosity of the material. In Figure 2b, CBTS consists of well-defined crystalline particles with uniform and small dimensions. While in some regions, there has been the appearance of sphere-like particles; this is mostly attributed to the contribution of the solvent elements during the process of synthesis. The PANI/CBTS5 composite exhibited a homogenous dispersion of CBTS on the surface of PANI nanomaterials; Figure 2c indicates such dispersion. It is considered an essential factor for enhancement in the electrical conductivity of the material and its active surface area. While there is minor aggregation of particles in some regions, this does not detract from the general morphology of the composite.

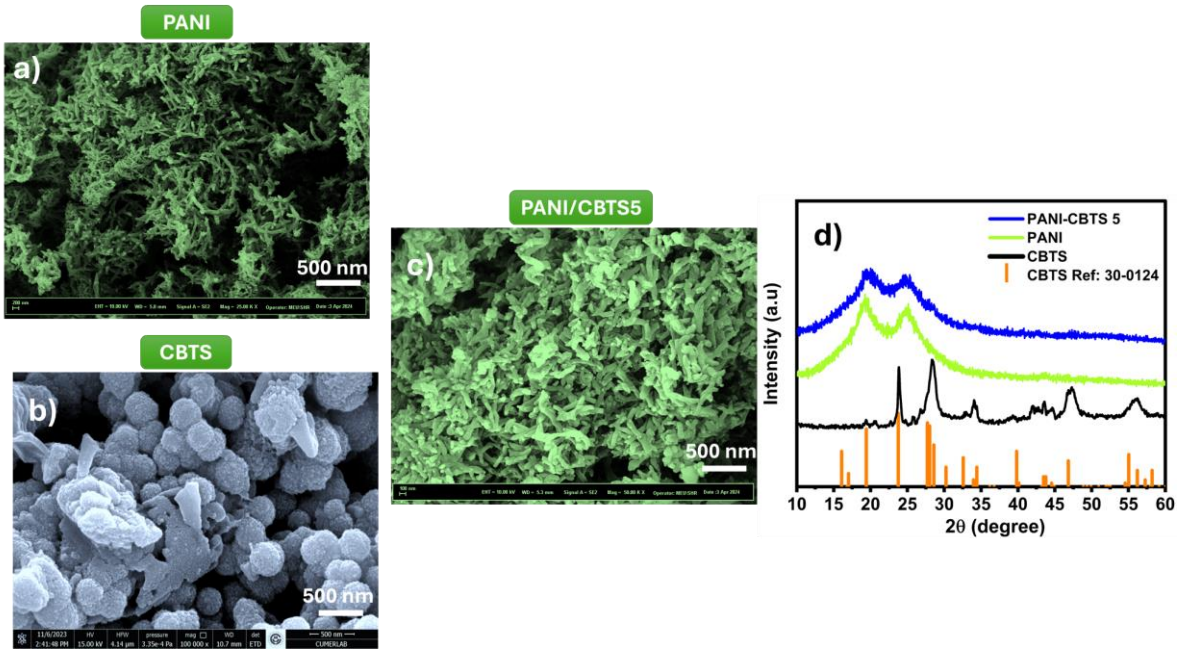


Figure 2. SEM images of PANI (a), CBTS (b), PANI/CBTS5 (c) and XRD graph (d).

Figure 2d shows the XRD patterns of the materials. The PANI XRD pattern exhibited a broad peak at $2\theta \approx 20°$, which confirms its amorphous nature because of the irregular structure of its molecular chain. In contrast, the XRD pattern of CBTS reveals sharp, strong diffraction peaks at 2θ positions of 27.4°, 45.5°, and 53.7° corresponding to characteristic crystallographic planes of CBTS. Such peaks fit well in the JCPDS PDF card, No. (30-0124), evidence for the highly crystalline nature of CBTS in support of the successful synthesis route (Crovetto et al., 2020; Ali et al., 2021; Teymur et al., 2022). The XRD pattern of the PANI/CBTS5 composite indicates the broad peak related to the amorphous nature of PANI and pronounced peaks typical of the crystalline phase of CBTS. This surely confirms that CBTS has been successfully incorporated into the PANI matrix. In addition, changes in peak intensities indicate homogeneous incorporation of material phases in this composite.

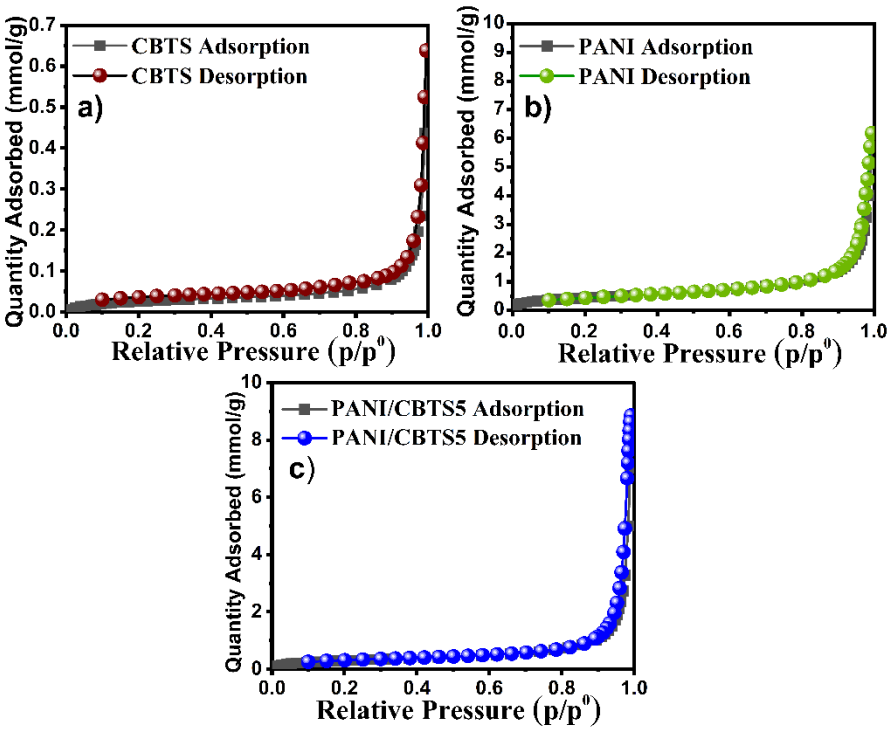


Figure 3. BET analysis results of PANI (a), CBTS (b) and PANI/CBTS5 nanomaterials.

The surface area and porosity of the materials in Figure 3 were studied by BET analysis. The PANI demonstrated a surface area of 35.3 m^2/g, aligning with its porous characteristics, and the pore size distribution was mostly mesoporous. For CBTS, the surface area was measured as 2.2 m^2/g, showing its thick crystalline structure and restricted porosity. The PANI/CBTS5 composite revealed a surface area of 24.35 m^2/g, somewhat lower than that of pure PANI. This decrease may be due to the uniform distribution of CBTS particles over the PANI surface, which may partly block PANI's pores (Zhou et al., 2018; Yu et al., 2023). Despite this, the active sites generated by CBTS particles greatly boost the composite's electroactive surface area. BET adsorption-desorption isotherms for all three materials (PANI, CBTS, and PANI/CBTS5) are typical of a Type-3 isotherm, which is suggestive of weak adsorbate-adsorbent interactions and implies the existence of non-porous or mesoporous structures. This sort of isotherm likewise corresponds with the measured surface areas and supports the structural features of the materials. The Type-3 isotherm behavior further demonstrates that the materials offer surface features suited for applications such as CO_2 collection and energy storage, where adsorption dynamics and active surface properties play significant roles (Liu et al., 2023).

Table 1. BET surface area and Horvath-Kawazoe (HK) cumulative PANI and CBTS nanocomposite pore volume.

Material	BET surface area (m^2/g)	HK cumulative pore volume (cm^3/g)
PANI	35.33	0.1391
CBTS	2.20	0.0107
PANI/CBTS5	24.35	0.1845

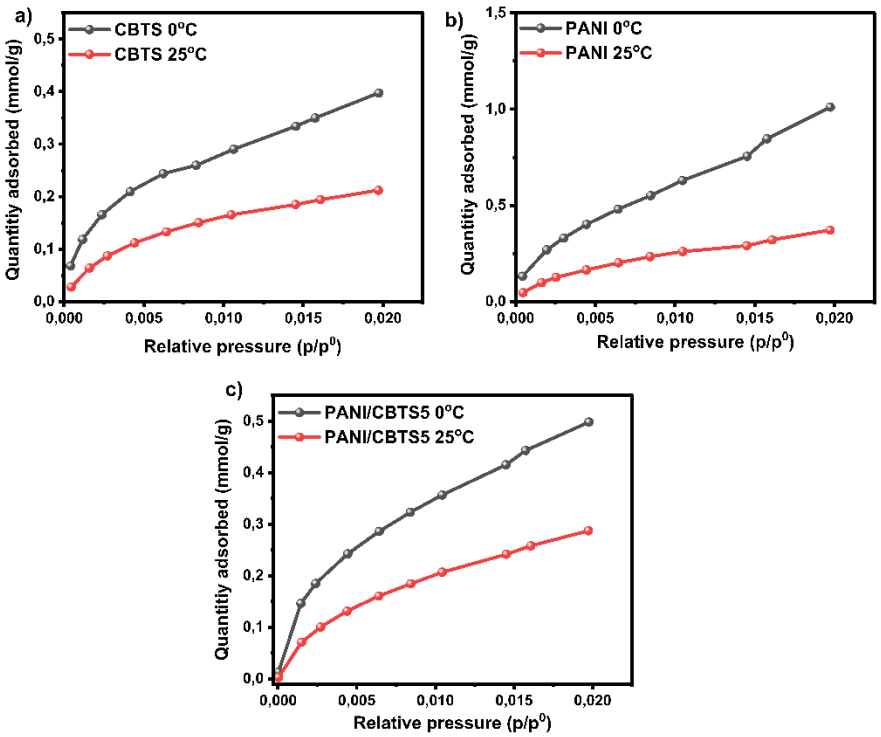


Figure 4. CO_2 adsorption analysis at 0°C and 25°C of PANI (a). CBTS (b) and PANI/CBTS5 (c) nanomaterials.

The CO_2 adsorption performance of PANI. CBTS. and PANI/CBTS5 nanomaterials was evaluated at 1 bar pressure using a surface area and porosity analyzer (BET). The corresponding results are provided in Figure 4 and Table 2. Among the materials. PANI. which exhibited the highest surface area. demonstrated superior CO_2 adsorption capacity at both investigated temperatures. Conversely. in alignment with the BET analysis. the PANI/CBTS5 nanomaterial showed a significant reduction in CO_2 adsorption. decreasing by approximately 50% at both temperatures. This decline can be attributed to the CBTS nanomaterial adhering to the micro- and mesopores of PANI. effectively blocking these pores and hindering the adsorption-desorption process (Liu et al., 2023). Overall. the CO_2 adsorption performance of the synthesized materials suggests their potential suitability as effective adsorbents for CO_2 Capture System (CCS) technologies.

Table 2. CO_2 adsorption analysis at 0°C and 25°C of PANI and CBTS nanocomposite pore volume.

Material	CO_2 Adsorption Analysis at 0°C mmol/g	CO_2 Adsorption Analysis at 25°C mmol/g
PANI	1.0110	0.3711
CBTS	0.3976	0.2122
PANI/CBTS10	0.4737	0.2568

4. Conclusions

In this work. Cu_2BaSnS_4/Polyaniline (PANI) composites were effectively synthesized and analyzed to examine their potential for CO_2 capture. The findings revealed that the addition of PANI into Cu_2BaSnS_4 improved both the surface area and porosity. considerably enhancing the CO_2 adsorption capability. BET surface area examination validated the advantageous porosity of the PANI/CBTS5 composite. while SEM and XRD tests demonstrated the homogeneous dispersion of CBTS particles on the PANI nanomaterial surface. These structural modifications led to increased CO_2 adsorption. especially under low-pressure conditions. which are critical for practical CO_2 capture applications.

The CO_2 adsorption performance of PANI. CBTS. and PANI/CBTS5 nanomaterials was evaluated at 1 bar pressure using a BET surface area and porosity analyzer. Among the materials. PANI. which exhibited the highest surface area. demonstrated superior CO_2 adsorption capacity at both investigated temperatures. Conversely. the PANI/CBTS5 nanomaterial showed a significant reduction in CO_2 adsorption approximately 50% at both temperatures. This decline is attributed to the CBTS nanomaterial adhering to the micro and mesopores of PANI. effectively blocking these pores and hindering the adsorption-desorption process.

Overall. the synergy between Cu_2BaSnS_4 and PANI provides a feasible method for creating materials with enhanced CO_2 adsorption capabilities. The synthesized materials demonstrated their potential suitability as effective adsorbents for CO_2 Capture System (CCS) technologies. Future research should focus on evaluating the long-term stability and reusability of the composite. as well as its performance under real-world conditions. Additionally. a comparative analysis of the CO_2 adsorption capabilities of PANI/CBTS composites with other known materials could yield valuable insights for further improvements. This study contributes to the development of sustainable and effective materials for CO_2 capture. which may play a crucial role in mitigating climate change by addressing industrial CO_2 emissions.

Acknowledgements

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Grant Numbers 123M826. The authors thank TUBITAK for their support.

Statement of Conflict of Interest

SGC declares that the study complies with all applicable laws and regulations and meets ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

SGC single-handedly planned and designed the synthesis and modification of Cu_2BaSnS_4 (CBTS) and performed the synthesis experiments. SGC alone collected and analyzed the experimental data. SGC solely planned and designed the CO_2 uptake studies. SGC independently designed and supervised the BET, SEM, and XRD analyses. The manuscript was written entirely by SGC.

References

Ali A., Ahmed S., Rehman J., Abdullah MR., Chen Bin., Guo B., Yang Y. Cu_2BaSnS_4 novel quaternary quantum dots for enhanced photocatalytic applications. Materials Today Communications 2021; (26): 101675.

Aliev SB., Samsonenko DG., Maksimovskiy EA., Fedorovskaya EO., Sapchenko SA., Edin VP. Polyaniline-intercalated MIL-101: Selective CO_2 sorption and supercapacitor properties. New Journal of Chemistry 2016; 40(6): 5306–5312.

Boukoussa B., Hakiki A., Nunes-Beltrao AP., Hamacha R., Azzouz A. Assessment of the intrinsic interactions of nanocomposite polyaniline/SBA-15 with carbon dioxide: Correlation between the hydrophilic character and surface basicity. Journal of CO_2 Utilization 2018; (26): 171–178.

Cao H., Zheng W., Zhang L., Feng W., Zhang H. Preparation of Cu_2ZnSnS_4@TiO_2 nanotubes by pulsed electrodeposition for efficiently photoelectrocatalytic reduction of CO_2 to ethanol. International Journal of Hydrogen Energy 2023; 48(83): 32342–32355.

Chiou NR., Lee LJ., Epstein AJ. Porous membrane-controlled polymerization of nanofibers of polyaniline and its derivatives. Journal of Materials Chemistry 2008; 18(18): 2085–2089.

Crovetto A., Xing Z., Fischer M., Nielsen R., Savory CN., Rindzevicius T., Stenger N., Scanlon DO., Chorkendorff I., Vesborg PCK. Experimental and first-principles spectroscopy of Cu_2SrSnS_4 and Cu_2BaSnS_4 photoabsorbers. ACS Applied Materials and Interfaces 2020; 12(45): 50446–50454.

Dziejarski B., Serafin J., Andersson K., Krzyżyńska R. CO_2 capture materials: a review of current trends and future challenges. Materials Today Sustainability 2023; (24): 100483.

Fratoddi I., Venditti I., Cametti C., Russo MV. Chemiresistive polyaniline-based gas sensors: A mini review. Sensors and Actuators. B: Chemical 2015; (220): 534–548.

Güngör A., Çolak SG., Alaş Çolak MÖ., Genç R., Erdem E. Polyaniline: Cu_2ZnSnS_4 (PANI: CZTS) nanocomposites as electrodes in all-in-one supercapacitor devices. Electrochimica Acta 2024; (480): 143924.

Guo H., MaC., Chen Z., Jia X., Cang Q., Yuan N., Ding J. The fabrication of Cu_2BaSnS_4 thin film solar cells utilizing a maskant layer. Solar Energy 2019; (181): 301–307.

Gupta K., Singh S., Ramachandra Rao MS. Fast, reversible CO_2 capture in nanostructured Brownmillerite $CaFeO_{2.5}$. Nano Energy 2015; (11): 146–153.

Khalili S., Khoshandam B., Jahanshahi M. Synthesis of activated carbon/polyaniline nanocomposites for enhanced CO_2 adsorption. RSC Advances 2016; 6(42): 35692–35704.

Khattak YH., Baig F., Toura H., Beg S., Soucase BM. Efficiency enhancement of Cu_2BaSnS_4 experimental thin-film solar cell by device modeling. Journal of Materials Science 2019; 54(24): 14787–14796.

Lei L., Bai L., Lindbråthen A., Pan F., Zhang X., He X. Carbon membranes for CO_2 removal: Status and perspectives from materials to processes. Chemical Engineering Journal 2020; (401): 126084.

Levcenko S., Teymur B., Mitzi DB., Unold T. Photoluminescence study of solution-deposited Cu_2BaSnS_4 thin films. APL Materials 2021; 9(11): 111108.

Liu K., Xie X., Yan J., Zhang S., Zhang H. An adsorption isotherm identification method based on CNN-LSTM neural network. Journal of Molecular Modeling 2023; 29(9): 1–13.

Nunes LJR. The rising threat of atmospheric CO_2: A review on the causes, impacts, and mitigation strategies. Environments MDPI 2023; 10(4): 66.

Song C., Liu Q., Deng S., Li H., Kitamura Y. Cryogenic-based CO_2 capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019; (101): 265–278.

Teymur B., Choubrac L., Hempel H., Gunawan O., Unold T., Mitzi DB. Influence of copper composition on $Cu_2BaSn(S.Se)_4$ solution-deposited films and photovoltaic devices with over 5% efficiency. ACS Applied Energy Materials 2022; 5(9): 10645–10656.

Yu H., Guo Q., Wang C., Cao G., Liu Y. Preparation and performance of PANI/CNTs composite coating on 316 stainless steel bipolar plates by pulsed electrodeposition. Progress in Organic Coatings 2023; (182): 107611.

Zaker A., Ben Hammouda S., Sun J., Wang X., Li X., Chen Z. Carbon-based materials for CO_2 capture: Their production, modification, and performance. Journal of Environmental Chemical Engineering 2023; 11(3): 109741.

Zhang W., Xie P., Li Y., Teng L., Zhu J. Hydrodynamic characteristics and mass transfer performance of rotating packed bed for CO_2 removal by chemical absorption: A review. Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020; (79): 103373.

Zhou SX., Tao XY., Ma J., Guo LT., Zhu YB., Fan HL., Liu ZS., Wei XY. Synthesis of flower-like PANI/g-C_3N_4 nanocomposite as supercapacitor electrode. Vacuum 2018; (149): 175–179.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1964-1974, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1964-1974, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Determination of Some Characteristics of Incubated Unfertilized Emu *(Dromaius novaehollandiae)* Eggs

Sema ALAŞAHAN [1*], Mehmet Hanifi YALÇIN[2], Aysel ERASLAN ŞAKAR[3]

[1]Department of Animal Science, Faculty of Veterinary Medicine, Hatay Mustafa Kemal University, Türkiye
[2]Department of Crop and Animal Production, Konya Ereğli Kemal Akman Vocational School, Necmettin Erbakan University, Türkiye
[3]Department of Genetics, Faculty of Veterinary Medicine, Hatay Mustafa Kemal University, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-1144-7786
[2]https://orcid.org/0000-0002-5117-7653
[3]https://orcid.org/0000-0002-9230-1622
*Corresponding author: alasahan@mku.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 01.08.2025
Accepted: 14.08.2025
Published online: 16.09.2025

Keywords:
Emu egg
Content amount
Shell characteristics
Emerald green

ABSTRACT

The study was conducted to determine the weight, shell characteristics, internal characteristics, and weight loss of unfertilized emu eggs before and after incubation. Eggs used in the study were collected from 2 female Emu raised in a private facility in Antakya district of Hatay in 2022. Egg weight was determined before incubation, and using this weight value, egg height, and egg width were determined with the formula. After incubation, the whole egg weight, content weight, and weight of the shell with uncleaned inner surface of the unfertilized eggs were determined. Pre-hatching egg weight, shell weight, shape index, and pore number were determined as 556.38 g, 59.57 g, 70.36%, and 25174.91-38767.41 number, respectively. After incubation, egg weight decreased and relative egg weight loss was 14.90%. As a result, the pre- and post-hatching characteristics of infertile Emu eggs were determined, and a contribution was made to a small number of scientific studies.

Kuluçkaya Yatırılan Döllenmemiş Emu (*Dromaius novaehollandiae*) Yumurtalarının Bazı Özelliklerinin Belirlenmesi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 01.08.2025
Kabul tarihi: 14.08.2025
Online Yayınlanma: 16.09.2025

Anahtar Kelimeler::
Emu yumurtası
İçerik miktarı
Kabuk özellikleri
Zümrüt yeşili

ÖZ

Çalışma Emuların dölsüz yumurtalarında kuluçka öncesi ve sonrasında ağırlık, kabuk özellikleri, iç ortam özellikleri ve ağırlık kaybının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada 2022 yılında Hatay ili Antakya ilçesinde özel bir tesiste yetiştirilen 2 adet dişi Emudan toplanan yumurtalar kullanılmıştır. Kuluçka öncesi yumurta ağırlığı tartılarak belirlenmiş, bu ağırlık değeri kullanılarak yumurta boyu ve yumurta eni formül yardımıyla tespit edilmiştir. Kuluçka sonrasında civciv çıkışı olmayan dölsüz yumurtaların bütün yumurta ağırlığı, içerik ağırlığı ve iç yüzeyi temizlenmemiş kabuk ağırlığı tartılarak saptanmıştır. Kuluçka öncesi yumurta ağırlığı, kabuk ağırlığı, şekil indeksi ve por sayısı verilen sırayla 556,38 g, 59,57 g, %70,36 ve 25174,91-38767,41 adet olarak belirlenmiştir. Kuluçka sonrası yumurta ağırlığı azalmış ve bağıl yumurta ağırlık kaybı %14,90 olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, dölsüz Emu yumurtalarının kuluçka öncesi ve sonrası özellikleri belirlenmiş, az sayıdaki bilimsel çalışmaya katkı verilmiştir.

To Cite: Alaşahan S., Yalçın MH., Eraslan Şakar A. Determination of Some Characteristics of Incubated Unfertilized Emu *(Dromaius novaehollandiae)* Eggs. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1964-1974.

.

1. Introduction

Reproduction starts at the age of 20-24 months in emu birds. Senthilkumar et al. (2014) reported that emus produced their first egg at the age of 764.1 days and that 84.87% of the eggs were laid in January-October. Regarding egg production, it was reported that emus can lay eggs from late fall/early winter to spring (Nußstein, 2009). The shell surface of emu eggs is uneven and has a dark green (emerald green) color and the shells are strong. The mean egg weight is 560 g and the shape index is 68% (Rao et al., 2008). It was stated that egg weight and morphological characteristics of emus were stabilized after the first two years of production and that the egg weight of emus did not change significantly after this age, although there was a numerical difference (Majewska et al., 2008). Usually, there are a few days between eggs and after 6-10 eggs are laid, male emus incubate. The incubation of emus lasts about 8 weeks, during which time the male emu birds are responsible for natural incubation (Davies, 1976).

There are different applications regarding the incubation period and incubation conditions of emu eggs. The incubation period of emu birds is influenced by both environmental and genetic factors. Genetic factors include hereditary embryo developmental rate, egg size, shell thickness, genetic diversity, and population differences. Embryo developmental rate is determined by the genetic material inherited from the parents. This genetic makeup affects the metabolic rate and cell division processes of the embryo, directly altering the incubation period (Dzialowski and Sotherland, 2004; Al-Obaidi and Al-Shadeedi, 2015; Koshiishi and Wada, 2024). Egg size and shell thickness are important genetic traits for oxygen uptake of the embryo and removal of waste materials. Larger eggs or thicker shells can limit gas exchange, slowing embryo development and prolonging incubation. In the study of Adewumi et al. (2008), it was reported that the chicks broke into the air cell on the 47th day of incubation, cracked the eggshell on the 49th day, and completed hatching on the 50th day. Senthilkumar et al. (2012) tested 36.39 ^{o}C, 36.67 ^{o}C, and 36.94 ^{o}C incubation temperatures for emu eggs, and the best hatching result was achieved at 36.39 ^{o}C. It was also stated that the increase in temperature increased the embryo mortality rate. The incubation temperature for the best hatching efficiency in emu eggs was reported as 36.39 ^{o}C and 24%-35% relative humidity (Minnar and Minnar, 1998), 36.39-36.67 ^{o}C and %40 (Stewart, 1992), 36.67 ^{o}C (Kinder, 1993) and 35.83-36.11 ^{o}C and 25.55-26.67 ^{o}C (Rao et al., 2005). Szczerbińska et al. (1999) applied a temperature of 36.4 ^{o}C and a humidity of 35% to emu eggs until transfer (day 48), and did not change the temperature in the last stage of incubation but increased the humidity by 10%. They also manually rotated the eggs 180 degrees every 6 hours until transfer. Different incubation conditions for fertilized emu eggs, hatching efficiency was reported to be between 36% and 77% (Dańczak and Majewska, 1999; Wierciñska and Szczerbiñska, 2005).

The study aimed to determine the weight, shell characteristics, internal characteristics, and weight loss of unfertilized emu eggs before and after incubation.

2. Materials and Methods

The eggs of the emu bird were obtained from a private facility in Antakya district in 2022. Each egg in the nest was collected on the day of laying and assigned an egg number on the shell. Individually labeled eggs were transferred to the Alternative Poultry Unit of Hatay Mustafa Kemal University for incubation on the day they were laid. The study was conducted on 10 infertile eggs. Egg shell surface was examined visually. Clean-shelled eggs were loaded into the incubator. The eggs were not disinfected.

2.1. Before Putting into The Incubator

Eggs delivered to the unit were visually examined. In this process, the cleanliness of the egg shell surface and cracks and fractures on the shell were detected (Figure 1). Eggs with shell defects were not incubated. Since the number of emu birds in the facility was small, each egg was placed in the incubator at different times. During incubation, the temperature and humidity of the incubator was 37.5 ºC and 60%, respectively, and all emu eggs were placed horizontally on the trays (Jagatheesan et al., 2014). Eggs were rotated once a day for 52 days and transferred to an incubator without rotation for 4 days after transfer. The same procedures were applied for each egg.



Figure 1. Image of the shell surface of an Emu egg examined before incubation

2.2. Identified Characteristics

Egg weight (g): Each individually numbered egg was weighed separately on the day of laying to determine the weight of the eggs when they were put into the incubator (Figure 2). A scale sensitive to 0.01 grams was used for weighing.



Figure 2. Image of egg weight determination before incubation

Based on the egg weight deteced, the following characteristics of the egg were identified using some formulas;

Table 1. Formulas used for properties

$\boldsymbol{Egg\ length = 14.7 \times (Egg\ weight)^{0.341}}$	Rahn and Paganelli, 1988
$\boldsymbol{Egg\ width = 11.3 \times (Egg\ weight)^{0.327}}$	Rahn and Paganelli, 1988
$\boldsymbol{Egg\ surface\ area = 4.835 \times (Egg\ weight)^{0.662}}$	Paganelli et al., 1974
$\boldsymbol{Pore\ count_1 = 304 \times (Egg\ weight)^{0.767}}$	Rahn and Paganelli, 1990
$\boldsymbol{Pore\ count_2 = 1041 \times (Egg\ weight)^{0.504}}$	Hoyt, 1979
$\boldsymbol{Pore\ count_3 = 3520 \times (Egg\ weight \div Incubation\ time)}$	Rahn and Ar, 1980
$\boldsymbol{Pore\ density_1 = (Pore\ count_1 \div Egg\ surface\ area)}$	Paganelli et al., 1974
$\boldsymbol{Pore\ density_2 = (Pore\ count_2 \div Egg\ surface\ area)}$	Paganelli et al., 1974
$\boldsymbol{Pore\ density_3 = (Pore\ count_3 \div Egg\ surface\ area)}$	Paganelli et al., 1974
$\boldsymbol{Shell\ weight = 0.0524 \times (Egg\ weight)^{1.113}}$	Rahn and Paganelli, 1989
$\boldsymbol{Egg\ shell\ index = (Eggshell\ weight \div Egg\ surfacevarea\ ) \times 100}$	Ahmed et al., 2005

After putting into the incubator: After incubation, unhatched eggs were cracked and visually examined (Figure 3).

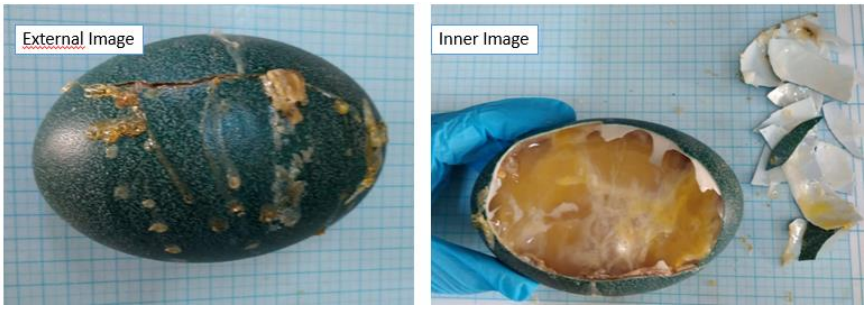


Figure 3. External and internal image of the unhatched egg after incubation

2.3. Characteristics Determined After Examination

Egg content weight and weight of the shell with uncleaned inner surface (g): The shell of the unhatched egg was removed piece by piece until the inner environment could be seen. Embryo development was checked visually (Figure 4). The cheesy content was transferred into a tared container and weighed. The shell pieces were then weighed to determine the weight of the shell with the uncleaned membranous inner surface.

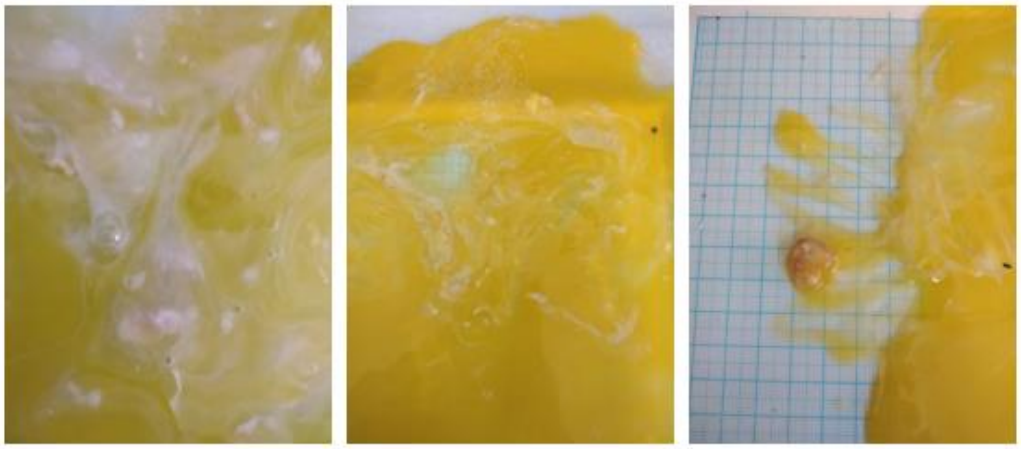


Figure 4. Internal image of the unhatched egg after incubation

Egg weight at the end of incubation (IEEW);

$$\text{IEEW (g)} = (\text{Egg content weight} + \text{Weight of membranous shell with uncleaned inner surface})$$

$$\text{Content Ratio (\%)} = (\text{Egg content weight} + \text{Egg weight at the end of incubation}) \times 100$$

Ratio of the membranous shell with uncleaned inner surface (MSW);

$$\text{MSW (\%)} = (\text{Weight of membranous shell with uncleaned inner surface/Egg weight at the end of incubation}) \times 100$$

The absolute and relative weight loss of the egg during incubation was determined;

$$Absolute\ weight\ loss\ (g) = (Egg\ weight - Egg\ Weight\ at\ the\ end\ of\ incubation)$$

$$Relative\ weight\ loss\ (\%) = \frac{(Egg\ weight - Egg\ weight\ at\ the\ end\ of\ incubation)}{Egg\ weight} \times 100$$

Mean shell thickness (mm): The whole egg was divided into three areas, as shown in Figure 6, and the shell thickness of 3 different areas from each of these areas was measured using calipers. The mean shell thickness was determined by taking the arithmetic mean of these measurements (Alaşahan and Günlü, 2012).

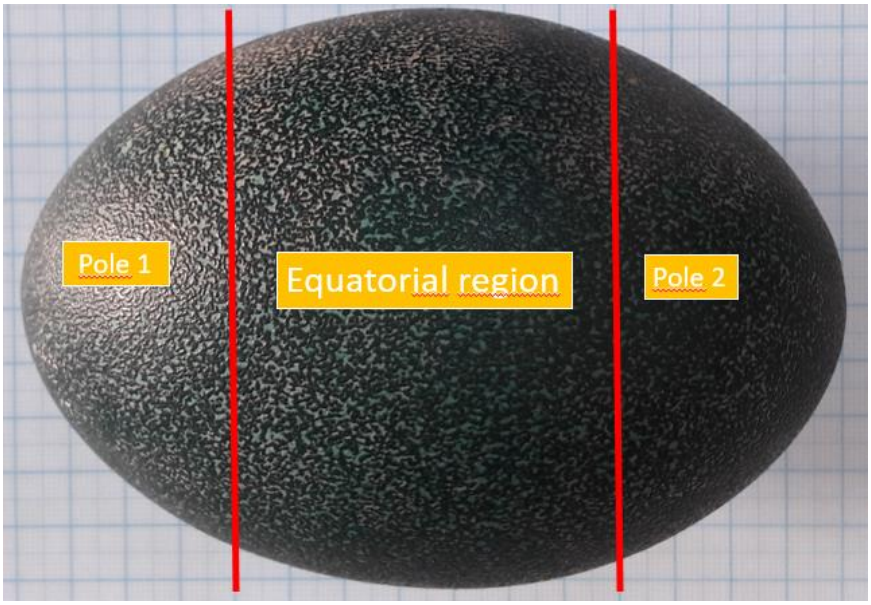


Figure 5. Areas used in the determination of egg shell thickness

2.4. Statistical Analysis

The raw data regarding the characteristics in the study were analyzed using Descriptive Statistical Analysis in the IBM SPSS Statistics 22 package program. Mean ± standard error values were presented.

3. Results and Discussion

The characteristics of the eggs determined before incubation were presented in Table 2. Egg weight, shape index, pore number, and pore density values were 556.38 g, 70.36%, 25174.91-38767.41 units, and 79.32-122.09 pores/cm^2, respectively. In addition, the egg surface area was 317.47 cm^2 and the shell weight was 59.57 g. In the study, the mean weight of emu eggs was determined as 556.38 g (Table 1). External characteristics such as egg weight, shell characteristics, and shape index are parameters that contribute significantly to the hatching of healthy chicks (Alabi et al., 2018). This egg weight value was similar to the values reported as 560 g by Rao et al. (2008) and 562.23 g by Senthilkumar et al. (2014). However, the mean egg weight obtained in current study was lower than the results obtained in other studies on emus. In some studies conducted on emus, egg weight was found to be 608.2 g by Szczerbiňska et al. (1999), 663 g by Majewska et al. (2008), 637 g by Jales (2007), 590.85-633.46 g by Senthilkumar et al. (2014), and 587.93 g by Quintero et al. (2022). However, current study finding was higher than the emu egg weight value of 517.28 g (Quintero et al., 2022).

Table 2. Some characteristics of Emu eggs before incubation

Characteristics	Mean
Egg weight (g)	556.38±11.77
Egg surface area (cm^2)	317.47±4.49
Egg length (mm)	126.87±0.93
Egg width (mm)	89.26±0.63
Shape index (%)	70.36±0.02
Elongation	1.421±0.00
Shell weight (g)	59.57±1.40
Shell Ratio (%)	10.70±0.03
Egg shell index (%)	18.75±0.18
Pore number 1 (units)	38767.41
Pore number 2 (units)	25174.91
Pore number 3 (units)	34972.46
Pore Density 1 (Pore number/cm^2)	122.09
Pore Density 2 (Pore number/cm^2)	79.32
Pore Density 3 (Pore number/cm^2)	110.09

Egg shape characteristics were determined as egg length (126.87 mm), egg width (89.26 mm), shape index (70.36%), and elongation (1.421) (Table 2). Egg length and width are two important values used in the calculation of the shape index and elongation values which define the egg shape. Therefore, measurements should be performed by experienced people. Egg shape index has been reported to affect unhatched egg weight after hatching and weight loss in unhatched eggs (Alasahan and Copur, 2016). Quintero et al. (2022) reported egg length as 118.14 - 126.25 mm and egg width as 83.1 - 85.9 mm for emu aged 2 and 7 years. In current study, the elongation value, which is determined by dividing egg length by egg width, was lower than the values of 1.50 and 1.55 in fertilized and unfertilized eggs in the study of Szczerbińska et al. (1999) and 1.48 in fertilized eggs in the study of Majewska et al. (2008). The shape index value was 35.2 - 66.07% in the study of Jales (2007), 68.24% (mean) in the study of Senthilkumar et al. (2014), and 68.05 - 70.33% in the study of Quintero et al. (2022).

There are pores on the surface of the egg shell of poultry. The number of the pores determined by three different formulas using the egg weight of emu were 38767.41, 25174.91, and 34972.46 units. In addition, the pore densities were 122.09, 79.32 and 110.09 pores/cm^2. The egg pore number and pore density of emus were reported as 14936-11607 units and 44.4-34.3 pores/cm^2 by Szczerbińska et al. (1999). The difference in pore number may be due to the difference in detection method.

Egg characteristics determined after incubation are presented in Table 3. At the end of incubation, egg weight, content weight, and weight of the shell with uncleaned inner surface were determined as 471.86 g, 391.62 g, and 80.24 g, respectively. Moreover, the weight lost in the egg during incubation was

14.90%. The mean shell thickness was 1.219 mm in the whole egg and there were numerical differences among areas. Eggs lose weight during incubation. In current study, unfertilized emu egg weight was 471.86 g, absolute weight loss was 84.52 g, and relative weight loss was 14.90%. In some of emu incubation studies, Buttemer et al. (1988) found that weight loss in natural incubation was 10% in 54.5 days; Szczerbiňska et al. (1999) found that weight loss was 13.37% in fertilized eggs and 10.75% in unfertilized eggs; Boopathi et al. (2012) reported as 9.48% in fertilized eggs and 11.53% in unfertilized eggs between 1-49 days; Perkas et al. (2024) found that the weight of unfertilized eggs was 481.0 g and weight loss was 17.6% in 46 days.

Table 3. Some characteristics of Emu eggs after incubation

Characteristics	Mean
Egg weight at the end of incubation (g)	471.86±12.37
Content weight (g)	391.62±9.34
Content ratio (%)	83.02±0.24
Weight of membranous shell with uncleaned inner surface (g)	80.24±3.12
Ratio of membranous shell with uncleaned inner surface (%)	16.97±0.24
Absolute weight loss (g)	84.52±18.58
Relative weight loss (%)	14.90±3.15
Pole1 shell thickness (mm)	1.252±0.01
Equatorial region shell thickness (mm)	1.221±0.01
Pole 2 shell thickness (mm)	1.183±0.00
Mean shell thickness (mm)	1.219±0.01

The shell protects the internal environment from the external environment in eggs. Eggshell characteristics such as color, thickness, and weight are important for hatching results. In this study, the weight of the shell with uncleaned inner surface in unfertilized eggs was 80.24 g, the ratio of the shell with uncleaned inner surface was 16.97%, and the mean shell thickness was 1.219 mm (1.183-1.52 mm). Majewska et al. (2008) reported a shell ratio of 13.96 (13.87-14.10%) and a membrane-free shell thickness of 1.17 mm (1.16-1.19 mm) in emu eggs, while Murugan et al. (2013) reported a shell thickness of 1.47 mm.

4. Conclusion

As a result, in the current study, some weight, thickness, and ratio characteristics of unfertilized emu eggs before and after incubation were determined by measurement or calculation. Shell pore number and pore density which were determined based on egg weight before incubation were higher than those determined in other studies. It has been determined that infertile emu eggs experience significant weight loss during incubation.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contribution

All authors contributed equally.

References

Adewumi AA., Ayodele IA., Lameed GA. The effect of incubator type on hatchability and chick survival of Emu (*Dromaius novaehollandiae*). Journal of Applied Sciences and Environmental Management 2008; 12(2): 13-15.

Ahmed AMH., Rodriguez-Navarro AB., Vidal ML., Gautron J., Garcia-Ruiz JM., Nys Y. Changes in eggshell mechanical properties, crystallographic texture andin matrix proteins induced by moult in hens. British Poultry Science 2005; 46(3): 268-279.

Alabi JO., Bhanja SK., Goel A., Mehra M., Fafiolu AO. Chicken embryogenesis: Influence of egg quality traits on embryo morphology. Indian Journal of Poultry Science 2018; 53(3): 324-330.

Alasahan S., Copur AG. Hatching characteristics and growth performance of eggs with different egg shapes. Brazilian Journal of Poultry Science 2016; 18(1): 001-008.

Alaşahan S., Günlü A. Determination of egg quality characteristics of different poultry species with digital image analysis. Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi 2012; 18(6): 979-986.

Al-Obaidi F., Al-Shadeedi S. Comparison study of egg morphology, component and chemical composition of ostrich, emu and native chickens. Journal of Genetic Environmental Resources Conservation 2015; 3(2): 132-137.

Boopathi V., Sivakumar T., Tensingh Gnanaraj P. Quality and hatching performance of Emu eggs. The Indian Veterinary Journal 2012; 89(1): 87-88.

Buttemer WA., Astheimer L., Dawson TJ. Thermal and water relations of emu eggs during natural incubation. Physiological Zoology 1988; 61(6): 483-494.

Dañczak A., Majewska D. Emu (Dromaius novaeholandiae) hatch success and controls on hatchlings survival. Advances in Agricultural Sciences 1999; 6(1): 25-30.

Davies SJJF. The natural history of the emu in comparison with that of the other ratite Pp. 109-120 in Proceedings of the 16th International Ornithological Conference, 1976; Canberra, Australia.

Dzialowski EM., Sotherland PR. Maternal effects of egg size on Emu (Dromaius novaehollandiae) egg composition and hatchling phenotype. Journal of Experimental Biology 2004; 207(4): 597-606.

Hoyt DF. Practical methods of estimating volume and fresh weight of bird eggs. The Auk 1979; 96: 73-77.

Jagatheesan PNR., Anna Anandh M., Senthil Kumar P. Effect of egg weight on hatching characteristics of Emu eggs. The Indian Journal of Animal Sciences 2014; 84(9): 992-994.

Kinder L. Emu today and tomorrow. University of Arkansas Emu Research, Nardin, Oklahoma 1993; 164-167.

Koshiishi Y., Wada K. Genetic structure and origin of emu populations in Japanese farms inferred from large-scale SNP genotyping based on double-digest RAD-seq. Scientific Reports 2024; 14(1): 6982.

Majewska D., Szczerbińska D., Tarasewicz Z., Ligocki M., Da Czak A., Nedzusiak LS., Sammel A. Age-related changes in the quality of Emu eggs. Arch. Geflügelk. 2008; 72(4): 168-173.

Minnar P., Minnar M. The emu farmers handbook. Induna Company, Groveton, 1998, Texas.

Murugan M., Tensing Gnanaraj P., Sivakumar T. Egg quality characteristics of Emu (Dromaius novaehollandiae). The Indian Journal of Field Veterinarians 2013; 9(1): 41-42.

Nußstein C. Untersuchung der Haltungsbedingungen von nandus (*Rhea americana*), emus (*Dromaius novaehollandiae*) und Straußen (*Struthio camelus*) in Süddeutschland, 2009.

Paganelli CV., Olszowka A., Ar A. The avian egg: Surface area, volume and density. The Condor 1974; 76: 319-325.

Perkas O., Pomraenke M., Greiser J., Porwoll V., Wiegand S., Kuehnel C., Winkens T., Freesmeyer M. Suitability of Emu (*Dromaius novaehollandiae*) eggs forin ovo imaging research as an alternative to conventional animal model: First experience and non-invasive investigation of physiological embryonal development oncomputed tomography. Acta Zoologica 2024; 106: 55-64.

Quintero JCP., Torres-Cordido KAA., Moreira YR., Rocha SS., Reis TL., de Moraes JE., Calixto LFL. Physicochemicaland morphometric characterization of eggs from emus (*Dromaius novaehollandiae*). South African Journal of Animal Science 2022; 52(1): 50-56.

Rao SN., Nageswarao AR., Prasad VLK., Reddy VR. Performance of Emu (*Dromaius novaehollandiae*) breeders. Indian Journal of Poultry Sciences 2005; 40: 213-218.

Rao SN., Nageswara AR., Prasad VLK., Reddt VR. Characteristics of the Emu (Dromaius novaehollandae) egg. Indian J. Anim. Sci. 2008; 78(12): 1423-1425.

Rahn H., Ar A. Gas exchange of the avian egg: Time, structure and function. Amer Zoology 1980; 20: 477-484.

Rahn H., Paganelli CV. Length, breadth, and elongation of avian eggs from the tables of Schönwetter. Journal of Ornithology 1988; 129: 366-369.

Rahn H., Paganelli CV. Shell mass, thickness and density of avian eggs derived from the tables of Schönwetter. Journal of Ornithology 1989; 130: 59-68.

Rahn H., Paganelli CV. Gas fluxes in avian eggs: Driving forces and the pathway for exchange. Comparative Biochemistry and Physiology Part A 1990; 95(1): 1-15.

Jales J. The Emu (*Dromaius novaehollandiae*): A review of its biology and commercial products. Avian and Poultry Reviews 2007; 18(1): 1-20.

Senthilkumar PS., Richard Jagatheesan PN., Anna Anandh M., Rajarajan G., Paramasivam A. Influence of incubation temperature on Emu (*Dromaius novaehollandiae*) egg hatchability. Indian Journal of Animal Science 2012; 82(5): 527-529.

Senthilkumar PS., Richard Jagatheesan PN., Anna Anandh M., Rajarajan G., Lurthureetha T. Production performances and egg characteristics of Emu (*Dromaius novaehollandiae*) birds. Indian Journal of Animal Research 2014; 48(1): 78-82.

Stewart JS. Ratite incubation. Proceedings of the Association of Avian Veterinarians, New Orleans, 1992; 336-339.

Szczerbiňska D., Danczak A., Tarasewicz Z. A relationship between Emu (*Dromaius novaehollandiae*) egg quality and hatching rate. Arch. Geflügelk. 1999; 63(4): 185-187.

Wierciñska M., Szczerbiñska D. The ostrich and Emu egg hatchability with reference to dead embryo analysis. Electronic Journal of Polish Agricultural Universies 2005; 8(4): 1-15.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1975-1992, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1975-1992, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Görüntü İşleme Tekniği ile Üretimde Süreç İzleme

Musa ÇALIŞKAN[1], Yunus KAYIR[2]

[1,2]Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara

[1]https://orcid.org/0009-0002-8587-0795
[2]https://orcid.org/0000-0001-6793-7103
*Sorumlu yazar: musa.caliskan@gazi.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 09.09.2024
Kabul tarihi: 06.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
Görüntü işleme
Üretim izleme
Endüstriyel üretimde kamera Kullanımı
Hata tespiti

ÖZ

Son yıllarda, üretimin kameralarla izlenmesi oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kamera ile üretimin izlenmesine yönelik yapılmış olan çalışmalar toplanmıştır. Özellikle son 10 yılda yayınlanan makaleler belirlenmeye çalışılmış olup, sektörlerine göre sınıflandırılmıştır. Ağırlık olarak plastik enjeksiyon kalıpçılığı ile yapılan üretimler ele alınmıştır. Görüntü işleme tekniklerinin kalite kontrolü, hata tespiti ve çıkan ürünün sınıflandırılması gibi alanlarda kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, bu tekniklerin avantajları ve dezavantajları belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, günümüz teknolojik gelişmelerine rağmen, görüntü işleme ile üretimi izleyecek sistemlerin ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olduğu, ancak üretimin izlenmesinde insandan kaynaklanabilecek olumsuz etkilerin (psikolojik durum, yorgunluk, hastalık, vb.) ortadan kaldırılmasıyla verimliliğin artırılmasında görüntü işleme tekniklerinin büyük katkı sağladığı ortaya konulmuştur.

Monitoring Production by Image Processing Technique

Reviews

Article History:
Received: 09.09.2024
Accepted: 06.04.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
Image processing
Production monitoring
Camera use in ındustrial production
Fault detection

ABSTRACT

In recent years, camera-based production monitoring has become quite common. This study compiles studies on camera-based production monitoring. We specifically identified articles published in the last 10 years and categorized them by sector. Production using plastic injection molding was the primary focus. The applicability of image processing techniques in areas such as quality control, defect detection, and product classification was evaluated. The study aimed to identify the advantages and disadvantages of these techniques. In conclusion, despite current technological advancements, the initial installation costs of image processing-based production monitoring systems are high. However, image processing techniques contribute significantly to productivity by eliminating potential negative human-induced effects (psychological states, fatigue, illness, etc.) during production monitoring.

To Cite: Çalışkan M., Kayır Y. Görüntü İşleme Tekniği ile Üretimde Süreç İzleme. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1975-1992.

1. Giriş

Üretim süreci, tüm girdilerin bir dönüşüm sürecinden geçirilerek son ürün haline getirilmesinde gerekli olan zamandır. Bu süreç genellikle belirli bir ürün veya hizmetin tasarımından başlar malzeme temini, üretim, kalite kontrol, paketleme ve depolama, dağıtım ve lojistik, satış ve pazarlama en son da nihai tüketiciye ulaşıncaya kadar devam eder (Barış ve Özek, 2019). Bu adımlar genel bir endüstriyel üretim sürecini temsil eder, ancak her endüstri ve işletme kendi özel ihtiyaçlarına ve üretim süreçlerine göre farklılık gösterebilir. Örneğin, otomotiv endüstrisi, gıda endüstrisi veya elektronik endüstrisi gibi farklı endüstrilerde farklı üretim süreçleri kullanılabilir. Üretim süreçlerinde çeşitli olumsuzluklar üretimde verimliliği düşürür. Bu olumsuzluklar insandan veya makinadan kaynaklı yaşanabilir. İnsandan kaynaklı hataların makineden kaynaklı olan hatalardan daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur (Gerger, 2019). İnsandan kaynaklı hatalar için, uykusuzluk, dikkatsizlik, dalgınlık ve kendine aşırı güven gibi nedenler sayılabilir. Üretimde yaşanacak olan her bir aksamanın veya hatanın firmaya bir maliyeti vardır. Bu maliyetlerin önüne geçebilmek için firmalar, üretim süreçlerini baştan sona kontrol altına almaya çalışmaktadırlar. Üretim süreçlerinin hatasız ve hızlı izlenebilmesi için yeni yöntemler geliştirilmektedir. Bu yöntemlerde genellikle çeşitli sensörler ve kameralar kullanılmaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte dijitalleşme ve otomasyon sistemlerinin yaygınlaşması kameralarında etkin olarak kullanımını artırmıştır. Arka planda yapay zekâ algoritmaları oluşturulan kameralara, üretim esnasında ya da sonrasında alınan görüntülerden görüntü işleme teknikleri kullanılarak ihtiyaca göre istenilen görüntüyü elde edip süreçlerdeki olumsuzlukları tespit edebilme yeteneği kazandırılmıştır. Bazı durumlarda üretimde aksaklık yaşanmaması için üretim izlenirken bazı durumlarda ise kalite kontrol, paketleme ve lojistik vb. diğer süreçlerde de izleme yapıldığı görülmüştür.

Bu çalışmada, imalat, tekstil, enerji, gıda gibi sektörlerdeki üretimlerde kamera kullanımına yönelik yapılmış olan çalışmalar toplanmıştır. İmalat sektöründeki çalışmalar ağırlık verilmiştir. Çalışmalar, üretimdeki hataların tespiti, kalite kontrolü, ürün sınıflandırması, gibi süreçlerin takip edilmesinde kamera kullanımı, görüntü işleme teknikleri, avantajlar ve dezavantajları gibi açılardan değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Endüstriyel üretimlerde süreç izleme sektörüne göre farklı yöntemlerle uygulanır ve çeşitli faydalar sağlar. Genellikle bu yöntemler, sektörün ihtiyaçlarına, karmaşıklığına ve özel gereksinimlerine bağlı olarak şekillenir. Günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılan teknolojik çözümlerden biri, yapay zekâ destekli kameralı sistemleridir. Bu sistemler, üretim süreçlerini otomatikleştirerek insan hatalarını azaltabilmektedir. Özellikle imalat, tekstil, gıda ve enerji gibi farklı sektörlerde, bu tür kameralı sistemlerin kullanımı giderek artmaktadır.

Bu bölümde ilk olarak görüntü işleme teknolojisi ve yöntemleri kısaca bilgi verilecektir. Sonrasında ise, kameralarla yapılan üretimlerin izlenmesine yönelik toplanan makaleler değerlendirilecektir.

Değerlendirmeler, belli başlı sektörler (imalat, tekstil, gıda ve enerji gibi) açısından tek tek ele alınacaktır.

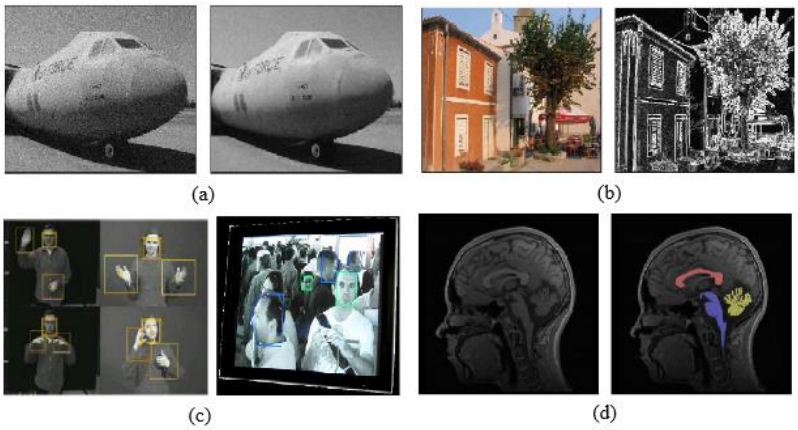
2.1. Görüntü İşleme Teknolojisi

Görüntü işleme teknolojisi, dijital görüntüler üzerinde bilgisayar tabanlı işlemler yaparak bilgi çıkarımı veya görüntüleri iyileştirmeyi sağlayan bir alandır. Görüntü işleme, kamera ile elde edilen görüntünün piksel yoğunluk değerlerini birtakım işlemlerden geçirerek yeni değerler ile istenilen görüntüyü elde etmeye çalışır. İçerisinde matematik ve bilgisayar bilimini barındıran bu tekniğin uygulama alanları ise oldukça geniştir (Samtaş ve Gülesin, 2011). Görüntü işleme teknolojisi, birçok farklı yöntem ve algoritma kullanır. Bu teknolojinin kullanım alanlarında tıbbi görüntüleme, güvenlik, otomotiv, endüstriyel kontrol, robotik, tarım ve daha fazlası bulunur. Endüstriyel üretimlerde taleplerin artışı dijitalleşme ve otomasyon sistemlerine ihtiyacı doğurmuştur. Örneğin devre kartlarındaki (PCB) hataları algılamak için kurulan görüntü işleme tabanlı bir makine görüsü sistemiyle PCB üzerindeki deliklerin yerini, sayısını ve eksikliklerini tespit etmek için bir referans görüntü ile test görüntüsü sürekli eşleştirme yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Gerçek zamanlı bir uygulama olan bu sistem, %2 gibi çok düşük hata oranıyla firmaya yüksek hassasiyet ve hız sağlamıştır (Baygin ve ark., 2017). Kurumsal firmaların birçoğu üretim süreçlerinde ihtiyaçlarına uygun kameralı görüntü işleme teknolojileri kullanarak insanlar, makineler ve bilgisayarlar arasındaki entegrasyonu sağlamışlardır. Bu sayede rekabet güçlerini üretim kapasitelerini artırmış ve hataları azaltarak fire miktarlarını azaltmışlardır. Geleneksel yöntemlerde insan denetiminin maliyetli, zaman alıcı ve hata oranının yüksek olduğu işler için kamera tabanlı sistemlerin kurulması oldukça etkili bir yatırım olarak görülmektedir. Örneğin, bir insanın dakikada 200 çipi pozisyonu, varlığı/yokluğu, yönü ve üzerindeki karakterlerin doğruluğu açısından kontrol etmesi pek mümkün değildir. Ancak, görüntü işleme algoritmalarının çalıştırıldığı kameralı bir sistemin, 10.000 çip üzerinde %99,98 doğrulukla çalışabildiği bilinmektedir (Lee ve ark., 2016). Ürünler arasında istenmeyen maddeler deforme olmuş ürünler gibi fiziksel yönüyle sorun teşkil eden ürünler kamera ile görüntü işleme teknolojisi kullanılarak kolayca, zaman kaybı yaşanmadan tespit edilebilir (Demirkıran, 2021). Yüksek çözünürlüklü kameralar sayesinde mikron düzeydeki hassas ölçümleri bilene %92-99 doğruluk oranıyla yapabilir (Ülkü ve ark., 2015).

2.2. Görüntü İşleme Yöntemleri

Resimlerde filtreleme, kenar algılama, nesne tanıma, öznitelik çıkarma, şablon eşleştirme, morfolojik işlemler, öğrenme tabanlı yöntemler, hızlandırılmış işleme gibi işlemler görüntü işlemenin temelini oluşturur. Görüntü işleme yaparken gerekli sensör ve lens seçimi doğru bir şekilde yaptıktan sonra ihtiyacımıza uygun tekniği seçmek önemlidir (Güzelce ve Bayrak, 2021). Bazı çalışmalarda ise birçok algoritma denenir ve başarı oranı yüksek olan teknik seçilir. Aşağıda Şekil 1'de görüntü işleme teknikleri ve birkaç örnek resim bulunmaktadır.

- Filtreleme: Görüntülerdeki gürültüyü azaltmak veya önemli özellikleri vurgulamak için filtreler kullanılır. Örneğin, düşük geçiren filtreler, kenar algılama filtreleri ve medyan filtreleme gibi çeşitli filtreler bulunur.
- Kenar Algılama: Görüntülerdeki nesnelerin kenarlarını tespit etmek için kullanılır. Kenar algılama algoritmaları, nesneler arasındaki geçişleri belirlemek için piksel yoğunluklarında ani değişiklikleri tespit eder.
- Nesne Tanıma: Görüntüyü farklı parçalara veya bölgelere ayırma işlemidir. Örneğin, nesneleri tanıma veya bir görüntüdeki farklı nesne türlerini ayırt etme amacıyla kullanılabilir.
- Öznitelik Çıkarma: Görüntüdeki önemli özellikleri belirlemek için kullanılır. Renk, şekil, dokular gibi özellikler öznitelikler olarak çıkarılabilir ve daha sonra tanıma veya sınıflandırma için kullanılabilir.
- Şablon Eşleştirme: Bir görüntüde belirli bir deseni veya nesneyi bulmak için kullanılır. Şablon eşleştirme, bir şablon görüntüsünü hedef görüntüde arar ve eşleşen bölgeleri belirler.
- Morfolojik İşlemler: Görüntüdeki şekil ve yapıları değiştirmek için kullanılır. Erozyon, genişleme, açma ve kapanma gibi temel morfolojik işlemler bulunur.
- Öğrenme Tabanlı Yöntemler: Makine öğrenimi ve derin öğrenme gibi yöntemler, karmaşık desenleri tanıma, nesneleri sınıflandırma ve görüntü segmentasyonu gibi görevleri gerçekleştirmek için kullanılabilir.
- Hızlandırılmış İşleme: GPU veya paralel hesaplama gibi teknolojiler kullanılarak görüntü işleme algoritmalarının hızlandırılması sağlanır.



Şekil 1. (a) Filtreleme; (b) Kenar algılama; (c) Nesne tanıma; (d) Öznitelik çıkarma (Kaynak: Gonzalez ve Woods, 2008)

2.3. İmalat Sektöründe Uygulanışı

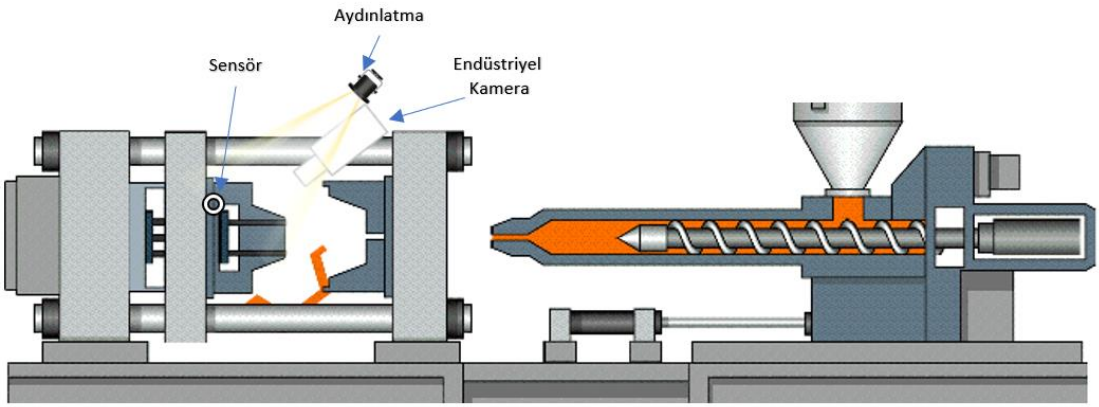
İmalat denildiğinde otomotiv, elektronik, kimya, metal işleme ve mobilya gibi daha birçok alt sektör akla gelir. Çok geniş bir sektör olduğundan imalat sektörüne yönelik olarak ayrılan makaleler, plastik

enjeksiyon, metal işleme, otomotiv, işlenmiş parça yüzey kontrolü ve 3D lazer teknolojisi ile üretim gibi alt sektörlere ayırarak ele alınmıştır.

2.3.1. Plastiğin enjeksiyon ile üretiminde uygulanışı

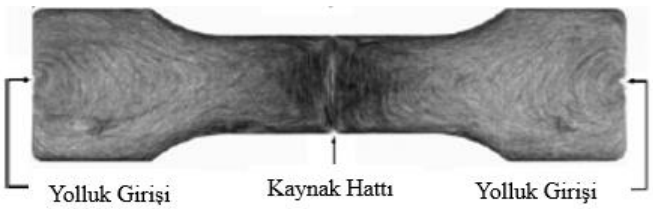
Günümüzde plastik (polimerik); ambalajlama, elektronik, otomotiv, inşaat mobilya, mutfak ekipmanları giyim ve ayakkabı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Günlük hayatımızda kullandığımız ürünlerin büyük bir bölümü plastik maddelerden üretilmektedir. Polimerik ürünlerin üçte birinden fazlası günümüzde enjeksiyon kalıplama metodu kullanılarak üretilmektedir (Osswald ve Hernández-Ortiz, 2006). Üretim esnasında ya da sonrasında makineden veya insandan kaynaklı hatalı ürün oluşabilmektedir. Bu hataları en aza indirebilmek için üretim sürecinin kontrolüne ihtiyaç vardır. Genellikle, üretim süreçlerini izleme, basit sistemler, var/yok (on/off), sensörler, gibi teknolojilerle yapılagelmiştir. Gelişen teknoloji dijitalleşme ve bilişim sanayide bir dönüşüm başlatmıştır. Endüstri 4.0 ile makinelerin üretim sürecinde birbirleriyle insan kontrolü olmadan etkileşime girdiği akıllı üretim sistemleri (yapay zekâ) ortaya çıkmıştır (Bağcı, 2018). Günümüzde birçok işletme üretim maliyetlerini azaltarak kapasitelerini artırabilmek için üretimde hatalı ürün oranını ve çevrim sürelerini azaltmayı yani verimliliği artırmayı ön planda tutmaya çalışmaktadır. Her zaman çevrim süresini kısaltmak işe yaramayabilir. Plastik enjeksiyon kalıpçılığıyla üretilen bir ürünün enjeksiyon parametrelerinden enjeksiyon hızını artırdığımızda çevrim süresi kısalır ancak belirlenen parametrelerin kalıplanan parçalar üzerinde mekanik özelliklerine etkisinin olduğu bilinmektedir. Yapılan bir çalışma, enjeksiyon hızının optimum değerden fazla olması moleküller arası kayma gerilmelerini arttırdığından birbirleriyle olan bağ kuvvetlerinde zayıflama meydana getirdiği, dolayısı ile parça dayanımını olumsuz yönde etkilendiğini göstermiştir (Kurt ve ark., 2009). Termoplastiklerin kalıplanması esnasında çeşitli kamera veya sensörlerle kalıp içi izleme yapılabilmektedir. Elde edilen verilerin üzerine yapay zekâ algoritmalarının uygulanmasıyla, optimum enjeksiyon ayarlarının daha hızlı ve doğru bir şekilde bulunabilir. Bu sayede üretim seyri ve sürdürülebilirlik açısından üretime fayda sağlanabilir (Ogorodnyk ve Martinsen, 2018). Bu yüzden enjeksiyon parametre ayarlarının doğru yapılması önemlidir. Optimum parametre ayarı için enjeksiyon kalıplama süreç kontrolüne ihtiyaç vardır. Kalıp içi izleme araçları ve yöntemlerine kapsamlı bir bakış açısı sunmayı hedeflenen bir çalışmada, yerleşik süreç izleme tekniklerinin standart sensörler ve yeni geliştirilen sensörlerle yapılan ölçümlerin sıcaklık, basınç gibi parametrelerinin kalıplanan ürünün çarpıklık veya büzülme gibi etkilenmesi ortaya konmuştur (Ageyeva ve ark., 2019). Kalıp içi ultrasonik sensörlerin geleneksel sıcaklık ve basınç sensörlerine göre avantajlı olup/olmadığını yönde yapılan bir çalışmada, ultrasonik sensörlerin polimerdeki kristallik derecesinin ürünün kesme, çekme dayanımı gibi fiziksel özelliklerine duyarlı olduğu gösterilmiştir (Kariminejad ve ark., 2021). Sensörlerin yanı sıra Şekil 2'de gösterildiği gibi kameralar ile de üretim izleme yapılabilmektedir. Bir çalışmada kompozit olarak üretilen yan yolcu hava yastığına ait bir filenin, kalıp

içi doğru yerleşimini görüntü işleme tekniği ile kameralı bir sistem tarafından kontrol edilerek üretimde hatayı azaltıp her baskıda kaliteli üretim hedeflenmiştir (Dallı ve Çakır, 2022).



Şekil 2. Plastik enjeksiyon makinesi ve kalıp içi izleme araçları (Kaynak: https://ecfpmould.com/how-is-the-injection-molding-processed/ , Erişim Tarihi: 08.01.2025)

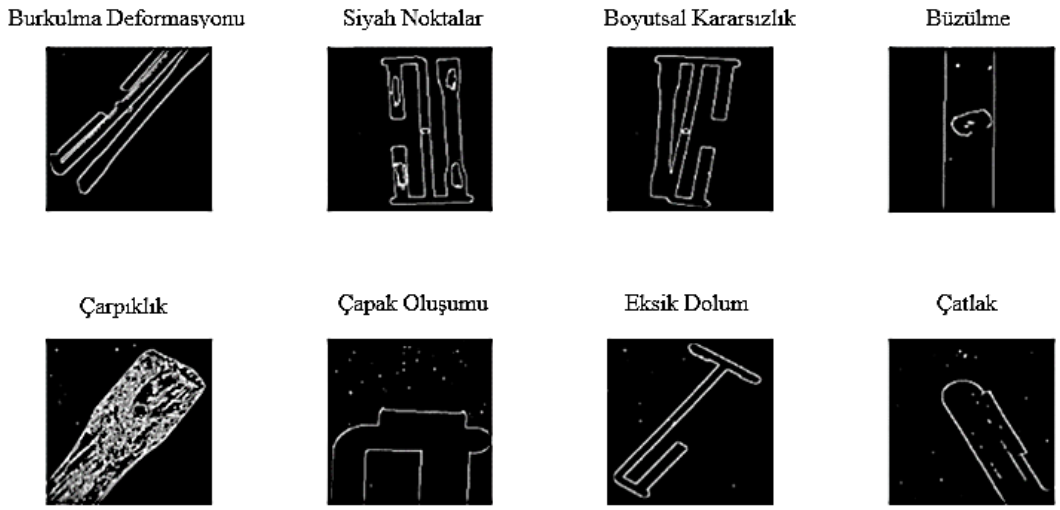
Kameralı bu sistemler, kalıplama öncesi kontrolde kullanıldığı gibi kalıplama sonrası kontrollerde de kullanıldığı görülmüştür. Bir çalışmada, fiber takviyeli polimerik ürünlerin enjeksiyon metodu ile üretilmesi esnasında fiber yönelimlerini belirlemek amacıyla görüntü işleme tekniğinden yararlanılmak istenilmiştir. Çalışma sonucunda, düşük lif içeriğinde sistemin tutarlı olduğu, yüksek lif içeriğinde ise karasız olduğu görülmüştür (Kim ve ark., 2001). %50 fiber takviyeli bir polipropilen (PP) malzemenin 4 mm kalınlığındaki dayanım test çubuğu üzerinde 2 kapılı bir dolum gerçekleştirilen başka bir deneysel çalışmada ise, Şekil 3'teki resimde X-ray ışını altında alınan görüntüsü üzerine Sobel pixel yoğunluk farkı uygulanmış ve fiber yönelimleri matematiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Görüntü işleme teknikleri fiber yönelimlerinin nicel analizini mümkün kılarak, kaynak hattının ürün üzerindeki mekanik özelliklere etkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlanmıştır (Kim ve ark., 2011).



Şekil 3. X-ray Işını altındaki görüntüsü (Kaynak: Kim ve ark., 2011)

Bilindiği gibi, Polimerik malzemelere mikro partikül ve nano partikül malzemeler katılarak ürünlerin fiziksel veya kimyasal özelliklerine katkı sağlanabilmektedir. Plastik telefon kılıfının enjeksiyonla üretimi sonrasında yüzeyindeki kusurların kamerayla görüntü işleme tekniği kullanılarak belirlenmesi ve Titanyum Dioksit (TiO_2) mikro partikülünün malzemeye karıştırılarak enjeksiyonu sonrası yüzeydeki kusurlarda azalma miktarını oransal olarak belirleyen deneysel bir çalışma da yapılmıştır (Lee ve ark., 2014). Kamera çözünürlüğünden piksel boyutuna ve oradan da deformasyon miktarına ulaşılabilir.

Plastik parça yüzeyindeki kusurların tespit edilmesi ve yer değiştirmelerinin hesaplanabilmesi için bir ışık kaynağının plastik parça yüzeyinden yansıtılarak görüntünün video kamera üzerine düşürülmesi sağlanmış; elde edilen görüntüdeki yansıma süreksizliklerinden konum, hata tipi ve deformasyon belirlenerek, görüntü dizisinin analizi yoluyla yüzey çöküntüleri ve çarpıklıkları gibi yüzey kusurları niceliksel olarak görselleştirilmiştir (Miike ve ark., 1995). Kalıplanan plastik ürünler üzerindeki hata tespitinin yapılması ve ürünlerin sınıflandırılmasında geleneksel yöntemlerin (elle) kullanıldığı işletmelerde ortaya çıkan zaman kaybı, üretim kapasitesini olumsuz etkilediği incelenen birçok çalışmada ileri sürülmüştür. Bu bağlamda, bir çalışmada, karmaşık senaryolarda enjeksiyon kalıplamanın verimli ve akıllı teşhisine olanak tanıyan, makine görüşü ve derin öğrenmeye dayalı bir "işleme-eşleştirme-sınıflandırma-teşhis" konsepti önerilmiştir. Plastik bileşenlerin görüntülerinin Şekil 4'te görüldüğü gibi 8 ayrı kategoride (çarpıklık, eksik dolum vs.) arıza görüntülerine ilişkin görüntü işleme yöntemleri ve derin öğrenme algoritmaları kullanılarak arıza kategorizasyonunun tanımlandığı belirtilmiştir. Görüntülerin ön işlenmesi için Gamma dönüşümü, rastgele gürültüleri gidermek için medyan filtreleme algoritması ve geometrik kenar bilgisi çıkarımı için Canny algoritması kullanılmıştır. Hu ve arkadaşları tarafından geleneksel bir VGG16 ağının yenilikçi bir şekilde yükseltildiği ifade edilmiştir. Bu teşhisin doğruluğu %53,33 den geliştirilmiş haliyle %96,67 ye çıkarttırılmış, kalite denetiminin doğruluğu ve yanıt verme yeteneği iyileştirilmiştir (Hu ve ark., 2022).



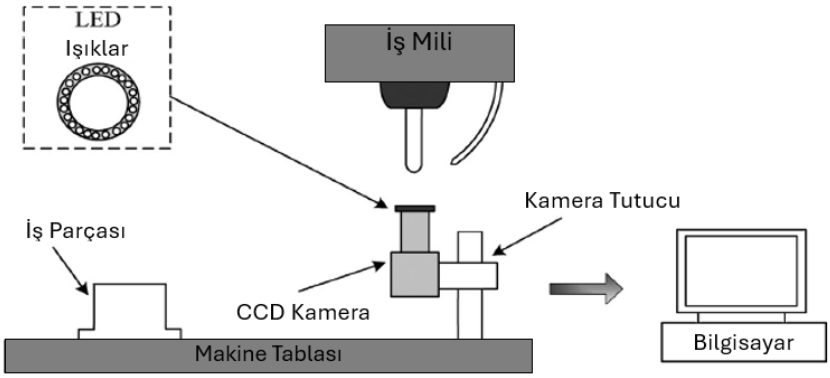
Şekil 4. Tespit edilebilen 8 hata tipi (Kaynak: Hu ve ark., 2022)

Enjeksiyonlu kalıplama sistemlerinde arıza teşhisi yapay zekasını desteklerken üretim güvenliği de arttırılmıştır.

2.3.2. Metal işlemede uygulanışı

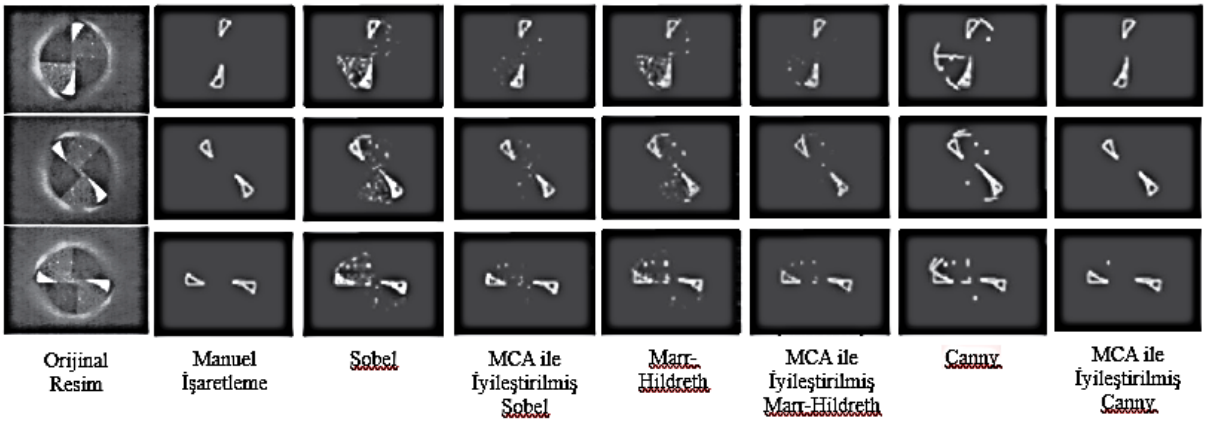
İmalat sanayisinde CNC tezgahların işleme esnasında takımlarında aşınma meydana gelir. Bu aşınmaların miktarının tespiti, işlenen parçalar üzerinde elde edilen ölçü doğruluğu açısından kritiktir. Gelişen teknoloji, kameralar ile ölçüm yapabilme imkânı sağlamaktadır. Bir çalışmada çevrim içi olarak

küresel uçlu bir takımın kamera ile izlenmesi yapılmıştır. Şekil 5'te görüldüğü gibi takımın işleme esnasında uğradığı aşınma miktarı, ölçüm noktasında konumlandırılan bir kamera ile değerlendirilmiştir. Geliştirilen sistem, kesici takımın belirlenen aşınma sınırının üzerinde olması durumunda takımın değiştirilmesi gerektiği uyarısını yapmaktadır (Zhang ve Zhang, 2013).



Şekil 5. CNC tezgahına entegre kamera şematik gösterimi (Kaynak: Zhang ve Zhang, 2013)

Bir başka çalışmada ise yalnızca küresel uçlu takımın değil 8 farklı tip kesici takımın, oluşturulan veri setleri ile otomatik olarak aşınma miktarının tespit edilmesi hedeflenmiştir. Yine tezgâha entegre bir kamera ile görüntü işleme teknikleri kullanılarak oluşturduğu yapay sinir ağlarını eğitip tam otomatik bir kesici takım aşınma analiz yöntemi geliştirilmiştir (Bergs ve ark., 2020). Aşınma miktarının kameralar ile doğru tahmin edilebilir olması, körelmiş takımlarla yapılacak olan parça işlemelerde yanlış ölçü çıkma olasılığını, dolaysısı ile kayıpları azaltacağı unutulmamalıdır. Takım aşınmasını doğru tahmin edebilmek için kenar bulma algoritmaları kullanılır. Bilinen kenar bulma algoritmalarını (Zalaoğlu ve Karakuş, 2022) birkaç farklı matkaptan aldığı görüntüler üzerinde uygulayarak kenar belirleme algoritmalarının performanslarını görsel üzerinden yorumlamışlardır ve uyguladıkları kenar bulma algoritmaları arasında kayda değer bir farka rastlayamamışlardır. Kenar bulma algoritmaları uygulanacak olan kesici takım görüntüsüne, sağlıklı bir analiz için gürültü giderme, sürekliliği tahminleme amaçlı morfolojik bileşen analizi (MCA) uygulanmalıdır. Bu yöntem, orijinal kesici takım aşınma görüntüsünü, hedef nesne, arka plan ve gürültü bileşenlerine ayırarak arka plan ve gürültünün etkisini azaltır. Morfolojik bileşen analizi kişinin kendisinin belirlediği bir yapı elemanının pikseller üzerinde filtre gibi gezdirilerek yeni görüntü elde etme metodudur. Bu yöntem ile genleşme (genişletme) veya aşındırma(daraltma) gibi işlemler yapılabilir ya da her ikisi de sırayla uygulanabilir. Kesici takım görüntüsünden (Yu ve ark., 2017) Şekil 6'da görüldüğü gibi kenar bulma algoritmaları ile kenar çizgilerini elde etmiş ardından morfolojik bileşen analizi ile yeniden bir kenar çizgisi elde etmiştir. Elde edilen, kesici takımın yeni kenar görüntüleri takım aşınma tahminlemesi yapılırken geleneksel yöntemden daha doğru bir şekilde yaptığı tespit edilmiştir.

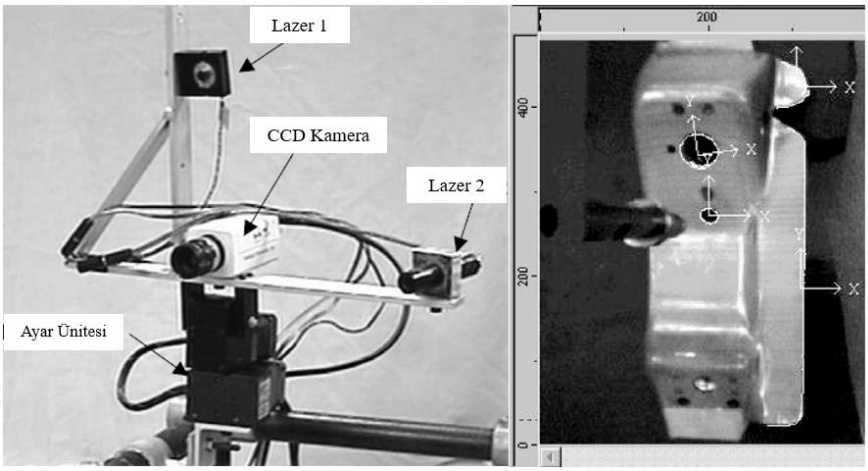


Şekil 6. MCA tabanlı ve klasik kenar bulma algoritmaları (Kaynak: Yu ve ark., 2017)

CNC tezgahlara, entegre edilen kameraların kullanımına farklı bir örnek (Öztürk ve Kuncan, 2020) tarafından yapılmıştır. İki buçuk eksen işlenmiş bir parçadan alınan görüntüden takım yollarını otomatik olarak oluşturabilen ve G kodlarına dönüştüren bir çalışma literatüre kazandırmışlardır. Bu çalışma iki buçuk eksen takım yolu üretse de tarama ile elde edilmiş 3B bir katı modelin kütükten işleniyormuş gibi otomatik takım yolunu oluşturabilmenin temellerini atmıştır.

2.3.3. Otomotivde uygulanışı

Otomotiv endüstrisindeki gelişmeler son dönemlerde ivme kazanmıştır. Özellikle otonom sürüş teknolojisi, sürücülerin araçlarını daha güvenli ve verimli bir şekilde kullanmalarını sağlamak için geliştirilmektedir. Günümüzde, sensör ve yapay zekâ teknolojileri, otonom sürüşün gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. Otomotiv endüstrisinde görüntü işleme, otonom sürüş için ortam algılama (tabela, uyarı levhası, trafik ışıkları, vb.) yapma gibi teknolojiler otomobil üreticilerini heyecanlandırmaktadır (Özçevik ve ark., 2023). Sürücüsüz araç teknolojilerinin dışında, normal sürüş esnasında sürücünün uyuyup kazaya sebep olmaması için de görüntü işleme teknikleri kullanılabilir. Hem uzun süreli gözün kapalılığı tespit etmek göz kırpma sıklığından kişinin uyuyup uyumadığını tespit edilebildiği çalışmalar literatürde mevcuttur (Peker ve ark., 2023). Bununla birlikte, otomobil fabrikalarında üretim süreçlerini destekleyecek çalışmalar da yapılmıştır. Özellikle otomobil üretiminde fikstür ve aparatlardan yoğun şekilde yararlanılmaktadır. Fikstür tasarımı, üretimi zahmetli ve zaman alan bir yoldur. Bu yüzden otomotiv bileşenlerinin fikstürsüz montajı gerçekleştirilmesinde, geleneksel fikstürlerin yerini, esnek yazılım kontrollü robot kol ve bilgisayarlı görüş sistemleri almıştır. Şekil 7'de görüldüğü gibi robot kol ile doğru pozisyonda sabitlemeye çalışılan parçanın sisteme entegre bir kamera yardımıyla parça montajını olanak sağlayan hizalama ve konumlama yapabilen görsel denetimli bir algoritma geliştirilmiştir. ±1 mm tolerans ile delik merkezlerini doğru tespit etmiştir. Bu tolerans payı ise güvenilir kavrama için yeterlidir (Bone ve Capson, 2003).



Şekil 7. Parça pozlama ve ölçüm sistemi (Kaynak: Bone ve Capson, 2003)

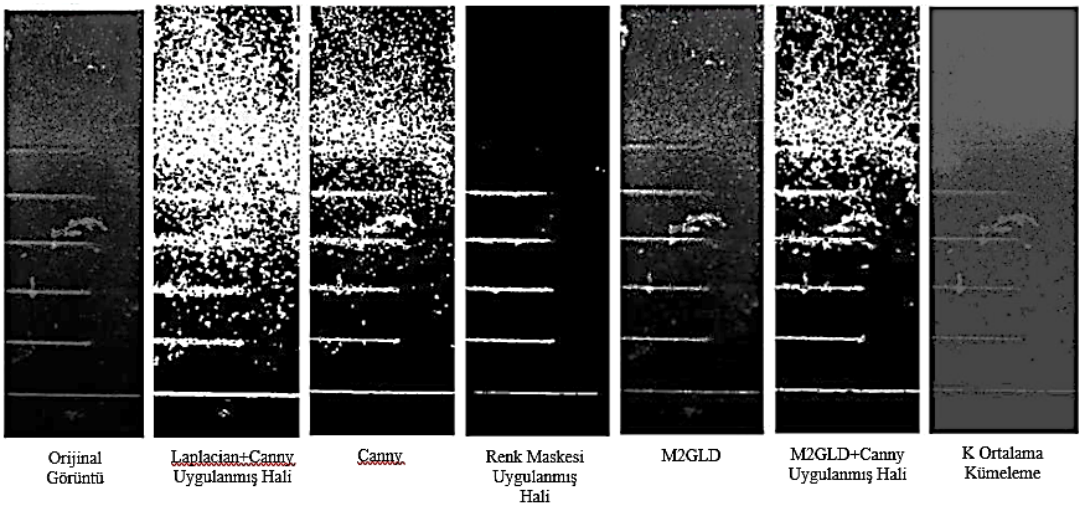
Yüksek çözünürlüklü kameralar sayesinde bazı hassas ölçümlerin ölçüm merkezlerine götürülmeden parçanın yerinde ölçümünün sağlanması olası zaman kayıplarını da ortadan kaldırmaktadır. Seri üretim hattına sahip bir otomotiv firmasının montaj hattında gerçekleştirilen ölçü kontrolünün manuel yapılması esnasında yaşanan zaman kaybının, sisteme eklenen robot kolla entegre kamera sayesinde azaltılması sağlanmıştır (Koç ve Özkan, 2021). Benzer şekilde seri üretimi yapılan, debriyaj sürtünme disklerinin (Clutch Friction Disc - CFD) kalite kontrolünün insan gözü ile yapılması ile yaşanan zaman kaybı için de kameralı bir otomatik sistemi geliştirilmiştir. Sistem, üretim hattında hareket eden disklerin görüntülerini alarak, öncesinde belirlenmiş olan kusurlar için yorumlamakta ve ürünleri kabul veya reddetmektedir. Sistemin geliştirilmesinde, Python ve OpenCV kullanılmış ve gürültüyü azaltmak için gaussian, debriyajın iç ve dış çaplarının tespiti için hough dönüşümü gibi görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Geliştirilen sistem, alınan görüntüdeki segmentlerin konumlarını, eksik veya yerinden oynamış segmentleri ve diğer kusurları tespit edebilmiştir. Bu yöntemle kusurlu ürünler üretim hattından otomatik olarak ayrıştırılmaktadır. Kaushik ve ark., (2022) tarafından kurulan sistem %78,33 doğruluk oranıyla çalışmaktadır. Robotiğin özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın kullanımı görüntü işleme ve yapay zekâ teknolojilerinin de eklenmesiyle bir araştırma alanı oluşturmuştur. Örneğin robot kol ile taşıma yapma üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışmalarında (Kaya ve ark., 2023) bir nesneyi görüp algılayıp bir noktadan diğer bir noktaya taşırken nesnenin ağırlık merkezi ve taşıma anındaki kinematik hesaplarını gerçekleştirecek entegre bir algoritma kurmayı hedeflemiştir.

2.3.4. İşlenmiş parça yüzeylerinde uygulanması

İşlenmiş yüzeylerin kalitesinin daha iyi olabilmesi için deneysel yöntemler kullanılarak optimum parametre ayarları yapılan çalışmalarla tespit edilmeye çalışılmıştır. Devamında ise bu yüzeylerin kalitelerinin kontrol edilmesi de başka bir süreçtir. Üretilen yarı mamul ya da son ürünlerin kalite kontrol süreçlerinde, gözle muayene veya diğer test yöntemlerinin yanı sıra görüntü işleme teknolojilerinden de yararlanılmaktadır.

CNC tezgâhlarda işlenen kalıp çekirdeklerinin yüzey kalitelerinin plastik ürünün yüzey kalitesini etkileyebileceği bilinmektedir. CNC operasyonlarında değişken parametre ayarlarının yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini incelemek amacıyla yapılan bir çalışmada Taguchi Metodu kullanılmıştır. Deney tasarımı ve süreç optimizasyonuna yönelik istatistiksel bir teknik olan Taguchi Metodu ile her bir parametre için dört farklı değer belirlenmiş ve bu değerlere göre analiz gerçekleştirilmiştir. Tam varyasyon da 256 deney yerine 16 deney gerçekleştirilen çalışmada Al 7075-T6 malzemede serbest formlu yüzeylerin kesme hızı, ilerleme hızı, yanal paso miktarı ve takım yolu stili parametrelerinden optimum kesme parametreleri deneysel olarak %95 güvenilir şekilde belirlenebilmiştir (Yaka ve ark., 2017). Benzer bir çalışmada X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğine yine aynı değişken parametre ayarları üzerinden (kesme hızı, ilerleme hızı, takım yolu stili ve yanal paso) kesici takımın kesme kuvveti ve takım sapmasının yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri araştırılmıştır. Dış bükey ve iç bükey eğimli yüzeyler üzerinde yapılan deneyler sonucunda yanal paso miktarının yüzey kalitesi için en önemli parametre olduğu, dış bükey düzlemlerde iç bükey düzlemlere göre daha düşük kesme kuvveti ve takım sapması değerleri tespit edilmiştir. Bunun sebebinin ise iç bükey formlarda talaşın içe yığılmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir (Gok ve ark., 2013).

Bir konveyör bant üzerinde ilerleyen dişli parçaların görüntü işleme ve kenar bulma algoritmaları kullanılarak, diş sayısına göre hatalı ve hatasız parçaların ayrıştırılmasını sağlayan bir sistem geliştirilmiştir (Boyacıgil ve Uzun, 2023). Kameralar bir görme mekanizması olduğu için ürünlerin yüzey hatalarını bulmada özellikle kullanılırlar. Bir somunun yüzeyindeki kusurları tespit edebilmek için yapay sinir ağı modeli geliştirilmiş ve tanımlanmış benzer kusurlar üzerinden hedef kusurların tahmini gerçekleştirilmiştir (Balcıoğlu, 2024). Metallerde yüzey ve yüzey altı kusurlarının tespitinde istenilen görüntüyü elde edebilmek için malzemenin ferromanyetik olma özelliği kullanılabilmektedir. Bu yönde yapılan bir çalışmada, manyetik sıvı ile yıkanmış metal bloktan ultraviole (UV) ışık altında alınan görüntüsüne görüntü işleme algoritmaları uygulanarak yüzeyde oluşabilecek olan 6 kusur tespit edilmeye çalışmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi orijinal görüntü üzerine uygulanan görüntü işleme yöntemleri verilmiştir. Mevcut algoritmalar tarafından en fazla 6 kusurdan 5'i tespit edilirken, geliştirilen M2GLD algoritması ile 6 kusurun tamamının tespit edildiği ancak yüzeye en yakın olan kusur ve en derindeki kusur net bir şekilde tespit edilemediği görülmüştür (Sözeri ve ark., 2023).



Şekil 8. Orijinal görüntü üzerine uygulanan görüntü işleme algoritmaları (Kaynak: Sözeri ve ark., 2023)

2.3.5. Lazer baskı (3D) ile üretimde uygulanışı

Seçici Lazer Eritme (SLM), bir 3B baskı tekniği olarak bilinir. Bu teknik, katman katman malzeme biriktirerek veya eriterek üç boyutlu nesnelerin oluşturulmasını sağlar. SLM, metal tozlarının veya diğer malzemelerin kullanıldığı bir süreçtir. SLM sürecinde, bir lazer ışını metal tozlarının belirli bir alanını eritir, ardından katmanları birleştirerek istenen nesneyi oluşturur. Her katman, önceki katmanın üzerine uygulanır ve süreç tamamlandığında istenen nesne elde edilir.

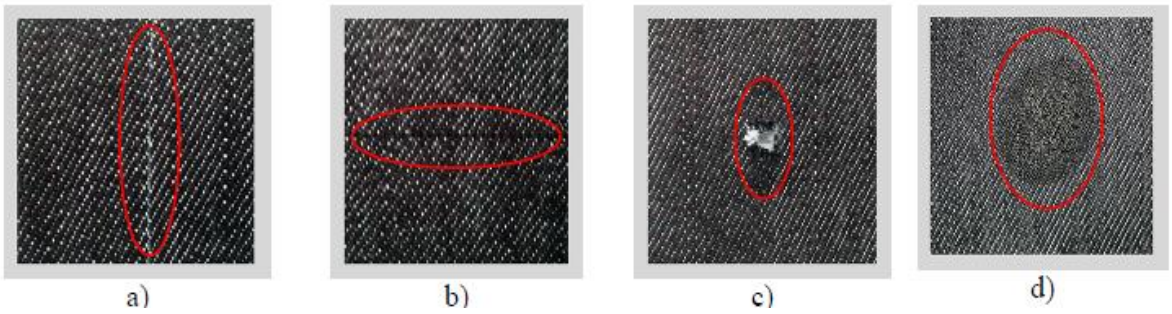
Yapılan bir çalışmada, SLM teknolojisine sahip bir 3D yazıcının toz yayma yatağını üretim esnasında izleyerek otomatik analiz yeteneği ve yaklaşımı sunmayı hedeflemiştir. Toz yayma aşaması sırasında meydana gelen anormallikleri tespit etmek ve sınıflandırmak için makine öğrenimi algoritması kullanılmıştır (Scime ve Beuth, 2018). Benzer bir çalışmada, imalat katmanlarındaki çizik, çatlak, desen vb. kusurların tespit edilmesine yönelik öğrenme aktarımı sağlanarak bir derin öğrenme modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan veri seti, üç farklı ön öğrenmeli modelin eğitim ve testi için kullanılmış olup, en iyi hata tespit ve sınıflandırma yeteneğine sahip modelin VGG-16 olduğu belirlenmiştir (Duman ve Özsoy, 2022).

Diğer bir çalışmada (Okudan ve Şahin, 2019), 3 boyutlu nesne tanımlama yaparken eş zamanlı olarak parçaların sonlu elemanlar analizi de gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenmeyle yapay sinir ağları eğitilerek geliştirilen algoritmada nesneyi tanımlayıp girdiye ihtiyaç duymadan analizini gerçekleştirmeye çalışmıştır. Böylelikle de 3D yazıcı teknolojisinin ihtiyaç haline getirdiği sonlu elmanlar analizinin gelecekte telefon kamerası ile bilene yapılabilirliğinin mümkün kılınması adına bir altyapı oluşturulmak istenmiştir.

2.4. Tekstilde Uygulanışı

Bilgisayarlı görme, yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi teknolojilerle sıkı bir şekilde ilişki içindedir. Günümüz gelişmeleri ile görüntü işleme algoritmaları daha da karmaşık hale gelse de daha doğru, hızlı ve etkili çözümler sunmaktadır. Makineleşen tekstil sektöründe, hızlı akan ve sürekli olan bir üretim

bulunmaktadır. Dolayısı ile üretimin insan gözü ile kontrolü zorlaşmaktadır. Bu nedenle tekstil sektöründe üretimin kalite ve kontrolü için kameralarla takip edilmesi yönünde birçok çalışma yapılmaktadır. Tekstil sektöründe insanın hatayı tespit etme hızı ve başarı oranını ortaya konulan bir çalışmada (Pınar ve ark., 2020), hali hazırda 200' den fazla kumaş hatasının olduğu, bu hataların en fazla %70'ini belirleyebilecek kapasiteye sahip kalite kontrol elemanının yetiştirilebilmesinin eğitim, zaman ve maliyeti açısından oldukça zahmetli olduğu ileri sürülmüştür. Buna çözüm olarak görüntü işlemeye dayalı bir yapay sinir (karar verme) ağı önerilmiştir. Oluşturulan 5 farklı yapay sinir ağı modelleri arasında, kumaş hataları tespitindeki başarı yüzdesi karşılaştırılmıştır. Diğer bir çalışmada ise rulo şeklindeki kot kumaşlarını çevrimiçi olarak izleyerek Şekil 9'da de gösterilen hataların (çözgü kopuğu, atkı kopuğu, delik, yırtık ve leke gibi) olup/olmadığını tespit edebilen bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir (Güvenoğlu ve Bağırgan, 2019).



Şekil 9. Dokuma kumaş hataları: a) Çözgü kaçığı, b) Atkı kaçığı, c) Delik hatası, d) Yağ lekesi (Kaynak: Güvenoğlu ve Bağırgan, 2019)

2.5. Gıda Sektöründe Uygulanışı

Gıda sektöründe görüntü işleme, ürün kalitesinin kontrolü, yabancı maddelerin tespiti, paketleme, sınıflandırma ve hijyen kontrolü gibi bir dizi uygulama için kullanılan önemli bir teknolojidir. Bu teknolojinin kullanımı, üretim maliyetlerini düşürmeye, kaynakları daha etkin kullanmaya ve tüketicilere daha güvenilir ürünler sunmaya yardımcı olabilir. Dünya çapında et ve hayvansal ürün talebinin artan nüfusun etkisiyle önümüzdeki 20 yıl içerisinde gıdaya olan ihtiyacı en az %50 oranında artıracağı öngörülmektedir. Bu yüzden etlik piliç üretiminde hassas hayvancılık teknolojilerinin kullanımını artırmak gerekmektedir. Üreticiler geleneksel yöntemleri kullanılarak tavuk sağlığını, refahını ve üretimini kontrol edememektedirler. Çünkü, çiftçiler yorulabilir ve uyuyabilirler ancak bilgisayarlar ve teknolojik cihazlar yorulmaz ve dinlenmeye ihtiyaç duymazlar. Bu nedenle görüntü işleme yöntemlerinin yoğun hayvancılık yapan işletmelerde aktif olarak kullanılmasının olumlu bir etkiye sahip olacağı açıktır (Aydın, 2020). Gıda üreticilerinin görüntü işleme yazılımlarına en çok ihtiyacı olduğu alan, kalitesine göre (iriliğine, küçüklüğüne, vb.) sınıflandırma ve yabancı madde tespitidir. Örneğin bir fındık üretiminde seri bir şekilde kalite sınıflandırılması ihtiyacını gidermek için derin öğrenme tekniklerini kullanan bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. 4540 görüntü kullanılarak eğitilen bu yapay zekâ modeli 0,038 hata ile çalışmaktadır (Gadalla ve Öztekin, 2023).

2.6. Enerji Sektöründe Uygulanışı

Enerji sektöründe, görüntü işleme teknolojisinin bir dizi uygulama alanı bulunmaktadır. Örnek olarak, termal kameralarla izleme, tesis güvenliği, tesis yönetim ve bakım gibi alanlar verilebilir. Termal görüntüler, görüntü işlemeye tabi tutulup anlık sıcaklık verilerine dönüştürülebilir. Bir çalışmada kızıl ötesi görüntüleme ile elde edilen görüntüler, görüntü işleme tekniği ile soğutucu akışkanların sıcaklık verileri haline dönüştürülmüştür. Geleneksel hesaplamalı soğutma değerleri ile termal kamera ile elde edilen değerler soğutma performansı açısından karşılaştırılmıştır (Katırcıoğlu ve ark., 2020). Diğer bir çalışmada ise, sıcaklık verileri, kamera ile alınan alev görüntüsü üzerinden tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, kömür yakıtlı bir brülörün baca gazı sıcaklığının tahmin edilebilmesi için yanma için belirlenen 6 çeşit model ile bir deney gerçekleştirilmiştir. Alev görüntüsünün (Golgiyaz ve ark., 2019) yoğunluk değeri dağılımını yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulaması gerçekleştirerek %97 oranında baca gazının sıcaklık tahminini doğru olarak yapmışlardır. Optik algılayıcılar ve derin öğrenmeli yapay zekâ modülleri birleştirilerek elde edilen veriler üzerinden yanma verimliliğin değerlendirildiği bir başka çalışmada da yanma verimliliğini etkileyen 2 tür arıza belirlenmiş ve derin öğrenme yapılabilmesi için veri hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Arıza 1'in tespitinde kullanılmak üzere 2100 alev görüntüsünden Arıza 2'nin tespitinde ise 950 alev görüntüsünden faydalanılmıştır (Lyu ve ark., 2019).

3. Bulgular ve Tartışma

Günümüzde, görüntü işleme teknolojisinin endüstriyel üretimde kullanılma hızı giderek artmaya başlamıştır. Fakat incelenen makalelerden, görüntü işleme teknolojisinin üretime entegre edilmesinin avantajları ile birlikte dezavantajlarında da olduğu anlaşılmıştır.

3.1. Avantajları

Görüntü işleme ile üretimde hataların tespitinde başarının yüksek olduğu söylenebilir. Plastik enjeksiyonla makinelerinde yapılan üretimlerde, hata tespiti için kamera kullanımındaki başarı için %96,67 gibi yüksek bir oran ifade dilmiştir (Hu ve ark., 2022). Ayrıca, otomatik tanıma ve sınıflandırma sistemleri sayesinde üretim sürecini hızlandırdığı ve dolayısı ile üretimde verimliliği artırdığı ifade edilebilir. Bu bağlamda, otomotiv montaj hattı için yapılan bir çalışmada (Koç ve Özkan, 2021), görüntü işleme ile çevrim süresinde %60,46 düşüş sağlandığı ve dolayısı ile üretim hattında %18,60 oranında verim artırdığı görülmüştür. Görüntü işleme teknolojilerinin, birçok alanda kullanılabilir olması bu teknolojileri esneklik ve uyarlanabilirlik açısından da avantajlı duruma getirmektedir. Görüntü işleme teknolojileri, farklı ürünler için hızlı bir şekilde programlanabilir ve üretim süreçlerindeki değişikliklere hızlı bir şekilde uyum sağlayabilir. Gelecekte, akıllı fabrikalar, otomatik haberleşme sistemleri ve yapay zekâ tabanlı karar mekanizmalarının yaygınlaşmasıyla birlikte, işgücü dinamiklerinde önemli değişiklikler olabilir. Sabit, monoton, insan psikolojisinin yıpranacağı işleri kameralı bir otomasyon

sistemi kurularak makinaya yaptırmak daha seri ve insan sağlığı için yararlı olacaktır. Bazı işlerin otomatikleştirilmesi, belirli beceri ve yeteneklerin yeniden değerlendirilmesini gerektirebilir. Ancak, bu aynı zamanda yeni iş fırsatlarının da ortaya çıkmasına neden olabilir.

3.2. Dezavantajları

Ancak, bu teknolojinin beraberinde getirdiği bazı potansiyel riskler de var. Yüksek maliyetleri ve teknik zorlukları göz önüne alındığında, küçük ölçekli işletmeler için erişilebilir olmayabilir. Ayrıca, doğru şekilde yapılandırılmadığında örneğin aydınlatma yetersiz olduğunda, kamera açısı düzgün ayarlanmadığında veya çözünürlük yetersiz olduğunda yanlış sonuçlara ve hatalı üretim süreçlerine neden olabilir. Belki de en önemlisi, insan işgücünü azaltma potansiyeline sahip olmasıdır. Görüntü işleme teknolojisiyle kurulan otomasyon sistemleri, belirli işleri otomatikleştirerek bazı çalışanların işlerini kaybetmesine veya iş değişikliğine neden olabilir.

4. Sonuçlar

Üretimin izlenmesinde, görüntü işleme teknolojilerinin kullanıldığı çalışmaların incelenmesine yönelik olarak aşağıda sonuçlar elde edilmiştir. Üretimde görüntü işleme teknolojileri kullanıldığında:

- Sağladığı otomasyon ile üretimde verimliliği artacaktır.
- Üretim süreçlerini ve kalite kontrolünün iyileştirilmesinde büyük katkı sağlayacaktır.
- Endüstriyel uygulamalarda, hataların erken tespiti sayesinde maliyetleri düşürülebilme potansiyeli vardır.
- Gelecekte daha da yaygınlaşması ve çeşitlenmesi beklenmektedir.
- İnsan işgücü kaybına sebep olma olasılığı bulunmaktadır.
- Kullanılma amacına ve yerine göre donanımsal olarak ilk kurulum maliyetleri yüksektir.
- Kullanılacağı yere ve amaca göre yazılımsal iyileştirmelere ve özelleştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Kaynakça

Ageyeva T., Horváth S., Kovács JG. In-mold sensors for injection molding: On the way to industry 4.0. Sensors 2019; 19(16): 3551.

Aydın A. Etlik piliç üretiminde hassas hayvancılık teknolojilerinin önemi. Lapseki Meslek Yüksekokulu Uygulamalı Araştırmalar Dergisi 2020; 1(1): 88-98.

Bağcı E. Endüstri 4.0: yeni üretim tarzını anlamak. Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2018; 9(24): 122-146.

Balcıoğlu YS. Small object detection method with k-detector for metal parts surface defect detection. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2024; 14(2): 538-549.

Barış B., Özek HZ. Dokuma kumaş hatalarının sistematik sınıflandırılması üzerine bir çalışma. Tekstil ve Mühendis 2019; 26(114): 156-167.

Baygin M., Karakose M., Sarimaden A., Erhan A. Machine vision based defect detection approach using image processing. In 2017 international artificial intelligence and data processing symposium (IDAP) (2017, September); (pp. 1-5). IEEE.

Bergs T., Holst C., Gupta P., Augspurger T. Digital image processing with deep learning for automated cutting tool wear detection. Procedia Manufacturing 2020; 48: 947-958.

Bone GM., Capson D. Vision-guided fixtureless assembly of automotive components. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 2003; 19(1-2): 79-87.

Boyacıgil MF., Uzun Y. Raspberry pi tabanlı görüntü işleme uygulaması geliştirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(2): 1067-1078.

Dallı B., Çakır MC. Development of an ımage processing system for the automatic quality control of the vehicle airbag plastic parts. 10th International Congress on Engineering, Architecture and Design 2022; 68-79.

Demirkıran E. Akıllı kalite kontrol kameraları ve karşılaştırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 28: 627-629.

Duman B., Özsoy K. Toz yatak füzyon birleştirme eklemeli imalatta kusur tespiti için öğrenme aktarımı kullanan derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2021; 37(1): 361-376.

Gadalla OAA., Öztekin YB. Image processing and traditional machine learning based classification of brown marmorated stink bug (halyomorpha halys) defected hazelnut. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi 2023; 20(4): 784-798.

Gerger A. Endüstri 4.0 üretim sürecinde süreç değişkenliğinin optimizasyonunda heıjunka yöntemi. Izmir Democracy University Social Sciences Journal 2019; 2(1): 1-17.

Gok A., Gologlu C., Demirci HI. Cutting parameter and tool path style effects on cutting force and tool deflection in machining of convex and concave inclined surfaces. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2013; 69: 1063-1078.

Golgiyaz S., Talu MF., Onat C. Görüntü işleme ve makine öğrenmesi yöntemleri ile baca gazı sıcaklığının tahmin edilmesi. Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi 2019; 16: 283-291.

Gonzalez RC., Woods RE. Digital image processing. 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall; 2002.

Güvenoğlu E., Bağırgan M. Shearlet dönüşümü ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak kot kumaşlar üzerinde gerçek zamanlı hata tespiti. El-Cezeri 2019; 6(3): 491-502.

Güzelce B., Bayrak G. Developing a real-time pattern matching algorithm using artificial neural network for a reliable quality control in industrial applications. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2021; 11(2): 537-546.

How Is The Injection molding processed. Knowledge. Shanghai Henglian Industrial Co. Ltd., 6 Ocak 2020, Erişim Tarihi: 08.01.2025, https://ecfpmould.com/how-is-the-injection-molding-processed/.

Hu Z., Yin Z., Qin L., Xu F. A novel method of fault diagnosis for injection molding systems based on improved Vgg16 and machine vision. Sustainability 2022; 14(21): 14280.

Kariminejad M., Tormey D., Huq S., Morriso, J., McAfee M. Ultrasound sensors for process monitoring in injection moulding. Sensors 2021; 21(15): 5193.

Katırcıoğlu F., Cingiz Z., Çay Y., Gürel A., Sarıdemir S., Kolip A. R22 ve alternatifleri R438A ile R417A soğutucu akışkanları için kızılötesi görüntü işleme teknikleri kullanarak, soğutma sistem performansının incelenmesi. Academic Platform-Journal of Engineering and Science 2020; 8(3): 500-513.

Kaushik S., Jain A., Chaudhary T., Chauhan NR. Machine vision based automated inspection approach for clutch friction disc (CFD). Materials Today: Proceedings 2022; 62: 151-157.

Kaya Z., Aksoy B., Özsoy K. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen altı eksenli robot kol ile görüntü işleme ve yapay zekâ tabanlı ürünlerin tasniflemesi. Journal of Materials and Mechatronics: A 2023; 4(1): 193-210.

Kim EG., Park JK., Jo SH. A study on fiber orientation during the injection molding of fiber-reinforced polymeric composites:(Comparison between image processing results and numerical simulation). Journal of Materials Processing Technology 2001; 111(1-3): 225-232.

Kim JW., Kim HS., Lee DG. Study on fibre orientation of weld line parts during injection moulding of fibre reinforced plastic by image processing. Materials Research Innovations 2011; 15(1): 303-306.

Koç Y., Özkan D. Otomotiv sektöründe kullanılan parçaların robot ve kamera yardımı ile ölçümü yapılarak, manuel hatanın azaltılması. Journal of Materials and Mechatronics: A 2021; 2(2): 112-126.

Kurt M., Kamber OS., Kaynak Y., Atakok G., Girit O. Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. Materials & Design 2009; 30(8): 3217-3224.

Lee JY., Han CH., Ko KW., Lee S. Development of vision system for defect inspection of electric parts in the tape and reel package. In 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (2016, October); (pp. 437-439). IEEE.

Lee T., Tho G., Oh S., Hahn JW. Enhancing the image contrast of defect patterns in molded plastic cases of mobile phones with a digital image process. Advances in Polymer Technology 2014; 33(1).

Lyu Y., Chen J., Song Z. Image-based process monitoring using deep learning framework. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 2019; 189: 8-17.

Miike H., Koga K., Yamada T., Kawamura T., Kitou M., Takikawa N. Measuring surface shape from specular reflection ımage sequence–quantitative evaluation of surface defects of plastic moldings–. Japanese Journal of Applied Physics 1995; 34(12A): L1625.

Ogorodnyk O., Martinsen K. Monitoring and control for thermoplastics injection molding a review. Procedia Cirp 2018; 67: 380-385.

Okudan, A., Şahin, ÖS. Yapay sinir ağları ile üç boyutlu obje sınıflandırmada konvolüsyon filtrelerinin etkisinin incelenmesi. Selcuk University Journal of Engineering Sciences 2019; 18(3): 164-178.

Osswald TA., Hernández-Ortiz JP. Polymer processing. Modeling And Simulation. Munich: Hanser 2006; 1-651.

Özçevik Y., Solmaz Ö., Baysal E., Ökten M. Otonom araç tasarımı için gerçek zamanlı benzetim ortamı mimarisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2023; 38(3): 1867-1878.

Öztürk S., Kuncan M. Kameradan alınan görüntünün CNC tezgâhında gerçek zamanlı olarak işlenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2020; 9(3): 1251-1263.

Peker NY., Zengin A., Eroğlu Erdem Ç., Demirsoy MS. Göz kırpma tespiti için yeni bir uyarlamalı eşik değeri algoritması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi 2023; 31(2): 718-728.

Pınar Z., Gülağız FK., Altuncu MA., Şahin S. Denim kumaşlarda görüntü işleme ile hata tespiti. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2020; 9(4): 1609-1620.

Samtaş G., Gülesin M. Sayısal görüntü işleme ve farklı alanlardaki uygulamaları. Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges) 2012; 2(1): 85-97.

Scime L., Beuth J. Anomaly detection and classification in a laser powder bed additive manufacturing process using a trained computer vision algorithm. Additive Manufacturing 2019; 19: 114-126.

Sözeri V., Keskin O., Harmanşah C., Kozak İ., Kibar EN. Görüntü işleme algoritmalarına dayalı olarak manyetik parçacık test görüntülerinde kusur tespitinin araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 23(1): 115-122.

Ülkü E., Demir Ö., Yildiz K., Yildiz Z. Fiber thickness measurement using image processing. 2015 23nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) 2015; 1166-1166.

Yaka H., Demir H., Gök A. Optimization of the cutting parameters affecting the surface roughness on free form surfaces. Sigma 2017; 35(2): 323-331.

Yu X., Lin X., Dai Y., Zhu K. Image edge detection based tool condition monitoring with morphological component analysis. ISA Transactions 2017; 69: 315-322.

Zalaoğlu D., Karakus P. İşlenebilirlikte kenar belirleme algoritmalarının kullanılabilirliği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(2): 707-719.

Zhang C., Zhang J. On-line tool wear measurement for ball-end milling cutter based on machine vision. Computers in Industry 2013; 64(6): 708-719.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 1993-2005, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 1993-2005, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

At Beslemede Probiyotik Kullanımı

Yavuzkan PAKSOY[1*], Ahmet KOLUMAN[2]

[1]Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Veteriner Fakültesi, Zootekni ve Hayvan Besleme Bölümü, Zootekni Anabilim Dalı, Adana, Türkiye
[2]Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği, Denizli

[1]https://orcid.org/0000-0002-0935-7693
[2]https://orcid.org/0000-0001-5308-8884
*Sorumlu yazar: yavuzkan7@gmail.com

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 16.10.2024
Kabul tarihi: 17.04.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
At yetiştiriciliği
Bağırsak sağlığı
Probiyotikler
Tay gelişimi
Üreme performansı

ÖZ

Bu çalışma, probiyotiklerin at yetiştiriciliğindeki potansiyel etkilerini incelemektedir. Probiyotiklerin bağırsak sağlığını destekleyerek sindirimi iyileştirdiği, bağışıklık fonksiyonlarını güçlendirdiği ve üreme performansını artırdığı gösterilmiştir. Bağırsak mikrobiyotası ve at sağlığı arasındaki ilişki ele alınarak, probiyotiklerin bağırsak dengesizliklerini önleyici ve tedavi edici etkileri vurgulanmıştır. Araştırmalar, probiyotiklerin kısrakların gebelik oranlarını artırdığını, tay gelişimini desteklediğini ve üreme organlarındaki enfeksiyon riskini azalttığını göstermektedir. Çalışmada, en uygun probiyotik türleri, dozlama stratejileri ve yönetim uygulamalarının entegrasyonu ele alınmıştır. Sonuç olarak, probiyotiklerin at yetiştiriciliğinde önemli bir yenilik sunduğu, ancak bu alandaki potansiyelin tam olarak anlaşılabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir. Probiyotiklerin bilinçli kullanımı, at sağlığını iyileştirebilir ve atçılık endüstrisinin daha sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağlayabilir.

Probiotics in Horse Nutrition

Review

Article History:
Received: 16.10.2024
Accepted: 17.04.2025
Published online: 16.09.2025

Keywords:
Foal development
Gut health
Horse breeding
Probiotics
Reproductive performance

ABSTRACT

This study examines the potential effects of probiotics in horse breeding. Probiotics have been shown to support gut health, improve digestion, strengthen immune functions, and enhance reproductive performance. The relationship between gut microbiota and horse health is discussed, emphasizing the role of probiotics in preventing and treating gut imbalances. Research indicates that probiotics can increase pregnancy rates in mares, support foal development, and reduce the risk of infections in reproductive organs. The study explores optimal probiotic strains, dosing strategies, and integration with management practices. In conclusion, probiotics present a promising innovation in horse breeding; however, further research is needed to fully understand their potential. The conscious use of probiotics can improve horse health and contribute to a more sustainable equine industry.

To Cite: Paksoy Y., Koluman A. Probiotics in Horse Nutrition. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 1993-2005.

1. Introduction

Probiotics, in the form of supplements or food products, have emerged as the most prominent ingredient in the era of functional foods. Probiotics have always been a vital component and commercial target for providing potential health benefits (Hamad et al., 2022). The term “probiotic” was first presented by Werner Kollath in 1953, which is known to be a derivative of the Latin word pro and the Greek

word βιο meaning “for life. Food and Agriculture Organization (FAO) and World Health Organization (WHO) described them as “live microbes when administered in adequate quantities, confer health benefits on host organisms” (Munir et al., 2022). Probiotics, which have been used in animal husbandry for many ailments in recent years, are candidates to become an indispensable food supplement for the equine sector (Hamad et al., 2022; Munir et al., 2022).

Probiotics, which are living bacteria that give health advantages when taken, have become popular in a variety of sectors, including animal husbandry. Probiotics have showed promise in enhancing intestinal health and general well-being in horses (McGilloway et al., 2023; Park et al., 2023; Zaib et al., 2024).

Horses are prone to digestive problems including colic and diarrhea, which can impair their performance and general health. Probiotics, which promote a healthy balance of intestinal flora, can help horses avoid and treat stomach disorders. Probiotics have been demonstrated in studies to enhance digestion, boost nutritional absorption, and reduce inflammation in the gastrointestinal system in horses, resulting in greater overall health and performance (Ganda et al., 2023; MacNicol et al., 2023; McGilloway et al., 2023).

One of the primary advantages of probiotics in horse breeding is their capacity to boost the immune system. The gut microbiota regulates the immune response, and probiotics can help maintain a healthy balance of beneficial bacteria in the gut. Probiotics can help horses avoid infections and diseases by boosting their immune systems, resulting in decreased veterinary expenditures and greater breeding success (Li et al., 2023; MacNicol et al., 2023).

In addition to digestive and immunological support, probiotics have been demonstrated to improve reproductive health in horses. The reproductive system is vulnerable to gut bacterial imbalances, and probiotics can help keep a healthy environment for effective breeding. Probiotic supplementation has been proven in studies to boost fertility rates, lower the frequency of reproductive infections, and promote general reproductive health in breeding horses (Silva et al., 2014; Li et al., 2023; MacNicol et al., 2023; Shi et al., 2023). Furthermore, probiotics can help reduce stress and anxiety in horses, which can have a big influence on breeding results. Horses are sensitive animals that can get stressed in high-pressure breeding environments. Probiotics have been demonstrated to relax horses by decreasing stress hormone production and improving overall well-being. By reducing stress levels, probiotics can improve breeding outcomes and increase the likelihood of successful pregnancies (Adams et al., 2022; Ganda et al., 2022). It has been reported that after regular probiotic consumption, horses' performance increased and their digestive systems were regulated (Mirzaei et al., 2022; Perricone et al., 2022).

It is crucial to note that not all probiotics are made equal, and it is critical to choose the appropriate probiotic strain for horses. Different probiotic strains have varied impacts on equine health, so pick a probiotic that is particularly designed for horses. Consultation with a veterinarian or equine nutritionist is suggested to choose the best probiotic supplement for each horse based on their unique needs and breeding goals. When introducing probiotics into horse breeding techniques, it is critical to follow

correct dose and delivery. Probiotics should be supplied as directed by the manufacturer, and the horse's reaction to the supplement should be monitored. Regular monitoring of digestive health, immune function, and reproductive performance can help determine the effectiveness of probiotic supplementation in breeding horses (Ganda et al., 2022; Arnold and Pilla, 2023; Li et al., 2023; Park et al., 2023).

To summarize, probiotics have the potential to transform horse breeding techniques by increasing digestive health (Tanabe et al., 2014), immunological function (Shi et al., 2023), reproductive performance (Silva et al., 2014), and general well-being in horses (Cooke et al., 2021). Breeders can use probiotics to improve their horses' health and performance, resulting in improved breeding outcomes and healthier progeny in the long term. This article aims to offer a detailed overview of the advantages and significance of probiotics in horse breeding methods. The use of probiotics in horse breeding prevents stomach problems, supports digestive system health and improves yield quality and performance. Moreover, it reduces the risk of disease and ensures an overall healthy breeding process. The study highlights that the use of probiotics in horses can be an effective strategy for breeders as well as maximizing the health and performance potential of horses. Finally, the study seeks to educate and advocate the use of probiotics into equine nutrition and breeding programs in order to improve the health and success of horse breeding.

2. Probiotics

Within the current paradigm of animal science, the emerging topic of probiotics has piqued the interest of both academics and practitioners. Probiotics, defined as living microbes that provide health advantages when consumed, offer an exciting frontier in boosting well-being across species. In the context of equine breeding, probiotics provide a viable route for improving horse health and performance. The horse gastrointestinal (GI) tract contains a complex and dynamic ecosystem of bacteria known collectively as the gut microbiome. This complex community is essential for digestion, food absorption, and immune system modulation. Disruptions in this delicate balance can emerge as digestive problems like colic and diarrhea, jeopardizing the horse's general health and performance ability. Probiotics, which promote a healthy balance of beneficial bacteria in the stomach, can demonstrably prevent and treat many diseases. Researchers are still trying to figure out exactly how probiotics provide health advantages. However, multiple possible paths have been found (De Rezende et al., 2012; Angelika, 2014; Ishizaka et al., 2014; Schoster et al., 2014; Tanabe et al., 2014; Kritas, 2018). Probiotics and their effect on health is summarized in Figure 1.

The effectiveness of probiotic supplementation is dependent on the selection of appropriate bacterial strains. Different probiotic strains have varied functions and effects on the host. When selecting probiotic strains for horses, consider the following factors:

- Species: Specific probiotic strains belonging to genera such as Lactobacillus, Bifidobacterium and Enterococcus have demonstrated efficacy in horses.

- Strain Specificity: Different strains within the same genus can exhibit distinct effects. Selecting strains with documented benefits in horses is crucial.
- Spore Formation: Spore-forming bacteria offer advantages in terms of viability during storage and transit through the harsh acidic environment of the stomach. By carefully analyzing these criteria, researchers and practitioners may choose probiotic strains with the highest potential to improve horse health and performance (Weese et al., 2008; De Rezende et al., 2012; Cooke et al., 2021; Lagounova, 2022).



Figure 1. Probiotics and their effect on health

3. The Paramount Importance of Gut Health in Horses

The horse gastrointestinal (GI) tract contains a complex and dynamic ecosystem of bacteria known collectively as the gut microbiome. This complex ecosystem is critical to various physiological processes that are essential for horse health and performance. A robust gut microbiome supports:

- Efficient Digestion: The equine digestive system relies heavily on microbial fermentation in the hindgut to break down complex carbohydrates like cellulose and hemicellulose into absorbable nutrients A healthy gut microbiome ensures efficient digestion, maximizing nutrient utilization and energy extraction from the horse's diet.
- Nutrient Absorption: Short-chain fatty acids (SCFAs) produced by gut bacteria are a significant energy source for horses. Additionally, gut microbes contribute to the absorption of essential vitamins and minerals, such as vitamin K and B vitamins. A balanced gut microbiome optimizes nutrient absorption, promoting overall health and performance.
- Immune System Regulation: The gut-associated lymphoid tissue (GALT) represents the largest component of the equine immune system. The gut microbiome interacts extensively with the GALT,

influencing immune responses and inflammatory processes throughout the body. A healthy gut microbiome fosters a robust immune system, enhancing the horse's ability to resist pathogens (Wilmink et al., 2020; Cooke et al., 2021; Lagounova, 2022). This information is summarized in Figure 2.

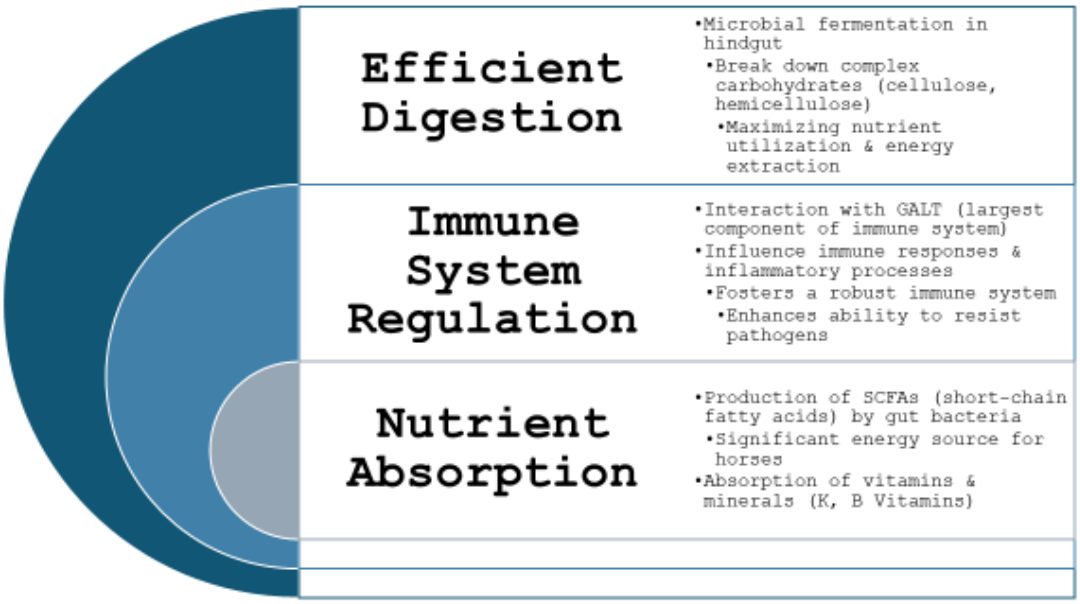


Figure 2. A robust microbiota and its support on horse health

Disruptions in the delicate balance of the gut microbiota, known as dysbiosis, can cause a cascade of negative repercussions for horses.

- Digestive Disorders: Dysbiosis can impair digestion, leading to conditions like colic, diarrhea, and impaction. These conditions can compromise nutrient absorption, hinder performance, and decrease overall well-being.
- Diminished Nutrient Utilization: An imbalanced gut microbiome may lead to reduced production of SCFAs and impaired absorption of essential vitamins and minerals. This can result in nutritional deficiencies, decreased energy availability, and impaired growth and development.
- Heightened Susceptibility to Infections: A compromised gut barrier and dysregulation of the immune system associated with dysbiosis can increase susceptibility to bacterial and viral infections. This can pose significant health risks and economic burdens for horse owners.

Maintaining a healthy gut flora is critical for horses' overall health and performance. A healthy gut environment promotes efficient digestion, food absorption, and immunological function, laying the groundwork for a healthy and vibrant horse herd (Berreta et al., 2021; Berreta and Kopper, 2022; Ivannikova et al., 2023).

4. The Significance of Probiotics in Horse Breeding Programs

Probiotics provide several benefits to horse breeding operations by enhancing digestive health and immunological function. The complex link between intestinal health and reproductive function in horses is receiving increased scientific attention. The gut microbiome not only aids digestion and nutrition absorption, but it also plays an important role in regulating the hormonal and immunological responses that support healthy reproduction. Gut health has a substantial influence on reproductive function, as mentioned below:

- Hormonal Regulation: The gut microbiome modulates the production and metabolism of sex hormones, such as estrogen and progesterone, which are essential for regulating estrous cycles and ovulation in mares and testosterone production in stallions. Dysbiosis can disrupt this delicate hormonal balance, potentially leading to reproductive irregularities and decreased fertility.
- Immune System Regulation: A healthy gut microbiome fosters a balanced immune response, preventing excessive inflammation within the reproductive tract. Conversely, dysbiosis can trigger inflammatory processes that can impair reproductive function by hindering sperm motility, fertilization, and embryo development.
- Nutrient Availability: Essential nutrients derived from digestion by gut microbes play a critical role in supporting reproductive health. Deficiencies in these nutrients due to dysbiosis can compromise reproductive function in both mares and stallions (Silva et al., 2014; Cooke et al., 2021; Lauková et al., 2023; Cooke et al., 2024).

Probiotic supplementation has been shown to improve horse fertility in a variety of ways.

- Improved Fertility Rates: By promoting a healthy gut microbiome, probiotics may contribute to improved hormonal regulation and nutrient absorption, potentially leading to increased fertility rates in mares and stallions.
- Reduced Reproductive Infections: Probiotics can help maintain a healthy vaginal and uterine environment in mares, potentially reducing the risk of infections that can hinder breeding success.
- Enhanced Embryonic Development: A balanced gut microbiome in mares may contribute to a more favorable uterine environment for successful embryo development and pregnancy.
- Research on the use of probiotics in horse breeding is ongoing, but previous research suggest encouraging outcomes. Fertility rates improved in mares fed with certain probiotic strains. Probiotic supplementation reduced the prevalence of reproductive tract infections in mares.

Probiotic therapy resulted in improved sperm motility and morphology in stallions. While further study is needed to completely understand the mechanisms of action and improve probiotic usage for horse reproduction, the available information implies a good influence on breeding results (Lauková et al., 2020; Massacci et al., 2020).

4.1. Probiotics and Mare Health

Probiotics, notably Lacticaseibacillus paracasei, have been investigated for their probiotic qualities and possible advantages. While the precise effects of probiotics on mare fertility are not specifically addressed in the sources supplied, the probiotic qualities of specific strains, such as Lacticaseibacillus paracasei 10K, have been emphasized for possible health benefits. The sources cover the advantages of probiotics in a variety of situations, including metabolic problems and dental health, but do not particularly address their usage during pregnancy and nursing in mares. However, the ability of probiotics, particularly those generated from equid milk, to maintain tooth health implies a larger role in health maintenance. While the sources do not specifically highlight probiotics' direct impact on postpartum health and foal development, the overall advantages of probiotics on gut health and immunity may indirectly aid to postpartum recovery and maybe influence foal development. Probiotics' beneficial impacts on gut health and immunological function may have consequences for general postpartum health and well-being, as well as foal growth and development (Jones, 2019; Barba et al 2020; Malaluang et al., 2022; Malaluang et al., 2024).

4.2. Probiotics in Stallion Management

Although the sources do not particularly address the effect of probiotics on stallion fertility, they do emphasize the significance of gut health and probiotics' function in maintaining a healthy gut flora. Given the importance of gut health in general well-being, including its possible impact on fertility, adding probiotics into stallion management methods may indirectly boost fertility by increasing gut health. The direct use of probiotics to improve sperm quality and quantity in stallions is not covered in the available publications. However, probiotics' ability to promote gut health and overall well-being may indirectly lead to greater reproductive health, including sperm quality. Further study may be required to determine the particular effects of probiotics on sperm parameters in stallions. While the sources do not go into the specifics of including probiotics into stallion diets and management techniques, the general advantages of probiotics on gut health and overall well-being indicate that incorporating probiotics into stallion diets may be useful. Probiotics may help stallions' intestinal health, immunological function and general health, all of which are necessary for peak performance and reproduction (Cooke et al., 2021; Cooke, 2023; Cooke et al., 2023).

4.3. Probiotics and Foal Health

The sources do not explicitly address the role of probiotics in early gut colonization in foals. However, the overall effects of probiotics on gut health and immunity imply that early probiotic exposure may help shape foals' gut flora, potentially impacting their long-term health and development. While the offered sources do not mention the particular advantages of probiotics for neonatal health and immunity in foals, the overall good effects of probiotics on gut health and immune function may apply to newborn foals. Probiotics may help to balance the intestinal microbiota and boost immunological development

in newborn foals, thereby improving their health and resilience. Although the sources do not specifically address the long-term effects of probiotics on foal growth and development, the general advantages of probiotics on gut health, immunity, and overall well-being imply that early probiotic exposure may have a long-term impact on growth and development. Probiotics may help foals grow and develop optimally by fostering a healthy gut microbiota and immune system (Freccero et al., 2021; Goodman-Davis et al., 2021; Berreta and Kopper, 2022; Cooke et al., 2023; Shi et al., 2023; Mienaltowski et al., 2024).

5. Practical Considerations and Recommendations

When choosing probiotic strains for horse breeding operations, look for strains that have been shown to improve gut health, immunological function, and general well-being in horses. The search results highlight a few potential probiotic strains:

- *Lacticaseibacillus paracasei* 10K, isolated from Kazakhstani mare's milk, has been identified as having high probiotic potential and could be a promising candidate for use in horse breeding operations.
- *Lactobacillus plantarum* strains isolated from mare and donkey milk have shown high probiotic potential, including the ability to survive and form biofilms in the oral cavity, as well as antimicrobial and coaggregative abilities against cariogenic and periodontitis-related pathogens.
- *Lactobacillus* spp. and Bifidobacterium spp. are commonly represented in poultry probiotics and have been shown to promote gut health, immune stimulation, and enteropathogen control in horses (Schoster et al., 2016; Elghandour et al., 2020; Hu et al., 2020; Lambo et al., 2021; Lauková et al., 2023).

These findings indicate that adding probiotics into equestrian management practices can have far-reaching effects on horse health and production. However, the search results do not provide detailed dose and administration guidelines for probiotics in horses. However, it is typically advised that you follow the probiotic manufacturer's advice or speak with a veterinarian to establish the proper dosage and delivery technique based on the probiotic strain and the needs of your horse. To successfully include probiotics into overall equine management practices, they must be considered as part of a holistic approach to supporting horse health and well-being. Probiotics should be administered in concert with other management methods, including as optimal feeding, immunization, and parasite control, to maximize their effectiveness. Furthermore, monitoring the horse's reaction to probiotic supplementation and making adjustments as needed is critical to ensure the overall success of the management plan (Hu et al., 2020; Lambo et al., 2021; Lauková et al., 2023).

An example of probiotic use in horses can be as follows: A probiotic mix (Di-a-zyme 256 Equine, Tarımsan, Türkiye) consisting of *Bacillus subtilis* $1.3x10^{11}$ cfu/kg, *Bacillus licheniformis* $1.3x10^{11}$ cfu/kg, *Lactobacillus farciminis* $1x10^{11}$ cfu/kg, *Saccharomyces cerevisae* $3x10^{11}$ cfu/kg, *Lactobacillus acidophilus* $1x10^{11}$ cfu/kg when given the horses, significant gains are achieved. It is recommended to consume 0.05 g/kg of this mixture regularly at each meal for one month. In order not to disrupt the

intestinal flora, probiotic consumption is regularly interrupted. This interruption period is recommended to be at least one week. Regular probiotic use has been reported to have positive effects on the digestive and immune systems as well as on the pregnancy rate (Gülhan and Boynukara, 2018; Jacobs et al., 2024; Kaya et al., 2024).

6. Conclusion

In conclusion, the emerging subject of probiotic supplementation in horse breeding programs shows enormous promise for improving the health and well-being of both mares and foals. Probiotics, by promoting a healthy gut microbiota, have been shown to improve numerous aspects of horse health, including fertility, pregnancy success rates, lactation efficiency, and foal growth. Probiotics have been shown in studies to increase stallion fertility, sperm quality, newborn health, and foal immunological competence. However, in order to fully realize the potential of probiotics in equestrian breeding, further study is required. It is critical to go deeper to find and define a broader range of probiotic strains that are especially designed to improve horse health. Furthermore, creating effective dosing regimens, fine-tuning delivery procedures, and smoothly incorporating probiotics into comprehensive horse management programs are critical steps toward optimizing their advantages. Horse breeders may make a substantial contribution to their horses' general health and well-being by emphasizing ongoing probiotic research and actively incorporating it into equine management methods. This proactive strategy not only promotes a robust breeding population, but it also demonstrates a dedication to sustainable and responsible animal husbandry techniques, assuring the equestrian industry's sustained prosperity for generations.

Conflict of Interest

The authors declares that has no conflict of interest.

Summary of Researchers' Contribution Rate Declaration

Authors declare that they have contributed 50% - 50% to the article.

References

Adams VJ., LeBlanc N., Penell J. Results of a clinical trial showing changes to the faecal microbiome in racing thoroughbreds after feeding a nutritional supplement. Veterinary Sciences 2022; 10(1): 27. doi: 10.3390/vetsci10010027

Angelika S. Probiotics and dietary supplements in horses: useful or not? In: Annual Forum of the American College of Veterinary Internal Medicine 2014; 1-3. Nashville.

Arnold CE., Pilla R. What is the microbiota and what is its role in colic? Veterinary Clinics of North America-equine Practice 2023; 39(1): 381-397. doi: 10.1016/j.cveq.2023.03.004

Barba M., Martínez-Boví R., Quereda JJ., Mocé ML., Plaza-Dávila M., Jiménez-Trigos E., García-Roselló E. Vaginal microbiota is stable throughout the estrous cycle in Arabian mares. Animals 2020; 10(11).

Berreta A., Burbick CR., Alexander T., Kogan C., Kopper JJ. Microbial variability of commercial equine probiotics. Journal of Equine Veterinary Science 2021; 106 (s2): 103728.

Berreta A., Kopper J. Equine probiotics-what are they, where are we and where do we need to go? Journal of Equine Veterinary Science 2022; 115, 104037.

Cooke CG., Gibb Z., Harnett JE. The safety, tolerability and efficacy of probiotic bacteria for equine use. Journal of Equine Veterinary Science 2021; 99, 103407.

Cooke CG. The microbiome and stallion fertility. (Doctoral Thesis), The University of Sydney, Faculty of Medicine and Health, School of Pharmacy, Sydney, New South Wales, Australia, 318. October 27, 2023. https://ses.library.usyd.edu.au/bitstream/handle/2123/31917/cooke_cg_thesis.pdf?sequence=1

Cooke CG., Gibb Z., Grupen CG., Schemann K., Deshpande N., Harnett J. The ımpact of probiotics and prebiotics on the composition of the equine faecal and seminal microbiomes and sperm quality–a Pilot Study 2023; 1-25. Available at SSRN 4534385.

Cooke CG., Gibb Z., Grupen CG., Harnett J. Prebiotics and synbiotics in equine health and disease: probiotics and synbiotics for horses. International Journal of Equine Science 2023; 2(2): 37-47.

Cooke CG., Gibb Z., Grupen CG., Schemann K., Deshpande N., Harnett JE. Effect of probiotics and prebiotics on the composition of the equine fecal and seminal microbiomes and sperm quality: a pilot study. Journal of Equine Veterinary Science 2024; 135: 105032.

De Rezende ASC., Trigo P., Lana ÂMQ., Santiago JM., Silva V., Montijano FC. Yeast as a feed additive for training horses. Ciência e Agrotecnologia 2012; 36: 354-362.

Elghandour MMY., Tan ZL., Abu Hafsa SH., Adegbeye MJ., Greiner R., Ugbogu EA., Salem AZM. Saccharomyces cerevisiae as a probiotic feed additive to non and pseudo-ruminant feeding: a review. Journal of Applied Microbiology 2020; 128(3): 658-674.

Freccero F., Lanci A., Mariella J., Viciani E., Quercia S., Castagnetti A., Castagnetti, C. Changes in the Fecal microbiota associated with a broad-spectrum antimicrobial administration in hospitalized neonatal foals with probiotics supplementation. Animals 2021; 11(8): 2283.

Ganda E., Chakrabarti A., Sardi MI., Tench M., Kozlowicz BK., Norton SA., Warren LK., Khafipour E. PSXV-11 A Postbiotic from saccharomyces cerevisiae fermentation improves microbiome robustness in young stress-challenged horses in training. Journal of Animal Science 2022; 15: 101. doi: 10.1093/jas/skac247.531

Ganda E., Chakrabarti A., Sardi MI., Tench M., Kozlowicz BK., Norton SA., Warren LK., Khafipour E. Saccharomyces cerevisiae fermentation product improves robustness of equine gut microbiome upon stress. Frontiers in Veterinary Science 2023; 10: 1134092. doi: 10.3389/fvets.2023.1134092

Goodman-Davis R., Figurska M., Cywinska A. Gut microbiota manipulation in foals—Naturopathic Diarrhea Management, or Unsubstantiated Folly? Pathogens 2021; 10(9): 1137.

Gülhan T., Boynukara B. The use of probiotics in veterinary medicine. Doğanın Sesi 2018; 1(1): 43-48.

Hamad G., Ombarak RA., Eskander M., Mehany T., Anees FR., Elfayoumy RA., Omar SA., Lorenzo JM., Abou-Alella SAE. Detection and inhibition of Clostridium botulinum in some Egyptian fish products by probiotics cell-free supernatants as bio-preservation agents. LWT 2022; 163: 113603. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113603

Hu G., Do DN., Gray J., Miar Y. Selection for favorable health traits: a potential approach to cope with diseases in farm animals. Animals 2020; 10(9): 1717.

Ishizaka S., Matsuda A., Amagai Y., Oida K., Jang H., Ueda Y., Takai M., Tanaka A., Matsuda H. Oral administration of fermented probiotics improves the condition of feces in adult horses. Journal of Equine Science 2014; 25(4): 65-72.

Ivannikova R., Bessarabova E., Smirnova E., Lunegov AM. Effect of probiotic feed additive on physiological and biochemical parameters of horses. EDP Sciences, E3S Web of Conferences 2023; 431(3): 01044.

Jacobs RD., Grum D., Trible B., Ayala DI., Karnezos TP., Gordon ME. Oral probiotics administration attenuates postexercise inflammation in horses. Translational Animal Science 2024; 8, 124.

Jones E. Characterization of the equine microbiome during late gestation and the early postpartum period, and at various times during the estrous cycle in mares being bred with raw or extended semen (Doctoral Thesis), Kansas State University, Department of Animal Sciences and Industry College of Agriculture, Manhattan, Kansas, 2019.

Kaya ZK., Paksoy Y., Koluman N. The effect of age, gender and feeding method on some body measurements in pony horses. Journal of Animal Production 2024; 65(1): 59-65.

Kritas SK. Probiotics and prebiotics for the health of pigs and horses. Probiotics and Prebiotics in Animal Health and Food Safety 2018; 109-126.

Lagounova M. The use of dietary probiotics in horses: Microbial activity during antibiotic treatment and bacterial characterization (Doctoral Thesis), The University of Guelph, In partial fulfilment of requirements for the degree of Master of Science in Animal Biosciences, Guelph, Ontario, Canada, 2022.

Lambo MT., Chang X., Liu D. The recent trend in the use of multistrain probiotics in livestock production: An overview. Animals 2021; 11(10): 2805.

Lauková A., Styková E., Kubašová I., Strompfová V., Gancarčíková S., Plachá I., Simonová MP. Enterocin M-producing Enterococcus faecium CCM 8558 demonstrating probiotic properties in horses. Probiotics and Antimicrobial Proteins 2020; 12: 1555-1561.

Lauková A., Micenková L., Kubašová I., Bino E., Kandričáková A., Plachá I., Simonová MP. Microbiota, phagocytic activity, biochemical parameters and parasite control in horses with

application of autochthonous, Bacteriocin-Producing, Probiotic Strain *Enterococcus faecium* EF 412. Probiotics and Antimicrobial Proteins 2023; 15(1): 139-148.

Li C., Li X., Guo R., Ni W., Liu K., Liu Z., Dai J., Xu Y., Abduriyim S., Wu Z., Zeng Y., Lei B., Zhang Y., Wang Y., Zeng W., Zhang Q., Chen C., Qiao J., Liu C., Hu S. Expanded catalogue of metagenome-assembled genomes reveals resistome characteristics and athletic performance-associated microbes in horse. Microbiome, 2023; 11: 7. doi: 10.1186/s40168-022-01448-z

MacNicol JL., Renwick S., Ganobis CM., Allen-Vercoe E., Weese JS., Pearson W. The influence of a probiotic/prebiotic supplement on microbial and metabolic parameters of equine cecal fluid or fecal slurry in vitro. Journal of Animal Science 2023; 101: skad034. doi: 10.1093/jas/skad034

McGilloway M., Manley S., Aho A., Heeringa KN., Whitacre L., Lou Y., Squires EJ., Pearson W. Dietary fermentation product of aspergillus oryzae prevents increases in gastrointestinal permeability ('Leaky Gut') in horses undergoing combined transport and exercise. Animals 2023; 13(5): 951. doi: 10.3390/ani13050951

Malaluang P., Wilén E., Frosth S., Lindahl J., Hansson I., Morrell JM. Vaginal bacteria in mares and the occurrence of antimicrobial resistance. Microorganisms 2022; 10(11): 2204.

Malaluang P., Åkerholm T., Nyman G., Lindahl J., Hansson I., Morrell JM. Bacteria in the healthy equine vagina during the estrous cycle. Theriogenology 2024; 213: 11-18.

Massacci FR., Clark A., Ruet A., Lansade L., Costa M., Mach N. Inter-breed diversity and temporal dynamics of the faecal microbiota in healthy horses. Journal of Animal Breeding and Genetics 2020; 137(1): 103-120.

Mienaltowski MJ., Callahan M., De La Torre U., Maga EA. Comparing microbiotas of foals and their mares' milk in the first two weeks after birth. BMC Veterinary Research 2024; 20(1): 17.

Mirzaei A., Razavi SA., Babazadeh D., Laven R., Saeed M. Roles of probiotics in farm animals: A review. Farm Animal Health and Nutrition 2022; 1(1): 17-25.

Munir A., Javed GA., Javed S., Arshad N. Levilactobacillus brevis from carnivores can ameliorate hypercholesterolemia: in vitro and in vivo mechanistic evidence. Journal of Applied Microbiology 2022; 133(3): 1725–1742. doi: 10.1111/jam.15678

Park T., Yoon J., Yun YM., Unno T. Comparison of the fecal microbiota with high- and low performance race horses. Journal of Animal Science and Technology 2023; doi: 10.5187/jast.2023.e45

Perricone V., Sandrini S., Irshad N., Comi M., Lecchi C., Savoini G., Agazzi A. The role of yeast saccharomyces cerevisiae in supporting gut health in horses: An updated review on its effects on digestibility and intestinal and fecal microbiota. Animals 2022; 12(24): 3475. doi: 10.3390/ani12243475

Schoster A., Weese JS., Guardabassi L. Probiotic use in horses–what is the evidence for their clinical efficacy? Journal of Veterinary Internal Medicine 2014; 28(6): 1640-1652.

Schoster A., Guardabassi L., Staempfli HR., Abrahams M., Jalali M., Weese JS. The longitudinal effect of a multi-strain probiotic on the intestinal bacterial microbiota of neonatal foals. Equine Veterinary Journal 2016; 48(6): 689-696.

Shi J., Zhao G., Huang X., Li X., Ma Y., Yang K. Effects of lactobacillus rhamnosus supplementation on growth performance, immune function, and antioxidant capacity of newborn foals. Journal of Equine Veterinary Science 2023; 129: 104501.

Silva JA., Castañares M., Mouguelar H., Valenciano JA., Pellegrino MS. Isolation of lactic acid bacteria from the reproductive tract of mares as potentially beneficial strains to prevent equine endometritis. Veterinary Research Communications 2024; 48(3): 1353-1366.

Tanabe S., Suzuki T., Wasano Y., Nakajima F., Kawasaki H., Tsuda T., Morita H. Anti-inflammatory and intestinal barrier–protective activities of commensal lactobacilli and bifidobacteria in thoroughbreds: role of probiotics in diarrhea prevention in neonatal thoroughbreds. Journal of Equine Science 2014; 25(2): 37-43.

Weese JS., Sharif S., Rodriguez-Palacios A. Probiotics in veterinary medicine. Therapeutic Microbiology: Probiotics and Related Strategies 2008; 26: 341-356.

Wilmink JM., Ladefoged S., Jongbloets A., Vernooij JC. The evaluation of the effect of probiotics on the healing of equine distal limb wounds. PloS one 2020; 15(7): e0236761.

Zaib S., Hayat A., Khan I. Probiotics and their beneficial health effects. Mini-reviews in Medicinal Chemistry 2024; 24(1): 110-125.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
8(4): 2006-2038, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 8(4): 2006-2038, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Kanser Tedavisinde PI3K/AKT/mTOR Yolunun Hedeflenmesi: Yeni Nesil mTOR İnhibitörlerine Güncel Bir Değerlendirme

Erhan APTULLAHOĞLU[1,2*]

[1]Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye
[2]Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Bilecik, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-9400-0938
*Sorumlu yazar: erhan.aptullahoglu@bilecik.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 30.12.2024
Kabul tarihi:16.05.2025
Online Yayınlanma:16.09.2025

Anahtar Kelimeler:
PI3K/AKT/mTOR yolu
mTOR inhibitörleri
İkili inhibitörler
mTORC1
mTORC2

ÖZ

Fosfatidilinositol-3 kinaz (PI3K)/protein kinaz B/rapamisin memeli hedefi (PI3K/AKT/mTOR) sinyal yolu, kanser gelişiminde kritik bir role sahiptir. Çeşitli kanser türlerinin gelişimiyle ilişkilendirilen bu yolun aşırı aktivasyonu, kanser hücrelerinin proliferasyonunu ve metastatik potansiyelini artırmaktadır. PI3K/AKT/mTOR yolak sisteminin kritik bir bileşeni olan ve AKT tarafından aktive edilen mTOR, hücre proliferasyonu, metabolizma, translasyon, hücre döngüsünün ilerleyişi ve hücresel hayatta kalma gibi temel biyolojik süreçlerin düzenlenmesinde görev alan bir serin/treonin kinazdır. Özellikle mTOR'un iki ana kompleksi olan mTORC1 ve mTORC2, kanser hücrelerinin hayatta kalma ve proliferasyonunu destekleyen anahtar moleküller içerir. Bu derlemede, mTOR'un kanser tedavisi için önemli bir hedef olduğu vurgulanmakta ve mTOR inhibitörlerinin bu yolağı baskılayarak kanser hücrelerini nasıl etkilediği incelenmektedir. Rapamisin ve türevleri gibi mTOR inhibitörleri, biyolojik etkileri nedeniyle kanser tedavisinde umut vadeden ajanlar olarak değerlendirilmekte; ancak ilaç direnci ve toksisite, bu potansiyelin klinik uygulamalara yansımasını sınırlamaktadır. Bu nedenle, daha spesifik ve etkili ajanlara duyulan ihtiyaç doğrultusunda geliştirilen yeni nesil mTOR inhibitörleri bu derlemede ele alınmıştır. Özellikle PI3K/mTOR gibi ikili inhibitör stratejilerinin, hem mTORC1 hem de mTORC2 komplekslerini hedef alarak kanser hücrelerinin büyümesini ve metabolizmasını baskıladığı, ancak bu inhibitörlerin klinik kullanımı için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, PI3K/AKT/mTOR yolunun inhibisyonu üzerine yapılan klinik çalışmaların, kemoterapi ve diğer hedefe yönelik tedavilerle kombinasyonunun daha iyi sonuçlar verdiği ve tekli tedavilere göre daha etkili olduğu da vurgulanmıştır.

Targeting the PI3K/AKT/mTOR Pathway in Cancer Therapy: A Current Evaluation of Next-Generation mTOR Inhibitors

Reviews

Article History:
Received: 30.12.2024
Accepted: 16.05.2025
Published online:16.09.2025

Keywords:
PI3K/AKT/mTOR pathway
mTOR inhibitors
dual inhibitors
mTORC1

ABSTRACT

The phosphatidylinositol-3 kinase (PI3K)/protein kinase B/mammalian target of rapamycin (PI3K/AKT/mTOR) signaling pathway plays a critical role in cancer development. Hyperactivation of this pathway, which has been associated with the progression of various cancer types, enhances cancer cell proliferation and metastatic potential. A key component of the PI3K/AKT/mTOR signaling cascade, mTOR—a serine/threonine kinase activated by AKT—regulates fundamental biological processes such as cell proliferation, metabolism, translation, cell cycle progression, and survival. In particular, the two major mTOR complexes, mTORC1 and mTORC2,

mTORC2 contain crucial effectors that support cancer cell growth and survival. This review highlights the significance of mTOR as a therapeutic target in cancer and explores how mTOR inhibitors suppress tumor progression by disrupting this pathway. Rapamycin and its analogs, as mTOR inhibitors, have shown promising biological activity in cancer treatment; however, clinical efficacy has been limited due to drug resistance and toxicity. Consequently, this review focuses on the development of novel, more specific and potent mTOR inhibitors to overcome these limitations. Notably, dual inhibition strategies targeting both mTORC1 and mTORC2, such as PI3K/mTOR dual inhibitors, have demonstrated potential in suppressing cancer cell growth and metabolism. Nevertheless, further research is needed to optimize their clinical application. Moreover, clinical studies suggest that combining PI3K/AKT/mTOR pathway inhibitors with chemotherapy or other targeted therapies yields better outcomes compared to monotherapy approaches.

To Cite: Aptullahoğlu E. Kanser Tedavisinde PI3K/AKT/mTOR Yolunun Hedeflenmesi: Yeni Nesil mTOR İnhibitörlerine Güncel Bir Değerlendirme. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(4): 2006-2038.

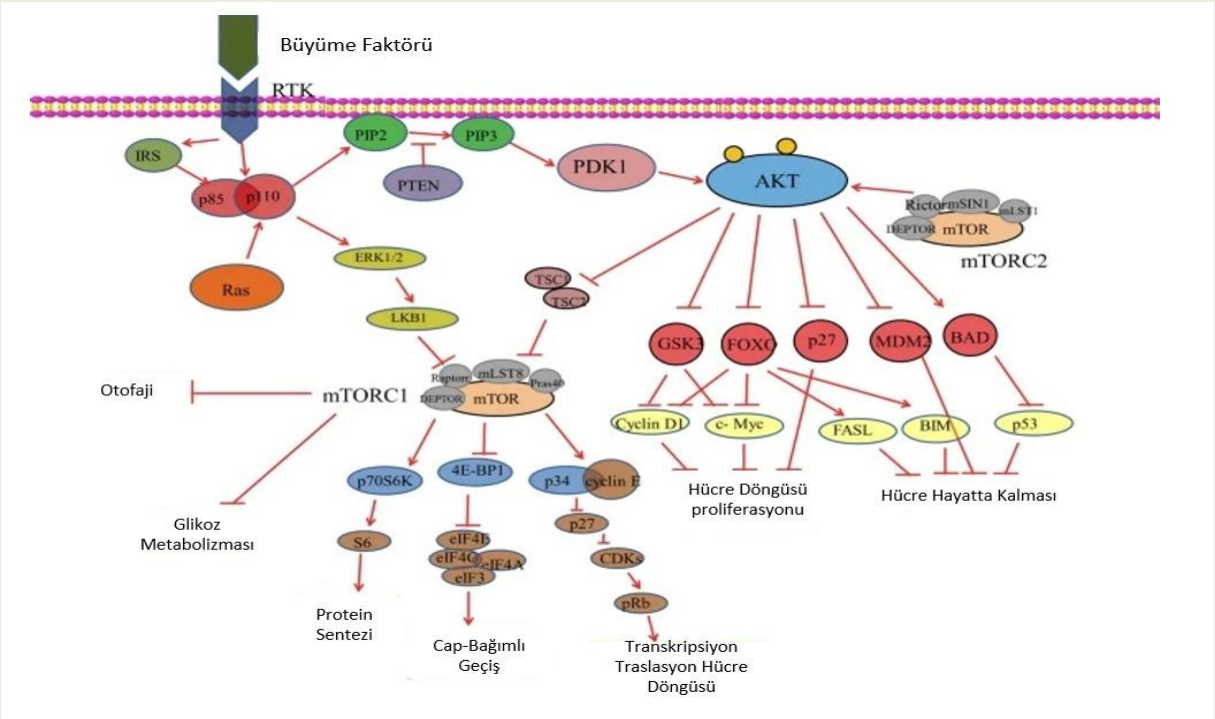
1. Giriş

1.1. PI3K/AKT/mTOR Sinyal Yolu

Fosfatidilinositol-3 kinaz (PI3K)/protein kinaz B/rapamisin memeli hedefi (PI3K/AKT/mTOR) sinyal yolu, hücrelerin hayatta kalması, hücre döngüsünün ilerlemesi, hücre büyümesi, proliferasyon, transkripsiyon ve translasyon gibi temel hücresel süreçlerde rol oynayan korunmuş bir sinyal yolağıdır (Glaviano ve ark., 2023). Kanserde ana düzenleyici olan önemli hücre içi yollardan biridir (Yang ve ark., 2019). PI3K/mTOR'daki düzensizliklerin insanlarda çeşitli kanser türlerinin gelişimi ile ilişkili olduğu bilinmektedir (Saxton ve Sabatini 2017; Liu ve Sabatini 2020). Farklı kanser türlerinin tedavisinde PI3K/mTOR inhibitörlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürütülmektedir (Ali ve ark., 2022).

mTOR, PI3K ailesinin içerisinde yer alan bir serin/treonin kinazdır (Chiarini ve ark. 2010; Zou ve ark. 2020). Translasyon, hücre göçü ve sağ kalımının yanında protein sentezinde önemli rol oynamakta ve ayrıca hücre metabolizmasının düzenlenmesinde görevli olduğu bilinmektedir (Moore ve ark. 2011). PI3K/AKT/mTOR yolunun aktivitesinde görülen artışların genellikle kanserde kötü prognoza ve kemoterapötik dirence neden olduğu bildirilmiştir (Steelman ve ark., 2016; Simioni ve ark., 2019).

Büyüme faktörleri, hücre yüzeyi membranındaki tirozin kinaz reseptörlerine bağlanır ve hücre içi PI3K'yi indükler. p85 ve p110 alt birimlerinden oluşan PI3K'nin aktivasyonu, hücresel protein kinazları harekete geçirir ve buna bağlı olarak da bir serin/treonin kinaz olan AKT'nin de dâhil olduğu aşağı yönlü kinazları aktive eder (Wang ve ark. 2016) (Şekil 1). PI3K/mTOR yolu, kanser hücrelerinde sıklıkla aşırı aktive edilmektedir ve kanser hücrelerinin hızlı büyümesine, çoğalmasına ve metastazına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, PI3K/mTOR yolu kanser tedavisinde hedeflenen bir mekanizma haline gelmiştir (Teachey ve ark. 2006).



Şekil 1: PI3K/AKT/mTOR sinyal yolunun genel görünümü (Xu ve ark. 2020).

1.2. PI3K/AKT/mTOR Sinyal Yolunun Kanserle İlişkisi

PI3K/AKT/mTOR sinyal yolu, insan kanserlerinde farklı yukarı akış düzenleyicileri ve aşağı akış efektörlerini içeren karmaşık bir sinyalleşme zincirinin parçası olarak kritik öneme sahiptir (Dibble ve Cantley 2015). Tümörler, sınırlı besin ve oksijenin yanı sıra düşük pH ile de karakterize edilen ortamlarda hayatta kalabilmekte ve oluşumlarını tamamlayabilmektedirler. Hücresel stres durumunda hücrelerin hayatta kalmasının temel düzenleyicisi ve insan kanserlerinde de en sık aktive edilen yollardan biri PI3K/AKT/mTOR sinyal yoludur (Alzahrani 2019). Bu yolun kanser hücrelerindeki onkogenik aktivasyonu, besin taşıyıcılarının ve metabolik enzimlerin aktivitesini arttırarak hücresel metabolizmayı yeniden programlar; bu sayede anormal şekilde büyümekte olan hücrelerin anabolik isteklerini destekler (Hoxhaj ve Manning 2020). *MTOR* geninde meydana gelen bazı mutasyonlar, mTOR'un kinaz aktivitesini arttırarak aşağı yönde proliferatif yolların indüklenmesine neden olmaktadır (Laplante ve Sabatini, 2012). *MTOR* mutasyonları, mesane kanseri gibi malign tümörlerde yaygın olarak görülmektedir (Zhang ve ark., 2017). Ayrıca, PI3K/AKT/mTOR yolunun önemli bir negatif düzenleyicisi olan PTEN (Fosfataz ve Tensin Homoloğu)'de meydana gelen fonksiyon kayıpları (örneğin, *PTEN* genindeki mutasyonlara bağlı olarak), sırasıyla PIP3 (Fosfatidilinozitol (3,4,5)-trifosfat) birikimine, AKT'nin aşırı aktivasyonuna ve mTORC1/C2'nin aşırı aktivitesine yol açar. *PTEN* genindeki mutasyonlar genomik stabiliteyi bozar ve diğer zararlı mutasyonlarda da birikim gözlemlenir (Song ve ark. 2012).

2. mTOR İnhibitörleri

Allosterik inhibitörlerin (rapamisin, everolimus, temsirolimus vb.) yalnızca mTORC1'i hedef aldığı (Teachey ve ark. 2006; Steelman ve ark. 2016), ATP rekabetçi ve ikili inhibisyon için kullanılan inhibitörlerin ise PI3K/mTOR kompleksini hedef aldığı yapılan çalışmalarda anlaşılmıştır (Gazi ve ark. 2017). PI3K/AKT/mTOR yolunun sıklıkla aktive edildiği bir dizi tümör tipinde bu ajanların yalnızca mTORC1 kompleksini inhibe ettiği görülmüştür (Guertin ve Sabatini 2007). Ek olarak, mTORC1 inhibitörlerinin, mTORC2 aracılığıyla PI3K/AKT geri bildirim aktivasyonuna yol açtığı görülmüştür (Faivre ve ark. 2006). mTORC2 aracılı fosforilasyonun ve AKT aktivasyonunun durdurulamaması nedeniyle ilk geliştirilen inhibitörlerin etkinliği kısmen sınırlı olabilmiştir. Buna bağlı olarak da mTORC1 ve mTORC2'yi spesifik olarak ikili hedefleyen mTOR inhibitörlerinin kullanılması önem kazanmıştır (Carroll ve ark. 2017).

mTOR inhibitörleri, klinik öncesi deneylerde umut vermektedir ancak erken faz klinik denemelerde dirençli hücrelerin gelişimi ve spesifik olmayan sitotoksik etkileri bu ajanların kullanımını sınırlandırmıştır (Bendell ve ark. 2015). Yakın zamanlarda geliştirilen yeni mTOR inhibitörleri ile elde edilen bulgular bu algıyı yıkmakla birlikte; PI3K/AKT/mTOR sinyal yolağı inhibitörlerinin kombine olarak kemoterapi veya diğer hedefe yönelik ajanlarla birlikte kullanımının da oldukça etkili sonuçlar verdiği görülmüştür (Bartalucci ve ark. 2013).

İlk dönemlerde mTOR inhibitörleri ile büyük bir klinik başarı elde edilememesinin temel sebebi, ortaya çıkan yüksek toksisite ve ilaç direncine dayanmaktadır (Chen ve Zhou 2020). PI3K/AKT/mTOR yolunu hedef alan çok sayıda bileşik keşfedilmiş olmasına rağmen çok sınırlı sayıda inhibitör klinik kullanım onayı alabilmiştir (Chen ve Zhou 2020). Bu durumun sebeplerinden biri, FDA onaylı allosterik mTORC1 inhibitörlerinin de dâhil olduğu çoğu inhibitörün, tekli tedavi olarak kullanıldığında tedaviye yanıt oranlarının düşük kalmasıdır (Hudes ve ark. 2007). mTORC1 inhibitörleri tekli ajan olarak kullanıldığında genellikle mTORC1/S6K1 (ribozomal protein S6 kinaz 1) aracılı negatif geri besleme döngüsü bozulur ve bu da paradoksal olarak AKT'nin PI3K ve mTORC2 sinyalleme yoluyla aktivasyonuna yol açar. Başka bir ifadeyle, mTORC1 kompleksinin aktivitesinin baskılanması, iyi tanımlanmış substratlarından biri olan S6K1'in fosforilasyonunu azaltır ve bu durum, mTORC2 aktivitesinin artmasına yol açarak telafi edici bir mekanizmanın devreye girmesine neden olur (Sarbassov ve ark. 2005). Yapılan klinik çalışmalar PI3K/AKT/mTOR yolunu hedef alan inhibitör kombinasyonlarının, bu tür ajanlarla yapılan monoterapiden daha etkili olduğunu göstermiştir (Wu ve ark. 2022). Kombine terapinin monoterapiden daha iyi sonuç vermesinin temel nedeni, içsel ve adaptif dirençte yer alan hücresel mekanizmaların birlikte hedeflenmesidir (Janku ve ark. 2013).

PI3K/AKT/mTOR sinyal kaskatı birçok kanser türünde kanser hücrelerinin hayatta kalması için yapısal olarak aktifleştirilen sinyal yolu olmuştur (LoPiccolo ve ark. 2008). Kanser tedavilerinde önemli bir hedef olarak öne çıkan PI3K/AKT/mTOR yolak inhibitörleri, kapsamlı araştırmalara tabi tutulmuştur. Bu sinyal yolunun ilgi çekici terapötik hedef olmasının sebebi kanserin başlatılması ve

sürdürülmesinde rol alan hücresel süreçleri kontrol etmesine dayanmaktadır (LoPiccolo ve ark. 2008). Preklinik ve klinik çalışmalar, PI3K/AKT/mTOR yolunun aktivasyonunun birçok kanser türü için kötü bir prognostik faktör olduğunu ve tedavilere karşı direnç gelişimine katkıda bulunduğunu göstermektedir (LoPiccolo ve ark. 2008). Bunun yanında, PI3K/AKT/mTOR sinyal yolunun artmış aktivasyonunun, farklı hedefe yönelik tedavilere ve EGFR (Epidermal Büyüme Faktörü Reseptörü) aracılı endokrin tedavilere karşı gelişen dirençle de ilişkili olduğu gösterilmiştir (Miller ve ark. 2011). Kanser tedavisi için onaylanan ilk PI3K/mTOR yolu hedefli ajanlar rapamisin analogları temsirolimus ve everolimus olmuştur (Janku 2017). Bu derleme makalede ele alınan tüm mTOR inhibitörlerinin listesi ve bazı öne çıkan hücresel hedefleri makalenin sonunda Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. mTOR ihibitörlerinin özet listesi ve hücresel hedefleri hakkında kısa bilgiler.

mTOR inhibitörü	Hücresel hedefleri
Rapamisin ve türevleri	
Sirolimus	FKBP12'ye bağlanarak mTORC1 inhibisyonu.
Everolimus	FKBP12'ye bağlanarak mTORC1 inhibisyonu.
Temsirolimus	FKBP12'ye bağlanarak mTORC1 inhibisyonu.
Ridaforolimus	FKBP12'ye bağlanarak mTORC1 inhibisyonu.
PI3K/mTOR ikili inhibitörleri	
Dactolisib	mTORC1 ve mTORC2.
Bimiralisib	PI3K'nin α, β, γ ve δ izoformları, mTORC1&mTORC2.
Gedatolisib	PI3K'nin α izoformu, mTORC1&mTORC2.
Apitolisib	PI3K'nin α, β, γ ve δ izoformları, mTORC1&mTORC2.
mTORC1/mTORC2 ikili inhibitörleri	
XL388	S6K1 ve AKT(Ser473) fosforilasyonunu inhibe eder.
Omipalisib	PI3K'nin α, β, γ ve δ izoformları, mTORC1&mTORC2. fosfo-AKT'yi önemli ölçüde azaltır.
OSI-027	4E-BP1, S6K1 ve AKT fosforilasyonunu inhibe eder.
Sapanisertib	4E-BP1, S6K1 ve AKT(Ser473) fosforilasyonunu inhibe eder.
AZD8055	4EBP1 fosforilasyonunu inhibe eder. PI3K/AKT geri bildirim aktivasyonunu ortadan kaldırır.
Torin1	ATP-rekabetçi mTOR kinaz inhibitörü.
PP242	ATP-rekabetçi mTOR kinaz inhibitörü.
KU-0063794	4E-BP1 ve S6K1 fosforilasyonunu inhibe eder.
ATR/mTOR ikili inhibitörleri	
Torin 2	mTORC1&mTORC2. ATR'yi de inhibe etmektedir.
CC-115	ATR'nin hedef protein CHK1 fosforilasyonunda düşüş sağlar.
Gedatolisib	mTORC1&mTORC2. ATR üzerinde etkilidir. p70S6K ve 4EBP1 fosforilasyonunu inhibe eder.
AZD6738	ATR'yi inhibe ederek DNA onarım süreçlerini engeller. CHK1 ve p53 proteinlerinin fosforilasyonu etkiler.
SPK 98	ATR ve mTOR kinazlarını seçici bir şekilde inhibe eder.
AKT/mTOR ikili inhibitörleri	
Palomid-529	mTORC1&mTORC2. AKT'yi spesifik olarak hedefler.
WYE-125132	mTORC1&mTORC2. AKT'yi spesifik olarak hedefler.
MK-2206	mTORC1&mTORC2. AKT'nin tüm izoformlarını (AKT1, AKT2, AKT3) hedefleyebilir. GSK-3β ve FOXO1 fosforilasyonunu inhibe eder.

2.1. Allosterik mTOR İnhibitörleri

İçsel direnç mekanizmalarının ve PI3K/AKT/mTOR inhibitörlerine karşı kazanılmış direnç mekanizmalarının aydınlatılabilmesi için, yeni nesil dizileme teknolojileri de dahil olmak üzere

yüksek verimli moleküler profilleme çalışmalarının etkili olacağı düşünülmektedir (Popova ve Jücker 2021). Alternatif bir strateji ise, mTORC1'i doğrudan etkilemeden mTORC2'yi seçici olarak hedef alan allosterik inhibitörlerin geliştirilmesidir (Alzahrani 2019). Bazı kanıtlar, PTEN inaktivasyonundan kaynaklanan tümör gelişimini engellemek için mTORC2'yi devre dışı bırakmanın yeterli olduğunu göstermektedir (Ali ve ark. 2022). Yalnızca mTORC2'yi inhibe eden moleküllerin tedavide daha etkili olabileceği düşünülmektedir (Liu ve ark. 2009). Kanser hastalarında mTOR inhibitörlerine verilen farklı tepkilerin altında yatan mekanizmalar oldukça karmaşıktır. Tümör organoidlerinin kullanıldığı ilaç testleri bu mekanizmaların aydınlatılabilmesini kolaylaştıracaktır (Xu ve ark. 2018; Xu ve ark. 2018).

2.2. Rapamisin ve Türevleri

Rapamisin (Sirolimus olarak da bilinir), ilk başlarda antifungal bir ajan olarak geliştirilmiştir (Vezina ve ark. 1975). Bir süre sonra immünosüpresif (Thomson ve Woo 1989) ve anti-proliferatif (Grewe ve ark. 1999) özelliklere sahip olduğu kanıtlanmış ve hücre büyüme düzenlemesini incelemek için çok güçlü bir araç olduğu anlaşılmıştır (Zou ve ark. 2020). *Streptomyces hygroscopikus*'tan (Streptomyces türlerinden bir bakteri) izole edilen rapamisin, bilinen ilk mTOR inhibitörüdür (Vezina ve ark. 1975). Organ nakli reddinin önlenmesine yönelik bir bağışıklık bastırıcı olarak 1999 yılında FDA tarafından onaylanmıştır (Mao ve ark. 2022). Suda çözünürlüğünün düşük olması, kararsız yapısı ve mTOR aktivitesini tamamen inhibe edememesi klinik kullanımını kısıtlamaktadır (Magaway ve ark. 2019). Bu tür inhibitörler, 12 kDa büyüklüğünde bir protein olan FK506 (takrolimus)-bağlayıcı protein 12'ye (FKBP12) bağlandıktan sonra mTOR'un esas kinaz alanı olan rapamisin bağlanma bölgesi (veya FRB alanı) ile üçlü bir kompleks oluşturarak mTOR'un aktif bölgesini inhibe etmektedir (Grewe ve ark. 1999). Burada meydana gelen durum bir allosterik değişim ve buna bağlı olarak kinaz alanının inhibisyonudur (Liu ve ark. 2009).

Rapamisinin suda çözünür bir türevi olan temsirolimus (CCI-779), 2007 yılında ileri seviye renal hücreli karsinom tedavisi için FDA tarafından onaylanmıştır (Gkountakos ve ark. 2018; Mao ve ark. 2022). FKBP12 ve temsirolimus kompleksi, kanser hücrelerinde mTORC1'e bağlanarak aktivitesini inhibe eder (Bukowski 2012; Ali ve ark. 2022). Bunun sonucu olarak da hücre döngüsü düzenleyici proteinlerin translasyonu bloke olur ve anjiyojenik büyüme faktörlerinin aşırı ekspresyonu önlenir (Schulze ve ark. 2014). Yapılan *in vitro* çalışmalar yüksek konsantrasyonlarda temsirolimusun FKBP12 yokluğunda da mTOR'a bağlandığını ve aktivitesini inhibe ettiğini göstermiştir (Ali ve ark. 2022).

Diğer bir suda çözünür rapamisin türevi olan everolimus (RAD001), mTORC1'e allosterik bağlanarak mTOR'u inhibe eder (Efeyan ve Sabatini 2010). Karaciğer transplantasyonu alıcılarında kullanımı 2013 yılında FDA tarafından onaylanmıştır (Mousa ve Keaveny 2019). Everolimus ve bir aromataz inhibitörü olan letrozol kombinasyonunun, letrozol ve plaseboya kıyasla önemli ölçüde daha yüksek oranda antitümör tepkileri oluşturduğu bildirilmiştir (Baselga ve ark. 2009).

Ridaforolimus (AP23573), mTOR kompleksinin bir parçası olan mTORC1'i inhibe eden ve aynı zamanda birinci nesil mTOR inhibitörleri olarak bilinen rapaloglar sınıfına aittir (Spreafico ve Mackay 2013). Birinci nesil mTOR inhibitörleri, mTOR'un FRB alanına bağlanmasına yardımcı olan FKBP12 ile daha yüksek afinitede etkileşime girmektedir (Rodrik-Outmezguine ve ark. 2016). Ridaforolimus, rapamisine kıyasla daha yüksek suda çözünürlük, stabilite ve afiniteye sahiptir (Wang ve ark. 2024). Ridaforolimus katı tümörlerin ve hematolojik malignitelerin tedavisi için çeşitli klinik denemelerde test edilmiş ve endometriyal kanser, yumuşak doku ve kemik sarkomlarında ümit verici etkinlikler göstermiştir (Spreafico ve Mackay 2013). 2012 yılında FDA tarafından onaylanma başvurusu ek klinik çalışmaların gerekliliği ve tedaviye bağlı ciddi yan etkiler sebebiyle reddedilmiş ve Avrupa İlaç Ajansı'na (EMA) yapılan başvuru da geri çekilmiştir.

2.3. PI3K/mTOR İkili İnhibitörleri

Aynı mTOR inhibitörünün uzun süreli kullanımı ve/veya tek bir bağlanma bölgesinin hedeflenmesi sonucunda ilaca direnç gelişimi gözlenebilir. Kombine tedaviler, dual (ikili) inhibitörler veya birden fazla bağlanma bölgesini hedefleyen stratejiler, ilaç direnci sorununun çözümünde faydalı olacaktır (Mao ve ark. 2022). Bu sebeple birden fazla yola etki eden çift hedefli mTOR inhibitörleri geliştirilmektedir (Apsel ve ark. 2008). PI3K/mTOR ikili inhibitörleri hem PI3K'yi hem de mTOR'u inhibe ederek etkinliğini gösterir (Shan ve ark. 2024). Çift hedefli inhibitörler her iki holoenzimin de aktif bölgesini hedef alır ve bu sayede AKT'nin hem yukarı hem de aşağı yöndeki yolunu bloke eder (Serra ve ark. 2008). AKT'nin paradoksal aktivasyonunun mTORC1'in negatif düzenleyicileri ile meydana geldiği düşünülmektedir ve bu bağlamda kullanılacak olan çift PI3K/mTOR inhibitörleri ile bu sorundan kaçınılmış ve daha yüksek düzeyde antitümör aktivitesi elde edilmiş olacaktır (Janku 2017). PI3K'nın p110 alt birimi ile mTOR'un katalitik alanı yapısal olarak benzerdir. İkili PI3K/mTOR inhibitörleri bu benzerlikten yararlanılarak tasarlanmaktadır (Mao ve ark. 2022). FDA, henüz herhangi bir PI3K ve mTOR dual inhibitörüne onay vermemiştir; ancak bu mekanizmaları hedefleyen ve kanser tedavisinde potansiyel faydaları araştırılan bazı ilaçlar, klinik çalışmalarda değerlendirilmeye devam etmektedir (Mao ve ark. 2022). İlk adım olarak daha güçlü bir inhibitör tasarlamak amacıyla deneysel yeni nesil bir mTOR inhibitörü olan sapanisertib (MLN0128) ile rapamisinin birleşimiyle elde edilen RapaLink-1 geliştirilmiştir. RapaLink-1 ikili bağlanma inhibitörleri için başlangıç niteliğindedir (Kuroshima ve ark. 2020).

2.3.1. Dactolisib

Dactolisib (NVP-BEZ235), PI3K ve mTOR'u hedef alan bir dual inhibitördür (Chen ve Zhou 2020). Hem PI3K hem de mTOR'un eş zamanlı inhibisyonu, hücresel büyüme, metabolizma ve hayatta kalma süreçlerini düzenleyerek kanser tedavisinde önemli bir strateji sunar. Klinik denemelere giren ilk PI3K/mTOR dual inhibitörü olan Dactolisib, mTOR'a karşı 20,7 nM ve PI3K izoformlarına karşı 4–75 nM arasında değişen IC_{50} değerlerine sahiptir (Serra ve ark. 2008). İlerlemiş pankreatik

nöroendokrin tümörler, renal hücreli karsinomlar, prostat kanserleri ve diğer ileri evre katı tümörler üzerinde yapılan preklinik ve klinik çalışmalarda, Dactolisib'in sınırlı etkinlik ve tolere edilebilirlik profili sergilediği rapor edilmiştir (Shan ve ark. 2024).

Dactolisib, PI3K ile birlikte hem mTORC1 hem de mTORC2 komplekslerini hedef alır; bu çift yönlü inhibisyon, hücresel büyüme ve metabolizmayı etkileyerek kanser hücrelerinin hayatta kalmasını engeller (Chapuis ve ark. 2010). Özellikle PI3K/AKT/mTOR yolunu baskılayarak hücresel proliferasyon, protein sentezi ve metabolizma üzerinde düzenleyici etki gösterir (Chiarini ve ark. 2010). Dactolisib'in klinik denemelerinde, meme, akciğer, böbrek gibi solid tümörlerde etkili olabileceği ve ayrıca lösemi/lenfoma gibi hematolojik malignitelerde de potansiyel etkinliğe sahip olabileceği değerlendirilmiştir (Chen ve ark. 2023).

2.3.2. Bimiralisib

Bimiralisib (PQR309), hem PI3K'nin hem de mTOR'un inhibitörü olarak klinik öncesi ve klinik çalışmalarda araştırılmaktadır (Tarantelli ve ark. 2018). PI3K'nin α, β, γ ve δ izoformlarını inhibe eden, oral yolla alınabilen seçici bir dual inhibitördür. Hem PI3K hem de mTORC1 ve mTORC2 komplekslerini hedef alarak, protein sentezi ve hücresel büyüme üzerinde doğrudan etkiler gösterirken, hücresel hayatta kalma ve metabolizma üzerinde dolaylı etkiler de yaratmaktadır (Yang ve ark. 2020). Bimiralisib ile yapılan faz I ve II klinik çalışmalarında, özellikle lenfoma hastalarında sınırlı etkinlik ve belirgin toksisite gözlemlenmiştir. Örneğin, relaps ve refrakter lenfoma hastalarında yapılan bir çalışmada, tedaviye yanıt oranı %14 olarak bulunmuş ve tedaviye bağlı ciddi yan etkiler (hiperglisemi, nötropeni, trombositopeni) %70 oranında bildirilmiştir (Collins ve ark. 2021). Bimiralisib'in beyin kan bariyerini geçebilme özelliği, diğer PI3K ve mTOR inhibitörlerinden farklı olarak, merkezi sinir sistemi malignitelerinde potansiyel bir tedavi seçeneği sunmaktadır (Beaufils ve ark. 2017). Bu özellik, tedaviye dirençli beyin tümörleri ve merkezi sinir sistemi lenfomaları gibi hastalıkların tedavisinde umut verici bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Özellikle akciğer kanseri, baş ve boyun kanserleri gibi solid tümörlerde ve lösemi ve lenfoma gibi hematolojik malignitelerde etkinliği araştırılmıştır (Tarantelli ve ark. 2014; Yang ve ark. 2020). Düşük IC_{50} değerleri ve faz I klinik çalışmalarda elde edilen sonuçlarla birlikte PI3K/mTOR ikili inhibitörü olarak umut vericidir (Beaufils ve ark. 2017).

2.3.3. Gedatolisib

Gedatolisib (PKI-587), PI3K ve mTOR sinyal yollarını hedefleyen güçlü bir ATP rekabetçi inhibitördür. Bu bileşik, PI3K'nin yanı sıra mTOR'un hem mTORC1 hem de mTORC2 komplekslerini inhibe etme yeteneğiyle dikkat çeker. *In vitro* ve *in vivo* çalışmalarda, PI3K-α ve mTOR üzerindeki IC_{50} değerleri sırasıyla 0,4 nM ve 1,6 nM olarak belirlenmiştir. Ayrıca, PI3K-γ üzerinde de 5,4 nM IC_{50} değeri göstermektedir (D'amato ve ark. 2014; Alzahrani 2019). Gedatolisib'in antitümör etkinliği, çeşitli kanser türlerinde değerlendirilmiştir. Özellikle, MDA-MB-361 (meme kanseri), H1975 (akciğer

kanseri), HCT116 (kolon kanseri) ve U87MG (gliom) gibi insan tümör hücre hatlarında etkili olmuştur. Bu etkinlik, PI3K/AKT/mTOR yolunun baskılanması ve apoptoz indüksiyonu ile ilişkilendirilmiştir (Mallon ve ark. 2011; Freitag ve ark. 2017; Xie ve ark. 2021). Lenfoma ve lösemi gibi hematolojik malignitelerde de potansiyeli araştırılmıştır (Gazi ve ark. 2017). Faz I klinik denemeleri, bileşiğin güvenliğini ve farmakokinetik profilini değerlendirmiştir (Shapiro ve ark. 2015). Gedatolisib'in faz II klinik denemeleri halen devam etmekte olup, özellikle metastatik prostat kanseri ve HR+/HER2- (östrojen/progesteron reseptör pozitif, HER2 negatif) ileri evre meme kanseri gibi solid tümörlerde kombinasyon tedavileriyle etkinliği değerlendirilen bu çalışmalardan kısa süre içinde sonuç alınması beklenmektedir.

2.3.4. Apitolisib

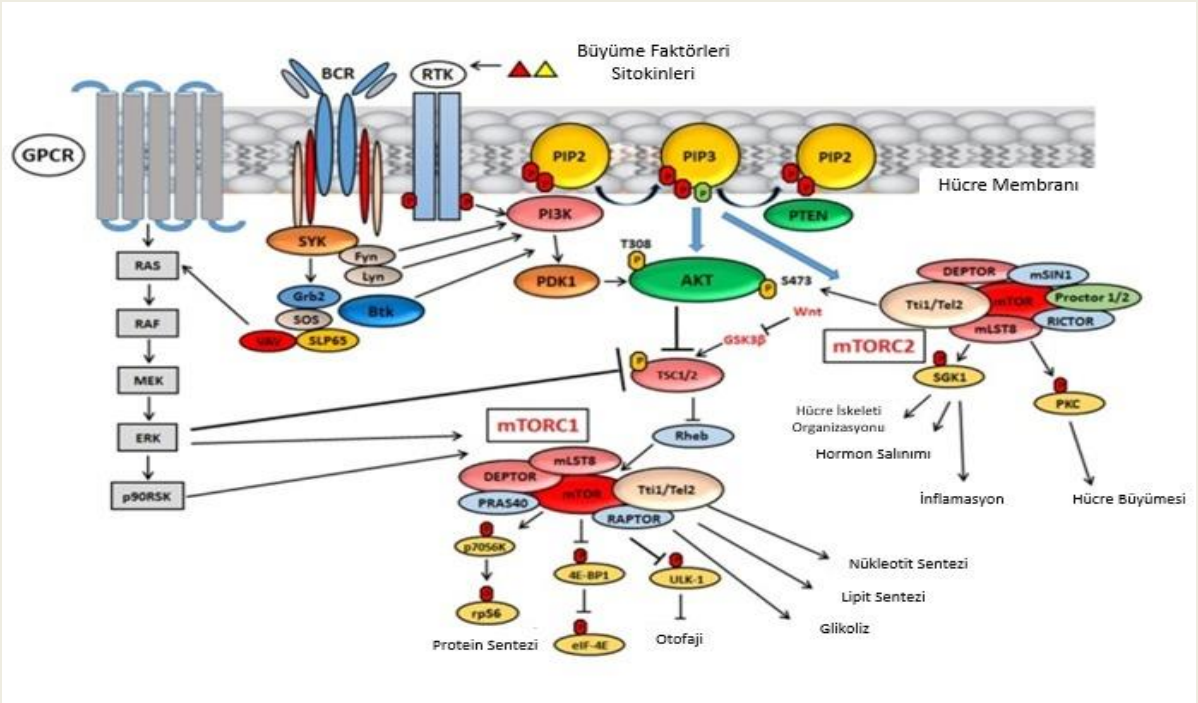
Apitolisib (GDC-0980), PI3K ve mTOR kinazlarını hedefleyen bir diğer PI3K/mTOR dual inhibitörüdür. PI3K izoformlarına karşı düşük nanomolar düzeyde inhibisyon göstermektedir (PI3Kα: 5 nM, PI3Kβ: 27 nM, PI3Kδ: 7 nM, PI3Kγ: 14 nM) ve mTOR üzerindeki IC_{50} değeri yaklaşık 17 nM'dir. Bu değerler, apitolisib'in hem PI3K hem de mTOR kinazları üzerinde güçlü ve seçici bir inhibitör profiline sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Mao ve ark. 2022).

2016 yılında yayımlanan bir faz I klinik çalışmada, apitolisib'in 120 ileri evre solid tümörlü hastada güvenilirliği, doz toleransı ve erken antitümör etkinliği değerlendirilmiştir. Günlük 40 mg dozda uygulanan apitolisib, hedeflenen kinazları inhibe ederek fosfo-AKT seviyelerinde %90'dan fazla azalma sağlamıştır. Ayrıca, 40 mg dozda apitolisib uygulanan hastaların %66'sında, FDG-PET görüntülemesinde metabolik aktivitede %25'ten fazla azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, apitolisib'in hedef modülasyonu sağladığını ve klinik etkinlik potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Dolly ve ark. 2016). Apitolisib, *PIK3CA* gen mutasyonu taşıyan tümörlerde, mutasyon taşımayanlara kıyasla daha yüksek antitümör aktivite göstermiştir. Bu bulgu, ilacın belirli genetik alt tiplerde daha yüksek etkinlik potansiyeline sahip olabileceğini düşündürmektedir (Dolly ve ark. 2016).

Apitolisib'in etkinliği, akciğer kanseri gibi solid tümörlerin yanı sıra lenfoma ve lösemi gibi hematolojik malignitelerde de incelenmiştir (Wallin ve ark. 2011; Omeljaniuk ve ark. 2021). Meme kanseri, pankreas kanseri, küçük hücreli olmayan akciğer kanseri ve kolon kanseri hücre dizileri gibi farklı kanser hücreleri üzerinde anlamlı etkinlik gösterdiği yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Sutherlin ve ark. 2011). Sonuç olarak, apitolisib, PI3K ve mTOR yollarını hedefleyen etkili bir tedavi seçeneği sunmaktadır. Ancak, tedavi sırasında yan etkilerin yönetimi ve optimal dozajın belirlenmesi önemlidir. Gelecekteki faz II ve III klinik çalışmalar, apitolisib'in etkinliğini ve güvenliğini daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirecektir.

2.4. mTORC1/ mTORC2 İkili İnhibitörleri

mTOR, hücre döngüsünün ilerlemesini kontrol eden iki ana kompleks olan mTORC1 (mTOR Kompleks 1) ve mTORC2'yi (mTOR Kompleks 2) içermektedir (Laplante ve Sabatini 2012) (Şekil 2). mTORC1 esas olarak hücre büyümesini ve metabolizmasını düzenlerken, mTORC2 ise hücre çoğalmasını ve hayatta kalmasını kontrol etmektedir (Unni ve Arteaga 2019). mTORC1 ayrıca besin algılama rolünü de üstlenmektedir (Hoshii ve ark. 2014). mTORC1 inhibitörlerinin etki mekanizması daha iyi bilinmesine karşın; mTORC2'nin kanserdeki rolü net olarak bilinmemektedir fakat bazı kanser türlerinde aşırı eksprese olduğu bilinmektedir (Sabatini 2006; Guertin ve Sabatini 2007). mTORC2, RICTOR (Rapamisin Duyarsız mTOR Ortak Proteini) adı verilen bir molekülle bağlantılı olduğundan oldukça önemlidir, çünkü RICTOR molekülünün kaybı hücre için hayatidir (Ali ve ark. 2022). mTORC2'nin mTORC1'den ayrı olarak rapamisine karşı duyarsız olduğu bilinmektedir (Alzahrani 2019). RICTOR endojen mTORC2 kompleksinin bir bileşeni olup kompleksin bütünlüğü ve stabilitesinin korunmasında görev almaktadır (Zhao ve ark. 2020).



Şekil 2. mTORC1 ve mTORC2'nin sinyal mekanizmaları ve ana fonksiyonları (Simioni ve ark. 2019).

mTOR kompleksi TOR proteini ve onunla etkileşim halinde olan bir dizi protein ve enzimden oluşur (Sabatini 2006). Substratları arasında Ser/thr protein Kinaz, AKT, SGK1 (Serum/glukokortikoidle düzenlenen kinaz 1) ve PKC (Protein kinaz C) bulunmaktadır. PKC mTORC2 tarafından aktive edilmektedir (Sarbassov ve ark. 2006). AKT fosforilasyonunun büyüme, metabolizma, apoptoz gibi olaylarda büyük rolü olduğu bilinmektedir. mTORC2 ise AKT'yi Ser473 bölgesinden doğrudan fosforile ederek aktive etmektedir ve bu sebeple AKT'de meydana gelen bozulmalar mTORC2'de inhibisyona neden olacaktır (Sarbassov ve ark. 2006). Ayrıca mTORC2 büyüme ve iyon taşıma gibi görevleri olan ve bir kinaz olan SGK1'in de aktivasyonundan sorumludur. Bu da bize mTOR'da

meydana gelecek bir inhibisyonun SGK1'i de inhibe edeceğini gösterir (Guertin ve ark. 2006). PTEN molekülü fosfat ve tensinden oluşan bir tümör baskılayıcı proteindir ve PI3K/AKT/mTOR kompleksinin negatif düzenleyicisi olmasıyla birlikte; fosfatidilinositol (3,4,5)-trisfosfatın (PIP3) fosfatidilinositol (4,5)-bisfosfata (PIP2)' nin defosforilsyonundan sorumludur (Sanchez ve ark. 2019). mTOR, S6K1 tarafından Ser-2448 bölgesinde fosforile edilir ve bu fosforilasyon, mTOR'un kinaz aktivitesini düzenler (Ragupathi ve ark. 2024). AKT mTORC1'i inaktive edebilmek için TSC2 (Tüberoskleroz kompleksi 2)'yi fosforiller ve böylelikle mTORC1 inaktive olmuş olur (Manning ve Toker 2017).

TSC1 (Tüberoskleroz Kompleksi 1) ve TSC2'den oluşan heterodimer yapı mTORC1'in negatif düzenleyicisi olarak rol almaktadır ve bu kompleks mTORC1 aktivitesi için moleküler anahtar görevindedir (Chiang ve Abraham 2005). Yüksek stres koşullarında mTORC1 aktivitesi TSC1/TSC2 kompleksi tarafından bloke edilirken; büyüme faktörü uyarımı ve yüksek hücre büyüme koşullarının olduğu uygun koşullar altında TSC1/TSC2 kompleksinin mTORC1 aktivitesini etkinleştirdiği bilinmektedir (Laplante ve Sabatini 2012). AKT ve ERK1/2 (Hücresel Dış Sinyal Düzenlenen Kinaz 1 ve 2) gibi yukarı akış sinyal kinazları, TSC1/2 kompleksini fosforile ederek inaktive ederler; bu durum, mTORC1'in aktive olmasına ve sonuç olarak eIF4E bağlayıcı protein 1 (4EBP1) ile S6K gibi translasyonel düzenleyicilerin fosforilasyonuna yol açar. Bu fosforilasyonlar, protein sentezinin artmasına ve hücresel büyümenin teşvik edilmesine neden olur (Schalm ve Blenis 2002; Ma ve Blenis 2009). S6K, translasyon mekanizmasının diğer bileşenlerini kodlayan mRNA'ların translasyonunu düzenler. Ayrıca, mTORC1 aracılığıyla, lizozomal biyogenez ve otofaji süreçlerinde önemli rol oynayan transkripsiyon faktörü EB (TFEB) aracılığıyla lizozomal fonksiyonu da kontrol eder (Simioni ve ark. 2019). mTORC1'in otofaji gibi katabolik yolları bloke ederek hücre büyümesini desteklediği bilinmektedir (Hong ve ark. 2017; Ma ve ark. 2017). mTORC2 spesifik olarak büyüme faktörlerini algılamaktadır ve bu sayede hücrenin hayatta kalmasını ve metabolizmasını kontrol edebilmektedir (Zou ve ark. 2020). Çeşitli kanser türlerinde mTORC2'nin aşırı eksprese edildiği bilinmektedir (Gkountakos ve ark. 2018).

2.4.1. XL388

XL388 bileşiği, mTORC1 ve mTORC2'yi inhibe eden mTOR inhibitörlerinin yeni bir yapısal türü olarak keşfedilmiştir (Takeuchi ve ark. 2013; Zhu ve ark. 2016). Meme kanseri hücre hattı olan MCF-7 hücrelerinde, ribozomal protein S6 kinaz beta-1 (p70S6K) ve AKT (Ser473) fosforilasyonunu inhibe ettiği saptanmıştır (Takeuchi ve ark. 2013). XL388'in mTOR üzerindeki IC_{50} değeri, mTORC1 için genellikle 8 nM, mTORC2 için ise 166 nM olarak belirlenmiştir (Takeuchi ve ark. 2013).

XL388, çeşitli kanser türleri ve diğer hastalıkların tedavisinde potansiyel bir terapötik ajan olarak değerlendirilmiştir (Dominguez ve ark. 2022). mTORC1'i inhibe ederek hücresel proliferasyonu baskılar ve bunun sonucunda mTORC2 üzerindeki etkilerinin, mTORC1 inhibisyonunu destekleyici olabileceği öne sürülmektedir (Zhu ve ark. 2016). XL388 inhibitörü, glioblastoma modellerinde

gösterdiği etkinlik nedeniyle klinik öncesi araştırmalarda potansiyel terapötik bir ajan olarak umut verici sonuçlar ortaya koymuştur (Zhong ve ark. 2020; Amin ve ark. 2021). Henüz herhangi bir klinik denemeye girmemiştir.

2.4.2. Omipalisib

Omipalisib (GSK2126458), GlaxoSmithKline (GSK) tarafından geliştirilen, PI3K ve mTOR sinyal yolaklarını inhibe eden güçlü bir bileşiktir. PI3K'nın α, β, γ ve δ izoformları ile mTORC1 ve mTORC2'yi hedef alır ve kanser hücrelerinde bu yolakların aşırı aktivasyonunu engelleyerek tümör büyümesini sınırlayabilir (Knight ve ark. 2010; Leung ve ark. 2011; Munster ve ark. 2016; Feng ve ark. 2021). Omipalisib, PI3Kα üzerinde 0,04 nM'lik düşük bir IC_{50} değeri ile en etkili inhibitörlerden biri olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, mTORC1 ve mTORC2 üzerinde sırasıyla 0,18 nM ve 0,3 nM'lik Ki değerleriyle yüksek selektiviteye sahiptir (Wu ve ark. 2022). mTORC1/C2 ATP rekabetçi çift inhibitörü olan Omipalisib, fare ksenograft modellerine bakıldığında, katı tümörlerde rapamisinden daha az etkilidir (Narov ve ark. 2017; Feng ve ark. 2021). Buna karşın mTORC1/C2'yi güçlü bir şekilde inhibe edebilir, fosfo-AKT'yi önemli ölçüde azaltabilir ve büyümeyi baskılayabilir (Leung ve ark. 2011). Bir faz I çalışması, Omipalisib'in böbrek, meme ve endometriyum kanserleri gibi ileri evre katı tümörlerde kalıcı objektif yanıtlar indüklediğini göstermiştir (Munster ve ark. 2016). Ancak, bu erken dönem bulgulara rağmen, ilacın klinik geliştirme sürecinde daha ileri fazlara geçildiğine ilişkin herhangi bir veri mevcut değildir.

2.4.3. OSI-027 (ASP7486)

Bir çalışmada imidazo [1,5- a] pirazin iskeletinden optimize edilmiş bir pirazolo [3,4- d] pirimidin-4-amin analoğu geliştirilerek OSI-027 bileşiği elde edilmiştir (Crew ve ark. 2011). Katı tümör ve lenfoma tedavisinde OSI-027 bileşiği faz I klinik denemelerini tamamlamıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda OSI-027'nin çeşitli kanser modellerinde 4E-BP1 (Ökaryotik çeviri başlatma faktörü 4E-bağlayıcı protein 1), S6K1 ve AKT'nin fosforilasyonunu tamamen inhibe ettiği ve rapamisine dirençli bir ksenograft modelinde güçlü antitümör etki gösterdiği gözlemlenmiştir (Bhagwat ve ark. 2011; Xu ve ark. 2021). mTORC1/C2'yi eş zamanlı hedefleyen bir inhibitör olarak sınıflandırılan OSI-027, deneysel bir kanser tedavi adayı olarak değerlendirilmiş, ancak klinik geliştirme sürecinde ilerleyememiştir (Bhagwat ve ark. 2011). OSI-027'nin mTORC1 üzerindeki IC_{50} değeri 20-50 nM aralığındadır. mTORC2 üzerindeki IC_{50} değeri ise 50-100 nM aralığındadır (Bhagwat ve ark. 2011).

2.4.4. Sapanisertib

Sapanisertib (INK128 veya MLN0128), bir mTORC1/C2 inhibitörüdür ve mTORC1 üzerinde özellikle etkilidir (Hayman ve ark. 2014; Jiang ve Wang 2015). AKT (Ser473), S6K1 ve 4E-BP1'in fosforilasyonunu aynı anda inhibe eden bu bileşik güçlü ve oldukça seçici bir mTORC1 ve mTORC2 inhibitörüdür (Hayman ve ark. 2014). Pankreas karsinomu hücre hatlarının radyosensitivitelerini

tanımlamak amacıyla yapılan ksenograft modeli temelli bir çalışmada Sapanisertib oral uygulamasının tümör anjiyogenezini ve tümör büyümesini inhibe ettiği bulunmuştur (Hayman ve ark. 2014; Satta ve ark. 2023). Başka bir çalışmada ise Sapanisertib ile rapamisin karşılaştırılmış ve sonuç olarak tüberoz skleroz ile ilişkili tümörleri olan hastalarda Sapanisertib'in daha etkili olduğu görülmüştür (Guo ve ark. 2018). Başka bir çalışmada ise B-hücreli akut lenfoblastik lösemi hücrelerinin büyümesini inhibe ettiği ve koloni oluşumunu azalttığı saptanmıştır (Janes ve ark. 2013). IC_{50}'si 1 nM civarında olan Sapanisertib rapamisinden daha etkilidir (Hayman ve ark. 2014). Sapanisertib, mTORC1 ve mTORC2'yi hedefleyen bir inhibitör olarak, çeşitli kanser türlerinde klinik araştırmalarda değerlendirilmektedir. Farklı hastalık gruplarında yapılan faz II çalışmalarda, tedavi kombinasyonlarının bazı hastalarda klinik aktivite gösterdiği, ancak genel yanıt oranı hedeflerini karşılamadığı görülmüştür (Al-Kali ve ark. 2023; Han ve ark. 2023). İleride yapılacak çalışmaların, bu ilacın çeşitli tedavi kombinasyonları içerisindeki etkinliğini ve güvenliğini kapsamlı biçimde incelemesi, klinik uygulamalara önemli katkılar sağlayabilir.

2.4.5. AZD8055

AZD8055, AstraZeneca tarafından geliştirilmiş ve mTORC1/C2'yi hedefleyen bir ilaç adayı olarak ortaya çıkmıştır (Vaughan ve ark. 2011; Hadley ve ark. 2019). Rekombinant mTOR enzimi üzerinde elde edilen IC_{50} değeri 0,13 nM olan AZD8055'in, farklı hücre modellerinde bu değeri 1–53 nM aralığında değişmekle birlikte, düşük nanomolar düzeyde kaldığı bildirilmiştir. Bu özellikleriyle AZD8055, güçlü ve seçici bir mTORC1/C2 inhibitörü olarak tanımlanmaktadır (Pike ve ark. 2013). Nörofibromatozis tip 1 (NF1) tedavisinde pediatrik hastalarda kullanılan, mitojen ile aktive olan protein kinaz kinaz (MEK) inhibitörü Selumetinib ile kombine kullanıldığında, apoptozun indüklenmesinde ve tümör büyümesinin baskılanmasında etkili olabilmektedir (Huang ve ark. 2011; Sun ve ark. 2022). Yapılan çalışmalar, AZD8055'in eIF4E bağlayıcı protein 1'in (4EBP1) çok bölgeli fosforilasyonunu tamamen inhibe ettiğini ve bu yolla cap-bağımlı translasyonu etkin biçimde baskıladığını ortaya koymuştur (Willems ve ark. 2012; Sun ve ark. 2022). AZD8055 ile tedavi edilen akut miyeloid lösemi hücrelerinde mTORC1'e bağlı PI3K/AKT geri bildirim aktivasyonunun da tamamen ortadan kaldırıldığı gözlemlenmiştir (Huang ve ark. 2011).

AZD8055 faz I klinik denemelerinde, ilacın güvenli bir şekilde tolere edildiği ve farmakokinetik özelliklerinin uygun olduğu gösterilmiştir; ancak sınırlı klinik etkinlik ve gözlemlenen terapötik yanıtların yetersizliği nedeniyle daha ileri faz çalışmalarına geçilmemiş ve klinik geliştirme süreci sonlandırılmıştır.

2.4.6. Torin1

ATP'ye rekabetçi bir mTOR inhibitörü olan Torin1'in, mTORC1'in tüm hedef proteinlerinin fosforilasyonunu etkili bir şekilde baskıladığı gösterilmiştir (Thoreen ve ark. 2009). Buna karşılık, rapamisin yalnızca belirli mTORC1 işlevlerini engelleyebilmekte, bazı fonksiyonlar üzerinde ise

yetersiz kalmaktadır. Bu durum, mTORC1'in hücresel yaşam için kritik olan, ancak rapamisine dirençli işlevler barındırdığını ortaya koymaktadır. Torin1'in kullanımı, mTOR sinyal yolaklarının daha kapsamlı biçimde araştırılmasına olanak sağlamıştır. Bu özelliğiyle, klinik açıdan daha etkili mTOR inhibitörlerinin geliştirilmesine katkı sunabileceği düşünülmektedir (Thoreen ve ark. 2009). Torin1, hücrelerde mTORC1 substratlarının fosforilasyonunu yaklaşık 2 nM, mTORC2 substratlarının fosforilasyonunu ise yaklaşık 10 nM gibi düşük konsantrasyonlarda etkili bir şekilde inhibe edebilmektedir (Amin ve ark. 2021). Torin1'in, 450'den fazla kinazla karşılaştırıldığında mTOR'a karşı yaklaşık 100 kat daha yüksek seçicilik göstermesi, onu güçlü ve güvenilir bir deneysel mTOR inhibitörü haline getirmiştir (Thoreen ve ark. 2009). Ancak Torin1'in yüksek hedef seçiciliğine rağmen, düşük çözünürlük, kısa yarı ömür ve sınırlı oral biyoyararlanım gibi farmakokinetik dezavantajlar, klinik gelişimini önemli ölçüde kısıtlamıştır (Mao ve ark. 2022).

Özellikle mTORC1'i hedef alan bir inhibitör olması sebebiyle kanser tedavilerinin yanı sıra metabolik bozuklukların yönetiminde potansiyel bir tedavi olarak değerlendirilmektedir. mTORC1'in enerji dengesini ve metabolizmayı düzenlemesi, bu inhibitörleri obezite ve tip 2 diyabet gibi hastalıkların tedavisinde umut verici bir seçenek haline getirmektedir. Ancak, uzun süreli kullanımları metabolik yan etkilerle ilişkilendirilebileceğinden, dikkatli bir yönetim gereklidir (Vogel ve ark. 2015).

2.4.7. PP242

PP242, bir diğer mTORC1 ve mTORC2 ikili inhibitörüdür (Zeng ve ark. 2012; Lu ve ark. 2020). mTORC1'in aktivitesini engelleyerek, hücrelerin protein sentezini ve büyümesini kısıtlar. Bu, özellikle kanser tedavisinde faydalı olabilir çünkü mTORC1'in aşırı aktivasyonu tümörlerin büyümesini desteklediği bilinmektedir (Ali ve ark. 2022). Preklinik araştırmalarda ve bazı klinik çalışmalarda test edilmiştir (Xing ve ark. 2014; Lu ve ark. 2020). PP242'nin kimyasal yapısı, onun mTOR'a özgül bağlanmasına ve inhibe edici etkisini gerçekleştirmesine olanak sağlarken; PP242, ATP ile bağlanarak mTOR'un aktif formuna geçmesini engeller (Apsel ve ark. 2008). Bu mekanizma, mTOR'un hedef proteinlere fosfat grupları eklemesini durdurarak hücresel büyüme ve proliferasyonu azaltır (Xing ve ark. 2014). PP242'nin mTOR aktivitesini inhibe edici IC_{50} değerleri 1-10 nM aralığındadır (Ducker ve ark. 2014).

2.4.8. KU-0063794

KU-0063794, özellikle mTOR inhibitörü olarak bilinen bir bileşiktir ve mTORC1/C2 üzerinde etkilidir (Syed ve ark. 2013; Jeon ve ark. 2022). mTORC1'in aktivitesini inhibe ederek bu süreçleri hedefler, protein sentezini, hücre büyümesini ve metabolizmayı düzenler ve buna bağlı olarak da hücrenin çevresel streslere ve besin durumuna yanıtını kontrol eder (Yongxi ve ark. 2015; Jeon ve ark. 2022).

KU-0063794, preklinik çalışmalarda ve bazı klinik araştırmalarda değerlendirilmiş, etkinliği ve potansiyel yan etkileri incelenmiştir (García-Martínez ve ark. 2009). mTORC1 üzerindeki IC_{50}

değerleri 10-20 nM aralığındayken; mTORC2 üzerindeki IC_{50} değerleri ise 20-30 nM aralığındadır (Malagu ve ark. 2009). KU-0063794, mTORC1'in hedef proteinleri olan p70S6K ve 4EBP1 üzerindeki fosforilasyon seviyelerinde belirgin bir azalma sağlar (Pike ve ark. 2013).

2.5. ATR mTOR İkili İnhibitörleri

ATR (Ataksi telanjiektazi ve Rad3 ile ilişkili protein) ve mTOR arasındaki ilişki, DNA onarım yolları ve hücresel büyüme süreçleri arasındaki etkileşimleri anlamak açısından önemlidir (Nam ve Cortez 2011). ATR, DNA onarımında ve hücresel stres yanıtında önemli bir protein kinazdır ve özellikle DNA hasarına yanıt olarak aktive olmaktadır (Fokas ve ark. 2014). ATR, genellikle DNA çift sarmalında veya DNA replikasyonu sırasında meydana gelen hasarı tespit eder ve DNA onarımını düzenleyen sinyal yollarını aktive eder; bu da hücre döngüsünün duraklatılması ve DNA onarım mekanizmalarının başlatılması anlamına gelir (Fokas ve ark. 2014). ATR, hücre döngüsünün G2/M aşamasında duraklamayı başlatarak, hasarlı DNA'nın onarılmasını sağlar ve doğru hücre bölünmesini destekler (de Leuw ve Stephan 2017). Ayrıca genetik materyalin stabilitesini korur ve mutasyon riskini azaltır (Brown ve Baltimore 2003).

ATR ve mTOR arasındaki etkileşim, hücresel stres yanıtı ve genetik stabilite ile hücresel büyüme ve metabolizma arasındaki dengeyi sağlar ve DNA hasarına yanıt olarak mTORC1'in aktivitesini etkileyebilir (Liu ve ark. 2013; Tangudu ve ark. 2023). ATR, hücresel stres yanıtını modifiye ederek mTORC2'nin aktivitesini etkileyebilir. mTORC2, AKT gibi hedef kinazları fosforilleyerek hücresel hayatta kalma sinyallerini destekler ve ATR'nin mTORC2 üzerindeki etkisi, hücre iskeletinin düzenlenmesi ve metabolizmanın kontrolü üzerinde rol oynar (Selvarajah ve Carroll 2016). ATR ve mTOR, yaşlanma ve genetik hastalıkların anlaşılması açısından da önemlidir. DNA onarım yollarının ve hücresel büyüme sinyallerinin düzenlenmesi, hücresel yaşlanma süreçlerini etkileyebilir (Selvarajah ve Carroll, 2016). Bu yolların detaylı anlaşılması, genetik hastalıklar, kanser ve metabolik bozukluklar gibi çeşitli sağlık sorunlarına yönelik yeni tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesine yardımcı olabilir.

ATR inhibitörleri, şu an FDA onayı almamış olsa da, kanser tedavisinde potansiyel terapötik ajanlar olarak klinik araştırmalarda değerlendirilmektedir. ATR'nin DNA hasar yanıtındaki rolü nedeniyle, bu inhibitörler, kanser hücrelerinde DNA onarımını hedefleyerek terapötik etkiler gösterebilir. Ancak, etkinlik ve güvenlik profillerinin tam olarak doğrulanabilmesi için daha fazla araştırma gerekmektedir (Barnieh ve ark. 2021). ATR ve mTOR ikili inhibitörleri, tek hedefli tedavilere göre daha geniş bir terapötik etki sağlar. ATR, DNA hasar yanıtını düzenlerken, mTOR hücre büyümesi ve metabolizmasını kontrol eder. Bu ikili inhibisyon, her iki yolakta da aynı anda engellemeler yaparak kanser hücrelerinin hayatta kalma ve direnç mekanizmalarını daha etkin bir şekilde hedefler. Böylece, tek hedefli tedavilere kıyasla daha güçlü ve sürdürülebilir tedavi sonuçları elde edilebilir.

2.5.1. Torin 2

Torin 1 bileşiğindeki bir propiyonilpiperazin grubunun çıkarılması ve aminopiridin kısmının kinolin ile değiştirilmesiyle Torin 2 bileşiği elde edilmiştir (Thoreen ve ark. 2009). Güçlü mTOR aktivitesine ve iyi bir seçiciliğe sahip olan Torin 2 yüksek oranda biyoyararlanım ve metabolik stabilite göstermektedir (Liu ve ark. 2011).

Torin2 bir mTOR/ATR ikili inhibitörüdür ve mTOR sinyal yolunun inhibe edilmesi yoluyla çeşitli biyolojik süreçleri düzenler (Liu ve ark. 2013). mTOR'un hem mTORC1 hem de mTORC2 üzerindeki etkileri ile dikkat çekerken aynı zamanda ATR'yi de inhibe etmektedir ve bu özelliği onu kanser ve diğer hastalıkların tedavisinde potansiyel bir ajan olarak kullanılmasının önünü açmıştır (Shaik ve ark. 2018). Torin 2, geniş çaplı klinik çalışmalarda değerlendirilmemiştir, ancak temel araştırmalarda ve hayvan modellerinde önemli sonuçlar elde edilmiştir (Udayakumar ve ark. 2016).

2.5.2. CC-115

CC-115, hem mTOR hem de ATR inhibitörü olarak işlev görebilen bir bileşiktir ve bu özellikleri nedeniyle kanser tedavisinde potansiyel bir terapötik ajan olarak kullanılmaya başlanmıştır (Faulhaber ve ark. 2021). ATR üzerinde çok yüksek oranında bir inhibisyon sağlayabilmektedir (Mao ve ark. 2024). *İn vitro* çalışmalarda CC-115 inhibitörünün kullanımıyla ATR'nin hedef proteini olan CHK1 (Kontrol noktası Kinaz 1) üzerindeki fosforilasyon seviyelerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir (Dobler ve ark. 2020). Ayrıca, DNA-bağımlı protein kinaz (DNA-PK)/mTOR ikili inhibitörü olarak da kullanılabilmektedir (Tsuji ve ark. 2017).

CC-115'in faz I ve Ib klinik çalışmaları, ilacın ileri evre solid ve hematolojik malignitelerde güvenli bir şekilde tolere edildiğini ve farmakodinamik düzeyde anlamlı biyolojik yanıtlar oluşturduğunu ortaya koymuştur. Özellikle prostat kanseri ve glioblastoma gibi tümörlerde hastalık stabilizasyonu ve tümör belirteçlerinde gözlemlenen azalma, tedavi açısından umut verici sonuçlar sunmaktadır. Klinik değerlendirmeleri halen devam eden CC-115'in, özellikle kombinasyon tedavileri ve biyobelirteç temelli hasta seçimi bağlamında potansiyel taşıdığı düşünülmekte ve bu doğrultuda klinik araştırmalar sürdürülmektedir (Munster ve ark. 2019; Zhao ve ark. 2024).

2.5.3. Gedatolisib

Gedatolisib (PF-05212384) deneysel bir mTOR inhibitörü ve aynı zamanda bazı nörolojik hastalıkların tedavisinde kullanılan bir bileşendir (Leiker ve ark. 2015). mTORC1 ve mTORC2 üzerinde etkili olmasının yanında ATR üzerinde de etkilidir (Brana ve ark. 2017). Gedatolisib, mTORC1'in hedef proteinleri olan p70S6K ve 4EBP1 fosforilasyon seviyelerinde belirgin bir azalmaya sebep olmaktadır (Kaur ve ark. 2022). mTOR üzerinde 1 nM'lik IC_{50} değeriyle dikkat çekmektedir (Mallon ve ark. 2011). Klinik öncesi modellerde yüksek antitümör aktivitesi sergilemiştir (Freitag ve ark. 2017). Gedatolisib, aynı zamanda PI3K/mTOR ikili inhibitörü olarak da sınıflandırılabilmektedir (Shapiro ve ark. 2015). Gedatolisib, endometriyal kanser (Del Campo ve ark.

2016), çeşitli ileri evre katı tümörler (Klinik deneme numarası: NCT02069158) ve akut miyeloid lösemi (Klinik deneme numarası: NCT02438761) gibi çeşitli malignitelerde erken faz klinik çalışmalarda araştırılmıştır. Güncel klinik araştırmalar ise ağırlıklı olarak HR+/HER2- ileri evre meme kanseri hastalarına yönelik olarak yürütülmekte olup, bu kapsamda ilaç faz 3 aşamasına ulaşmıştır (Klinik deneme numarası: NCT06757634).

2.5.4. AZD6738

AZD6738, ATR'yi inhibe ederek DNA onarım süreçlerini engeller; bu da kanser hücrelerinde DNA hasarının birikmesine ve hücre ölümüne yol açar (Jones ve ark. 2013; Foote ve ark. 2018). AZD6738, ATR kinazını hedefleyen seçici bir inhibitör olarak da kullanılmaktadır (Jones ve ark. 2013). AZD6738 genellikle, diğer kemoterapötik ajanlar, hedefe yönelik tedaviler ve immünoterapilerle kombinasyon halinde kullanılabilir (Lee ve ark. 2020). Kombinasyon tedavileri, kanser hücrelerinin tedaviye karşı geliştirdiği direnç mekanizmalarını aşmak için tercih edilir. AZD6738, ATR'nin hedefleri olan CHK1 ve p53 gibi proteinlerin fosforilasyon seviyelerini etkiler (Rundle ve ark. 2017). AZD6738 ile tedavi edilen hücrelerde, ATR hedeflerinin fosforilasyon seviyelerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir (Rundle ve ark. 2017).

2.5.5. SPK 98

SPK 98, ATP rekabetçi mTOR ve ATR ikili kinaz inhibitörü olarak tasarlanmış bir Torin 2 analoğudur (Bhakuni ve ark. 2020; Mao ve ark. 2022). Hem AKT hem de mTOR'u hedefleyerek hücre büyümesini inhibe eder (Mao ve ark. 2022). İnsan kolon kanseri hücre hattı HCT116'da, ATR ve mTOR kinazlarını seçici bir şekilde inhibe etmiştir. Bu inhibisyon, hücre döngüsünde G1/S fazında duraklamaya ve erken kromatin kondansasyonuna yol açmıştır (Bhakuni ve ark. 2020). Düşük konsantrasyonlarda hem *in vitro* hem de *in vivo* modellerde yüksek etkinlik gösteren SPK 98, geliştirilmiş farmakokinetik profili ve genetik seçiciliği sayesinde dirençli kanser türlerine karşı potansiyel bir hedef ajan olarak öne çıkmaktadır (Bhakuni ve ark. 2020). Klinik etkinliğini ve güvenliğini değerlendirmek için daha fazla klinik öncesi ve klinik araştırmaya ihtiyaç vardır.

2.6. AKT mTOR İklili İnhibitörleri

AKT, hücresel büyüme, metabolizma, hayatta kalma ve proliferasyon gibi temel süreçleri düzenleyen bir kinazdır. Aynı zamanda PI3K/AKT/mTOR sinyal yolunun merkezi bir bileşeni olarak, hücrelerin birçok dış ve iç uyarana karşı yanıtlarını koordine eder (Fayard ve ark. 2005). AKT, fosfatidilinozitol (3,4,5)-trifosfat (PIP3) aracılığıyla aktif hâle gelir. PIP3, AKT'nin plazma zarına translokasyonunu sağlar ve burada fosforilasyon yoluyla aktifleşmesini mümkün kılar (Whiteman ve ark. 2002). mTOR, hücresel büyüme, protein sentezi, metabolizma ve hücre döngüsü üzerinde düzenleyici bir rol oynayan bir serin/treonin kinazdır (Ali ve ark. 2022). AKT ve mTOR'un çift inhibisyonu, bu sinyal yollarının koordineli olarak baskılanması yoluyla terapötik etkinliğin artırılmasını hedefleyen bir stratejidir.

AKT, mTORC1'i doğrudan veya dolaylı olarak aktive edebilir (Glaviano ve ark. 2023). Ayrıca, mTORC1'in negatif düzenleyicileri olan tüberin ve hamartin gibi proteinleri fosforile ederek mTORC1'in aktivitesini modüle edebilir (Dan ve ark. 2002). Bu fosforilasyon, mTORC1'in aktivitesini artırarak hücresel büyüme ve protein sentezini teşvik eder. Diğer yandan, mTORC2, AKT'nin fosforilasyonunu doğrudan düzenler ve AKT'nin Ser473 pozisyonundaki fosforilasyonu, mTORC2 tarafından gerçekleştirilir; bu da AKT'nin aktivitesinin artmasına yol açar (Han ve ark. 2007). mTORC2'nin AKT ile etkileşimi, hücre iskeletinin düzenlenmesi, hücre hareketliliği ve metabolizmanın kontrolü gibi temel hücresel süreçleri etkiler (Bermudez ve ark. 2022). AKT ve mTOR sinyal yolları, birçok kanser türünde anormal şekilde aktive olabilir. Bu yolların birlikte inhibe edilmesi, kanser tedavisinde potansiyel bir terapötik strateji olarak araştırılmaktadır.

2.6.1. Palomid-529

Palomid-529 (P-529), bir AKT inhibitörüdür. AKT'yi spesifik olarak hedefleyerek bu kinazın etkilerini inhibe eder (Diaz ve ark. 2009). Bu inhibisyon, kanser hücrelerinin büyümesini ve hayatta kalmasını engelleyebilir, hücresel apoptozu teşvik edebilir ve kanser tedavisinde etkili olabilir. Palomid-529, özellikle AKT'nin aşırı aktif olduğu kanser türlerinde etkilidir (Xue ve ark. 2008). Bu kanserler arasında meme kanseri, akciğer kanseri, prostat kanseri gibi solid tümörler ve hematolojik maligniteler yer almaktadır (Diaz ve ark. 2009). Palomid-529, mTORC2/AKT ikili inhibitörü olarak, hem AKT hem de mTORC2 sinyalini sürekli olarak aşağı regüle eder ve *PTEN* mutant kanser türlerinde etkili bir inhibitör olarak kullanılmaktadır (Xue ve ark. 2008). Palomid-529'un mTORC1 üzerindeki IC_{50} değeri 25-50 nM aralığındayken, mTORC2 üzerindeki IC_{50} değeri 40-70 nM arasında değişmektedir. AKT üzerindeki IC_{50} değeri ise genellikle 15-35 nM aralığındadır (Sherris 2008; Gravina ve ark. 2014).

2.6.2. WYE-125132

WYE-125132, mTOR ve AKT sinyal yollarını hedefleyen deneysel bir inhibitördür. WYE-125132'nin mTORC1 üzerindeki IC_{50} değeri 15-30 nM aralığındadır. mTORC2 üzerindeki IC_{50} değeri ise 30-60 nM aralığındadır. WYE-125132'nin AKT üzerindeki IC_{50} değeri genellikle 20-40 nM aralığındadır WYE-125132, mTORC1 hedefi olan p70S6K ve 4EBP1 üzerindeki fosforilasyon seviyelerinde azalma sağlar (Yu ve ark. 2009). Preklinik çalışmalarda, WYE-125132'nin meme, glioma ve akciğer kanser modellerinde %45-60 oranında bir büyüme inhibisyonu sağladığı bildirilmiştir (Yu ve ark. 2010).

2.6.3. MK-2206

MK-2206, diğer bir AKT ve mTOR ikili inhibitörüdür (Chen ve ark. 2022). MK-2206, küçük moleküllü bir bileşendir ve özellikle AKT'nin tüm izoformlarını (AKT1, AKT2, AKT3) hedefleyen bir yapıdadır (Chilamakuri ve Agarwal 2022). MK-2206 ile tedavi edilen hücrelerde, AKT'nin fosforilasyonunu hedefleyen GSK-3β (Glikogen sentaz kinaz-3 beta) ve FOXO1 (Forkhead box O1)

üzerindeki fosforilasyon seviyelerinde önemli oranında bir azalma gözlemlenmiştir (An ve ark. 2020). MK-2206'nın mTORC1 üzerindeki dolaylı etkisi, mTORC1 hedefi olan p70S6K ve 4EBP1 üzerindeki fosforilasyon seviyelerinde yüksek oranında bir azalma olarak gözlemlenmiştir (Mi ve ark. 2015). Bu etkiler, AKT'nin mTORC1'le olan ilişkisini dolaylı olarak modüle ettiğini gösterir.

3. Sonuç ve Gelecek Perspektifler

PI3K/AKT/mTOR sinyal yolu, kanser hücrelerinin büyüme, proliferasyon, metabolizma ve hayatta kalma süreçlerinde merkezi bir rol oynamaktadır. Bu yolakta yer alan mTOR'un, özellikle mTORC1 ve mTORC2 kompleksleri aracılığıyla gerçekleştirdiği biyolojik işlevler, onu kanser tedavisinde önemli bir terapötik hedef haline getirmiştir. Bu doğrultuda geliştirilen allosterik mTOR inhibitörleri, PI3K/mTOR ikili inhibitörleri ve mTORC1/mTORC2'yi hedefleyen ajanlar, preklinik ve erken faz klinik çalışmalarda umut verici sonuçlar ortaya koymuştur.

Bununla birlikte, bu inhibitörlerin klinik uygulamalarda karşılaştığı temel sınırlılıklar arasında ilaç direnci, sınırlı biyoyararlanım ve toksisite yer almaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla, hem daha özgül hem de daha az toksik etkiye sahip yeni nesil inhibitörlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar sürdürülmektedir. Ayrıca, mTOR yolu ile ilişkili diğer moleküler hedeflerin (örneğin AKT, ATR) aynı anda inhibisyonunu sağlayan çok hedefli stratejiler, direnç mekanizmalarının üstesinden gelmede etkili bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Gelecekteki araştırmaların, PI3K/AKT/mTOR yolunun tüm yönleriyle daha iyi anlaşılmasına, özellikle ilaç direnci mekanizmalarının aydınlatılmasına ve kombinasyon tedavi stratejilerinin klinik etkinliğinin artırılmasına odaklanması büyük önem taşımaktadır. Moleküler düzeyde bireyselleştirilmiş tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesi, bu sinyal yolunu hedefleyen tedavi rejimlerinin başarısını artırabilir. Ayrıca, tümör organoidleri ve ileri düzey moleküler profilleme teknikleri, hasta spesifik tedavi stratejilerinin belirlenmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, PI3K/AKT/mTOR yolunun hedeflenmesi, kanser tedavisinde güçlü bir potansiyel sunmaktadır. Bu alanda sürdürülecek çok disiplinli ve kapsamlı çalışmalar, tedavi etkinliğini artırma ve hastaların yaşam kalitesini iyileştirme açısından kritik katkılar sağlayacaktır.

Teşekkür

Herhangi bir maddi destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Makalenin başlıca ve tek yazarı, yazım ile ilgili tüm süreçleri tek başına yürütmüştür. Katkı oranı tamdır.

Kaynakça

Al-Kali A., Aldoss I., Atherton PJ., Strand CA., Shah B., Webster J., Bhatnagar B., Flatten KS., Peterson KL., Schneider PA., Buhrow SA., Kong J., Reid JM., Adjei AA., Kaufmann SH. A phase 2 and pharmacological study of sapanisertib in patients with relapsed and/or refractory acute lymphoblastic leukemia. Cancer Med 2023; 12(23): 21229-21239.

Ali ES., Mitra K., Akter S., Ramproshad S., Mondal B., Khan IN., Islam MT., Sharifi-Rad J., Calina D., Cho WC. Recent advances and limitations of mTOR inhibitors in the treatment of cancer. Cancer Cell International 2022; 22(1): 284.

Alzahrani AS. PI3K/Akt/mTOR inhibitors in cancer: At the bench and bedside. Elsevier; 2019.

Amin AG., Jeong SW., Gillick JL., Sursal T., Murali R., Gandhi CD., Jhanwar-Uniyal M. Targeting the mTOR pathway using novel ATP-competitive inhibitors, Torin1, Torin2 and XL388, in the treatment of glioblastoma. International Journal of Oncology 2021; 59(4): 83.

An J., He H., Yao W., Shang Y., Jiang Y., Yu Z. PI3K/Akt/FoxO pathway mediates glycolytic metabolism in HepG2 cells exposed to triclosan (TCS). Environment International 2020; 136(105428.

Apsel B., Blair JA., Gonzalez B., Nazif TM., Feldman ME., Aizenstein B., Hoffman R., Williams RL., Shokat KM., Knight ZA. Targeted polypharmacology: discovery of dual inhibitors of tyrosine and phosphoinositide kinases. Nature Chemical Biology 2008; 4(11): 691.

Barnieh FM., Loadman PM., Falconer RA. Progress towards a clinically-successful ATR inhibitor for cancer therapy. Current research in pharmacology and drug discovery 2021; 2(100017.

Bartalucci N., Tozzi L., Bogani C., Martinelli S., Rotunno G., Villeval JL. ve Vannucchi AM. Co-targeting the PI3K/mTOR and JAK2 signalling pathways produces synergistic activity against myeloproliferative neoplasms. J Cell Mol Med 2013; 17(11): 1385-1396.

Baselga J., Semiglazov V., van Dam P., Manikhas A., Bellet M., Mayordomo J., Campone M., Kubista E., Greil R., Bianchi G. Phase II randomized study of neoadjuvant everolimus plus letrozole compared with placebo plus letrozole in patients with estrogen receptor–positive breast cancer. Journal of Clinical Oncology 2009; 27(16): 2630-2637.

Beaufils F., Cmiljanovic N., Cmiljanovic V., Bohnacker T., Melone A., Marone R., Jackson E., Zhang X., Sele A., Borsari C. 5-(4, 6-Dimorpholino-1, 3, 5-triazin-2-yl)-4-(trifluoromethyl) pyridin-2-amine (PQR309), a potent, brain-penetrant, orally bioavailable, pan-class I PI3K/mTOR inhibitor as clinical candidate in oncology. Journal of Medicinal Chemistry 2017; 60(17): 7524-7538.

Bendell JC., Kelley RK., Shih KC., Grabowsky JA., Bergsland E., Jones S., Martin T., Infante JR., Mischel PS., Matsutani T., Xu S., Wong L., Liu Y., Wu X., Mortensen DS., Chopra R., Hege K., Munster PN. A phase I dose-escalation study to assess safety, tolerability, pharmacokinetics, and preliminary efficacy of the dual mTORC1/mTORC2 kinase inhibitor

CC-223 in patients with advanced solid tumors or multiple myeloma. Cancer 2015; 121(19): 3481-3490.

Bermudez T., Sammani S., Song JH., Hernon VR., Kempf CL., Garcia AN., Burt J., Hufford M., Camp SM., Cress AE. eNAMPT neutralization reduces preclinical ARDS severity via rectified NFkB and Akt/mTORC2 signaling. Scientific Reports 2022; 12(1): 696.

Bhagwat SV., Gokhale PC., Crew AP., Cooke A., Yao Y., Mantis C., Kahler J., Workman J., Bittner M., Dudkin L. Preclinical characterization of OSI-027, a potent and selective inhibitor of mTORC1 and mTORC2: distinct from rapamycin. Molecular Cancer Therapeutics 2011; 10(8): 1394-1406.

Bhakuni R., Shaik A., Priya B. ve Kirubakaran S. Characterization of SPK 98, a Torin2 analog, as ATR and mTOR dual kinase inhibitor. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters 2020; 30(23): 127517.

Brana I., Pham N-A., Kim L., Sakashita S., Li M., Ng C., Wang Y., Loparco P., Sierra R., Wang L. Novel combinations of PI3K-mTOR inhibitors with dacomitinib or chemotherapy in PTEN-deficient patient-derived tumor xenografts. Oncotarget 2017; 8(49): 84659.

Brown EJ., Baltimore D. Essential and dispensable roles of ATR in cell cycle arrest and genome maintenance. Genes & Development 2003; 17(5): 615-628.

Bukowski RM. Temsirolimus: a safety and efficacy review. Expert Opinion on Drug Safety 2012; 11(5): 861-879.

Carroll WL., Aifantis I., Raetz E. Beating the clock in T-cell acute lymphoblastic leukemia. Clin Cancer Res 2017; 23(4): 873-875.

Chapuis N., Tamburini J., Green AS., Vignon C., Bardet V., Neyret A., Pannetier M., Willems L., Park S., Macone A. Dual inhibition of PI3K and mTORC1/2 signaling by NVP-BEZ235 as a new therapeutic strategy for acute myeloid leukemia. Clinical Cancer Research 2010; 16(22): 5424-5435.

Chen M., Yu Y., Mi T., Guo Q., Xiang B., Tian X., Jin L., Long C., Shen L., Liu X. MK-2206 alleviates renal fibrosis by suppressing the Akt/mTOR signaling pathway in vivo and in vitro. Cells 2022; 11(21): 3505.

Chen X., Zhang T., Ren X., Wei Y., Zhang X., Zang X., Ju X., Qin C., Xu D. CHKB-AS1 enhances proliferation and resistance to NVP-BEZ235 of renal cancer cells via regulating the phosphorylation of MAP4 and PI3K/AKT/mTOR signaling. European Journal of Medical Research 2023; 28(1): 588.

Chen Y., Zhou X. Research progress of mTOR inhibitors. European Journal of Medicinal Chemistry 2020; 208(112820.

Chiang GG., Abraham RT. Phosphorylation of mammalian target of rapamycin (mTOR) at Ser-2448 IsMediated by p70S6 kinase. Journal of Biological Chemistry 2005; 280(27): 25485-25490.

Chiarini F., Grimaldi C., Ricci F., Tazzari PL., Evangelisti C., Ognibene A., Battistelli M., Falcieri E., Melchionda F., Pession A. Activity of the novel dual phosphatidylinositol 3-kinase/mammalian target of rapamycin inhibitor NVP-BEZ235 against T-cell acute lymphoblastic leukemia. Cancer Research 2010; 70(20): 8097-8107.

Chilamakuri R., Agarwal S. Dual targeting of PI3K and HDAC by CUDC-907 inhibits pediatric neuroblastoma growth. Cancers 2022; 14(4): 1067.

Collins GP., Eyre TA., Schmitz-Rohmer D., Townsend W., Popat R., Giulino-Roth L., Fields PA., Krasniqi F., Soussain C., Stathis A. A phase II study to assess the safety and efficacy of the dual mTORC1/2 and PI3K inhibitor bimiralisib (PQR309) in relapsed, refractory lymphoma. Hemasphere 2021; 5(11): e656.

Crew AP., Bhagwat SV., Dong H., Bittner MA., Chan A., Chen X., Coate H., Cooke A., Gokhale PC., Honda A. Imidazo [1, 5-a] pyrazines: orally efficacious inhibitors of mTORC1 and mTORC2. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters 2011; 21(7): 2092-2097.

D'amato V., Rosa R., D'amato C., Formisano L., Marciano R., Nappi L., Raimondo L., Di Mauro C., Servetto A., Fusciello C. The dual PI3K/mTOR inhibitor PKI-587 enhances sensitivity to cetuximab in EGFR-resistant human head and neck cancer models. British Journal of Cancer 2014; 110(12): 2887-2895.

Dan HC., Sun M., Yang L., Feldman RI., Sui X-M., Ou CC., Nellist M., Yeung RS., Halley DJ., Nicosia SV. Phosphatidylinositol 3-kinase/Akt pathway regulates tuberous sclerosis tumor suppressor complex by phosphorylation of tuberin. Journal of Biological Chemistry 2002; 277(38): 35364-35370.

de Leuw P., Stephan C. Protease inhibitors for the treatment of hepatitis C virus infection. GMS Infect Dis 2017; 5(Doc08).

Del Campo JM., Birrer M., Davis C., Fujiwara K., Gollerkeri A., Gore M., Houk B., Lau S., Poveda A., Gonzalez-Martin A., Muller C., Muro K., Pierce K., Suzuki M., Vermette J. ve Oza A. A randomized phase II non-comparative study of PF-04691502 and gedatolisib (PF-05212384) in patients with recurrent endometrial cancer. Gynecol Oncol 2016; 142(1): 62-69.

Diaz R., Nguewa P., Diaz-Gonzalez J., Hamel E., Gonzalez-Moreno O., Catena R., Serrano D., Redrado M., Sherris D., Calvo A. The novel Akt inhibitor Palomid 529 (P529) enhances the effect of radiotherapy in prostate cancer. British Journal of Cancer 2009; 100(6): 932-940.

Dibble CC., Cantley LC. Regulation of mTORC1 by PI3K signaling. Trends in Cell Biology 2015; 25(9): 545-555.

Dobler C., Jost T., Hecht M., Fietkau R., Distel L. Senescence induction by combined ionizing radiation and DNA damage response inhibitors in head and neck squamous cell carcinoma cells. Cells 2020; 9(9): 2012.

Dolly SO., Wagner AJ., Bendell JC., Kindler HL., Krug LM., Seiwert TY., Zauderer MG., Lolkema MP., Apt D., Yeh R-F. Phase I study of apitolisib (GDC-0980), dual phosphatidylinositol-3-

kinase and mammalian target of rapamycin kinase inhibitor, in patients with advanced solid tumors. Clinical Cancer Research 2016; 22(12): 2874-2884.

Dominguez JF., Rosberger H., Garell P., Gandhi CD., Jhanwar-Uniyal M. First, second, and third generation mTOR pathways inhibitors for treatment of glioblastoma. Cancer Research 2022; 82(12_Supplement): 5410-5410.

Ducker GS., Atreya CE., Simko JP., Hom YK., Matli MR., Benes CH., Hann B., Nakakura EK., Bergsland EK., Donner DB. Incomplete inhibition of phosphorylation of 4E-BP1 as a mechanism of primary resistance to ATP-competitive mTOR inhibitors. Oncogene 2014; 33(12): 1590-1600.

Efeyan A., Sabatini DM. mTOR and cancer: many loops in one pathway. Current Opinion in Cell Biology 2010; 22(2): 169-176.

Faivre S., Kroemer G., Raymond E. Current development of mTOR inhibitors as anticancer agents. Nature reviews Drug Discovery 2006; 5(8): 671-688.

Faulhaber EM., Jost T., Symank J., Scheper J., Bürkel F., Fietkau R., Hecht M., Distel LV. Kinase inhibitors of DNA-PK, ATM and ATR in combination with ionizing radiation can increase tumor cell death in HNSCC cells while sparing normal tissue cells. Genes 2021; 12(6): 925.

Fayard E., Tintignac LA., Baudry A., Hemmings BA. Protein kinase B/Akt at a glance. Journal of Cell Science 2005; 118(24): 5675-5678.

Feng Y., Jiang Y., Hao F. GSK2126458 has the potential to inhibit the proliferation of pancreatic cancer uncovered by bioinformatics analysis and pharmacological experiments. Journal of Translational Medicine 2021; 19: 1-17.

Fokas E., Prevo R., Hammond EM., Brunner TB., McKenna WG. ve Muschel RJ. Targeting ATR in DNA damage response and cancer therapeutics. Cancer treatment reviews 2014; 40(1): 109-117.

Foote KM., Nissink JWM., McGuire T., Turner P., Guichard S., Yates JW., Lau A., Blades K., Heathcote D., Odedra R. Discovery and characterization of AZD6738, a potent inhibitor of ataxia telangiectasia mutated and Rad3 related (ATR) kinase with application as an anticancer agent. Journal of Medicinal Chemistry 2018; 61: 9889-9907.

Freitag H., Christen F., Lewens F., Grass I., Briest F., Iwaszkiewicz S., Siegmund B., Grabowski P. Inhibition of mTOR's catalytic site by PKI-587 is a promising therapeutic option for gastroenteropancreatic neuroendocrine tumor disease. Neuroendocrinology 2017; 105(1): 90-104.

García-Martínez JM., Moran J., Clarke RG., Gray A., Cosulich SC., Chresta CM., Alessi DR. Ku-0063794 is a specific inhibitor of the mammalian target of rapamycin (mTOR). Biochemical Journal 2009; 421(1): 29-42.

Gazi M., Moharram SA., Marhäll A., Kazi JU. The dual specificity PI3K/mTOR inhibitor PKI-587 displays efficacy against T-cell acute lymphoblastic leukemia (T-ALL). Cancer Lett 2017; 392: 9-16.

Gkountakos A., Pilotto S., Mafficini A., Vicentini C., Simbolo M., Milella M., Tortora G., Scarpa A., Bria E., Corbo V. Unmasking the impact of Rictor in cancer: novel insights of mTORC2 complex. Carcinogenesis 2018; 39(8): 971-980.

Glaviano A., Foo AS., Lam HY., Yap KC., Jacot W., Jones RH., Eng H., Nair MG., Makvandi P., Geoerger B. PI3K/AKT/mTOR signaling transduction pathway and targeted therapies in cancer. Molecular cancer 2023; 22(1): 138.

Gravina GL., Marampon F., Sherris D., Vittorini F., Cesare ED., Tombolini V., Lenzi A., Jannini EA., Festuccia C. Torc1/Torc2 inhibitor, Palomid 529, enhances radiation response modulating CRM1-mediated survivin function and delaying DNA repair in prostate cancer models. The Prostate 2014; 74(8): 852-868.

Grewe M., Gansauge F., Schmid RM., Adler G., Seufferlein T. Regulation of cell growth and cyclin D1 expression by the constitutively active FRAP-p70s6K pathway in human pancreatic cancer cells. Cancer Res 1999; 59(15): 3581-3587.

Guertin DA., Sabatini DM. Defining the role of mTOR in cancer. Cancer Cell 2007; 12(1): 9-22.

Guertin DA., Stevens DM., Thoreen CC., Burds AA., Kalaany NY., Moffat J., Brown M., Fitzgerald KJ., Sabatini DM. Ablation in mice of the mTORC components raptor, rictor, or mLST8 reveals that mTORC2 is required for signaling to Akt-FOXO and PKCalpha, but not S6K1. Dev Cell 2006; 11(6): 859-871.

Guo Q., Yu C., Zhang C., Li Y., Wang T., Huang Z., Wang X., Zhou W., Li Y., Qin Z. Highly selective, potent, and oral mTOR inhibitor for treatment of cancer as autophagy inducer. Journal of Medicinal Chemistry 2018; 61(3): 881-904.

Hadley G., Beard DJ., Alexopoulou Z., Sutherland BA., Buchan AM. Investigation of the novel mTOR inhibitor AZD2014 in neuronal ischemia. Neuroscience Letters 2019; 706: 223-230.

Han EK., Leverson J., McGonigal T., Shah O., Woods K., Hunter T., Giranda V. ve Luo Y. Akt inhibitor A-443654 induces rapid Akt Ser-473 phosphorylation independent of mTORC1 inhibition. Oncogene 2007; 26(38): 5655-5661.

Han SN., Oza A., Colombo N., Oaknin A., Raspagliesi F., Wenham RM., Braicu EI., Jewell A., Makker V., Krell J., Alia EMG., Baurain JF., Su Z., Neuwirth R., Vincent S., Sedarati F., Faller DV., Scambia G. A randomized phase 2 study of sapanisertib in combination with paclitaxel versus paclitaxel alone in women with advanced, recurrent, or persistent endometrial cancer. Gynecol Oncol 2023; 178: 110-118.

Hayman TJ., Wahba A., Rath BH., Bae H., Kramp T., Shankavaram UT., Camphausen K., Tofilon PJ. The ATP-competitive mTOR inhibitor INK128 enhances in vitro and in vivo radiosensitivity of pancreatic carcinoma cells. Clinical Cancer Research 2014; 20(1): 110-119.

Hong Z., Pedersen NM., Wang L., Torgersen ML., Stenmark H., Raiborg C. PtdIns3P controls mTORC1 signaling through lysosomal positioning. Journal of Cell Biology 2017; 216(12): 4217-4233.

Hoshii T., Matsuda S., Hirao A. Pleiotropic roles of mTOR complexes in haemato-lymphopoiesis and leukemogenesis. J Biochem 2014; 156(2): 73-83.

Hoxhaj G., Manning BD. The PI3K–AKT network at the interface of oncogenic signalling and cancer metabolism. Nature Reviews Cancer 2020; 20(2): 74-88.

Huang S., Yang ZJ., Yu C., Sinicrope FA. Inhibition of mTOR kinase by AZD8055 can antagonize chemotherapy-induced cell death through autophagy induction and down-regulation of p62/sequestosome 1. Journal of Biological Chemistry 2011; 286(46): 40002-40012.

Hudes G., Carducci M., Tomczak P., Dutcher J., Figlin R., Kapoor A., Staroslawska E., Sosman J., McDermott D., Bodrogi I. Temsirolimus, interferon alfa, or both for advanced renal-cell carcinoma. New England Journal of Medicine 2007; 356(22): 2271-2281.

Janes MR., Vu C., Mallya S., Shieh M., Limon JJ., Li L-S., Jessen KA., Martin MB., Ren P., Lilly MB. Efficacy of the investigational mTOR kinase inhibitor MLN0128/INK128 in models of B-cell acute lymphoblastic leukemia. Leukemia 2013; 27(3): 586-594.

Janku F. Phosphoinositide 3-kinase (PI3K) pathway inhibitors in solid tumors: From laboratory to patients. Cancer Treatment Reviews 2017; 59: 93-101.

Janku F., Wheler JJ., Naing A., Falchook GS., Hong DS., Stepanek VM., Fu S., Piha-Paul SA., Lee JJ., Luthra R. PIK3CA mutation H1047R is associated with response to PI3K/AKT/mTOR signaling pathway inhibitors in early-phase clinical trials. Cancer Research 2013; 73(1): 276-284.

Jeon YW., Kim OH., Shin JS., Hong HE., Kim CH., Kim SJ. Potentiation of the anticancer effects by combining docetaxel with Ku-0063794 against triple-negative breast cancer cells. Cancer Research and Treatment: Official Journal of Korean Cancer Association 2022; 54(1): 157-173.

Jiang SJ., Wang S. Dual targeting of mTORC1 and mTORC2 by INK-128 potently inhibits human prostate cancer cell growth in vitro and in vivo. Tumor Biology 2015; 36: 8177-8184.

Jones CD., Blades K., Foote KM., Guichard SM., Jewsbury PJ., McGuire T., Nissink JW., Odedra R., Tam K., Thommes P. Discovery of AZD6738, a potent and selective inhibitor with the potential to test the clinical efficacy of ATR kinase inhibition in cancer patients. Cancer Research 2013; 73(8Supplement): 2348.

Kaur K., Anant A., Asati V. Structural aspects of mTOR inhibitors: search for potential compounds. Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents) 2022; 22(6): 1037-1055.

Knight SD., Adams ND., Burgess JL., Chaudhari AM., Darcy MG., Donatelli CA., Luengo JI., Newlander KA., Parrish CA., Ridgers LH. Discovery of GSK2126458, a highly potent

inhibitor of PI3K and the mammalian target of rapamycin. ACS Medicinal Chemistry Letters 2010; 1(1): 39-43.

Kuroshima K., Yoshino H., Okamura S., Tsuruda M., Osako Y., Sakaguchi T., Sugita S., Tatarano S., Nakagawa M., Enokida H. Potential new therapy of Rapalink-1, a new generation mammalian target of rapamycin inhibitor, against sunitinib-resistant renal cell carcinoma. Cancer Science 2020; 111(5): 1607-1618.

Laplante M., Sabatini DM. mTOR signaling in growth control and disease. Cell 2012; 149(2): 274-293.

Lee J., Tae Kim S., Smith S., Mortimer PG., Loembé B., Hong J., Kozarewa I., Pierce A., Dean E. Results from a phase I, open-label study of ceralasertib (AZD6738), a novel DNA damage repair agent, in combination with weekly paclitaxel in refractory cancer (NCT02630199). Journal of Clinical Oncology 2020; 38(15).

Leiker AJ., DeGraff W., Choudhuri R., Sowers AL., Thetford A., Cook JA., Van Waes C., Mitchell JB.Radiation enhancement of head and neck squamous cell carcinoma by the dual PI3K/mTOR inhibitor PF-05212384. Clinical Cancer Research 2015; 21(12): 2792-2801.

Leung E., Kim JE., Rewcastle GW., Finlay GJ., Baguley BC. Comparison of the effects of the PI3K/mTOR inhibitors NVP-BEZ235 and GSK2126458 on tamoxifen-resistant breast cancer cells. Cancer Biology & Therapy 2011; 11(11): 938-946.

Liu GY., Sabatini DM. mTOR at the nexus of nutrition, growth, ageing and disease. Nature reviews Molecular Cell Biology 2020; 21(4): 183-203.

Liu Q., Thoreen C., Wang J., Sabatini D., Gray NS. mTOR mediated anti-cancer drug discovery. Drug Discovery Today: Therapeutic Strategies 2009; 6(2): 47-55.

Liu Q., Xu C., Kirubakaran S., Zhang X., Hur W., Liu Y., Kwiatkowski NP., Wang J., Westover KD., Gao P. Characterization of Torin2, an ATP-competitive inhibitor of mTOR, ATM, and ATR. Cancer Research 2013; 73(8): 2574-2586.

Liu S., Shiotani B., Lahiri M., Maréchal A., Tse A., Leung CCY., Glover JM., Yang XH., Zou L. ATR autophosphorylation as a molecular switch for checkpoint activation. Molecular Cell 2011; 43(2): 192-202.

LoPiccolo J., Blumenthal GM., Bernstein WB., Dennis PA. Targeting the PI3K/Akt/mTOR pathway: effective combinations and clinical considerations. Drug Resistance Updates 2008; 11(1-2): 32-50.

Lu Z., Shi X., Gong F., Li S., Wang Y., Ren Y., Zhang M., Yu B., Li Y., Zhao W. RICTOR/mTORC2 affects tumorigenesis and therapeutic efficacy of mTOR inhibitors in esophageal squamous cell carcinoma. Acta Pharmaceutica Sinica B 2020; 10(6): 1004-1019.

Ma X., Zhang S., He L., Rong Y., Brier LW., Sun Q., Liu R., Fan W., Chen S., Yue Z. MTORC1-mediated NRBF2 phosphorylation functions as a switch for the class III PtdIns3K and autophagy. Autophagy 2017; 13(3): 592-607.

Ma XM., Blenis J. Molecular mechanisms of mTOR-mediated translational control. Nat Rev Mol Cell Biol 2009; 10(5): 307-318.

Magaway C., Kim E., Jacinto E. Targeting mTOR and metabolism in cancer: lessons and innovations. Cells 2019; 8(12): 1584.

Malagu K., Duggan H., Menear K., Hummersone M., Gomez S., Bailey C., Edwards P., Drzewiecki J., Leroux F., Quesada MJ. The discovery and optimisation of pyrido [2, 3-d] pyrimidine-2, 4-diamines as potent and selective inhibitors of mTOR kinase. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters 2009; 19(20): 5950-5953.

Mallon R., Feldberg LR., Lucas J., Chaudhary I., Dehnhardt C., Santos ED., Chen Z., dos Santos O., Ayral-Kaloustian S., Venkatesan A. Antitumor efficacy of PKI-587, a highly potent dual PI3K/mTOR kinase inhibitor. Clinical Cancer Research 2011; 17(10): 3193-3203.

Manning BD., Toker A. AKT/PKB signaling: Navigating the Network. Cell 2017; 169(3): 381-405.

Mao B., Zhang Q., Ma L., Zhao D-S., Zhao P., Yan P. Overview of research into mTOR inhibitors. Molecules 2022; 27(16): 5295.

Mao X., Lee NK., Saad SE., Fong IL. Clinical translation for targeting DNA damage repair in non-small cell lung cancer: a review. Translational Lung Cancer Research 2024; 13(2): 375.

Mi W., Ye Q., Liu S., She QB. AKT inhibition overcomes rapamycin resistance by enhancing the repressive function of PRAS40 on mTORC1/4E-BP1 axis. Oncotarget 2015; 6(16): 13962.

Miller TW., Balko JM., Arteaga CL. Phosphatidylinositol 3-kinase and antiestrogen resistance in breast cancer. Journal of Clinical Oncology 2011; 29(33): 4452-4461.

Moore SF., Hunter RW., Hers I. mTORC2 protein complex-mediated Akt (Protein Kinase B) Serine 473 Phosphorylation is not required for Akt1 activity in human platelets [corrected]. J Biol Chem 2011; 286(28): 24553-24560.

Mousa OY., Keaveny AP. Everolimus: Longer-Term CERTITUDE. 2019; 25: 1745-1746.

Munster P., Aggarwal R., Hong D., Schellens JH., Van Der Noll R., Specht J., Witteveen PO., Werner TL., Dees EC., Bergsland E. First-in-human phase I study of GSK2126458, an oral pan-class I phosphatidylinositol-3-kinase inhibitor, in patients with advanced solid tumor malignancies. Clinical Cancer Research 2016; 22(8): 1932-1939.

Munster P., Mita M., Mahipal A., Nemunaitis J., Massard C., Mikkelsen T., Cruz C., Paz-Ares L., Hidalgo M., Rathkopf D. First-in-human phase I study of a dual mTOR kinase and DNA-PK inhibitor (CC-115) in advanced malignancy. Cancer Management and Research 2019; 10463-10476.

Nam EA., Cortez D. ATR signalling: more than meeting at the fork. Biochemical Journal 2011; 436(3): 527-536.

Narov K., Yang J., Samsel P., Jones A., Sampson JR., Shen MH. The dual PI3K/mTOR inhibitor GSK2126458 is effective for treating solid renal tumours in Tsc2+/-mice through suppression of cell proliferation and induction of apoptosis. Oncotarget 2017; 8(35): 58504.

Omeljaniuk WJ., Krętowski R., Ratajczak-Wrona W., Jabłońska E., Cechowska-Pasko M. Novel dual PI3K/mTOR inhibitor, apitolisib (GDC-0980), inhibits growth and induces apoptosis in human glioblastoma cells. International Journal of Molecular Sciences 2021; 22(21): 11511.

Pike KG., Malagu K., Hummersone MG., Menear KA., Duggan HM., Gomez S., Martin NM., Ruston L., Pass SL., Pass M. Optimization of potent and selective dual mTORC1 and mTORC2 inhibitors: the discovery of AZD8055 and AZD2014. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters 2013; 23(5): 1212-1216.

Popova NV., Jücker M. The role of mTOR signaling as a therapeutic target in cancer. International Journal of Molecular Sciences 2021; 22(4): 1743.

Ragupathi A., Kim C., Jacinto E. The mTORC2 signaling network: targets and cross-talks. Biochem J 2024; 481(2): 45-91.

Rodrik-Outmezguine VS., Okaniwa M., Yao Z., Novotny CJ., McWhirter C., Banaji A., Won H., Wong W., Berger M., de Stanchina E. Overcoming mTOR resistance mutations with a new-generation mTOR inhibitor. Nature 2016; 534(7606): 272-276.

Rundle S., Bradbury A., Drew Y., Curtin NJ. Targeting the ATR-CHK1 axis in cancer therapy. Cancers 2017; 9(5): 41.

Sabatini DM. mTOR and cancer: insights into a complex relationship. Nat Rev Cancer 2006; 6(9): 729-734.

Sanchez VE., Nichols C., Kim HN., Gang EJ., Kim YM. Targeting PI3K signaling in acute lymphoblastic leukemia. Int J Mol Sci 2019; 20(2).

Sarbassov DD., Ali SM., Sengupta S., Sheen JH., Hsu PP., Bagley AF., Markhard AL., Sabatini DM. Prolonged rapamycin treatment inhibits mTORC2 assembly and Akt/PKB. Mol Cell 2006; 22(2): 159-168.

Sarbassov DD., Guertin DA., Ali SM., Sabatini DM. Phosphorylation and regulation of Akt/PKB by the rictor-mTOR complex. Science 2005; 307(5712): 1098-1101.

Satta T., Li L., Chalasani SL., Hu X., Nkwocha J., Sharma K., Kmieciak M., Rahmani M., Zhou L., Grant S. Dual mTORC1/2 inhibition synergistically enhances AML cell death in combination with the BCL2 antagonist venetoclax. Clinical Cancer Research 2023; 29(7): 1332-1343.

Saxton RA., Sabatini DM. mTOR signaling in growth, metabolism, and disease. Cell 2017; 168(6): 960-976.

Schalm SS., Blenis J. Identification of a conserved motif required for mTOR signaling. Curr Biol 2002; 12(8): 632-639.

Schulze M., Stock C., Zaccagnini M., Teber D., Rassweiler JJ. Temsirolimus. Small Molecules in Oncology 2014; 393-403.

Selvarajah J., Carroll VA. Characterisation of a new mechanism of ATR/Chk1 regulation in breast cancer: role of mTORC2. Breast Cancer Research And Treatment 2016; 159(1): 185-185.

Serra V., Markman B., Scaltriti M., Eichhorn PJ., Valero V., Guzman M., Botero ML., Llonch E., Atzori F., Di Cosimo S. NVP-BEZ235, a dual PI3K/mTOR inhibitor, prevents PI3K signaling and inhibits the growth of cancer cells with activating PI3K mutations. Cancer Research 2008; 68(19): 8022-8030.

Shaik A., Bhakuni R., Kirubakaran S. Design, synthesis, and docking studies of new Torin2 analogs as potential ATR/mTOR kinase inhibitors. Molecules 2018; 23(5): 992.

Shan KS., Bonano-Rios A., Theik NWY., Hussein A., Blaya M. Molecular targeting of the phosphoinositide-3-protein kinase (PI3K) pathway across various cancers. International Journal of Molecular Sciences 2024; 25(4): 1973.

Shapiro GI., Bell-McGuinn KM., Molina JR., Bendell J., Spicer J., Kwak EL., Pandya SS., Millham R., Borzillo G., Pierce KJ. First-in-human study of PF-05212384 (PKI-587), a small-molecule, intravenous, dual inhibitor of PI3K and mTOR in patients with advanced cancer. Clinical Cancer Research 2015; 21(8): 1888-1895.

Sherris D. Palomid 529, a Dual Acting anti-angiogenic and direct anti-tumor agent affecting the PI3K/Akt/mTor pathway. Cancer Research 2008; 68(9Supplement): 359.

Simioni C., Martelli AM., Zauli G., Melloni E., Neri LM. Targeting mTOR in acute lymphoblastic leukemia. Cells 2019; 8(2): 190.

Song MS., Salmena L., Pandolfi PP. The functions and regulation of the PTEN tumour suppressor. Nature reviews Molecular Cell Biology 2012; 13(5): 283-296.

Spreafico A., Mackay HJ. Current phase II clinical data for ridaforolimus in cancer. Expert Opinion on Investigational Drugs 2013; 22(11): 1485-1493.

Steelman LS., Martelli AM., Cocco L., Libra M., Nicoletti F., Abrams SL., McCubrey JA. The therapeutic potential of mTOR inhibitors in breast cancer. Br J Clin Pharmacol 2016; 82(5): 1189-1212.

Sun Y., Tan L., Yao Z., Gao L., Yang J., Zeng T. In vitro and in vivo interactions of TOR inhibitor AZD8055 and azoles against pathogenic fungi. Microbiology Spectrum 2022; 10(1): e02007-02021.

Sutherlin DP., Bao L., Berry M., Castanedo G., Chuckowree I., Dotson J., Folks A., Friedman L., Goldsmith R., Gunzner J. Discovery of a potent, selective, and orally available class I phosphatidylinositol 3-kinase (PI3K)/mammalian target of rapamycin (mTOR) kinase inhibitor (GDC-0980) for the treatment of cancer. Journal of Medicinal Chemistry 2011; 54(21): 7579-7587.

Syed F., Sanganee HJ., Bahl A., Bayat A. Potent dual inhibitors of TORC1 and TORC2 complexes (KU-0063794 and KU-0068650) demonstrate in vitro and ex vivo anti-keloid scar activity. Journal of Investigative Dermatology 2013; 133(5): 1340-1350.

Takeuchi CS., Kim BG., Blazey CM., Ma S., Johnson HW., Anand NK., Arcalas A., Baik TG., Buhr CA., Cannoy J. Discovery of a novel class of highly potent, selective, ATP-competitive, and

orally bioavailable inhibitors of the mammalian target of rapamycin (mTOR). Journal of Medicinal Chemistry 2013; 56(6): 2218-2234.

Tangudu NK., Huang Z., Fang R., Buj R., Uboveja A., Cole AR., Happe C., Sun M., Gelhaus SL., MacDonald ML. ATR promotes mTORC1 activation via de novo cholesterol synthesis in p16-low cancer cells. bioRxiv 2023;

Tarantelli C., Gaudio E., Arribas AJ., Kwee I., Hillmann P., Rinaldi A., Cascione L., Spriano F., Bernasconi E., Guidetti F. PQR309 is a novel dual PI3K/mTOR inhibitor with preclinical antitumor activity in lymphomas as a single agent and in combination therapy. Clinical Cancer Research 2018; 24(1): 120-129.

Tarantelli C., Gaudio E., Kwee I., Rinaldi A., Stifanelli M., Bernasconi E., Barassi C., Hillmann P., Stathis A., Carrassa L. The novel PI3K/mTOR dual inhibitor PQR309 in pre-clinical lymphoma models: Demonstration of anti-tumor activity as single agent and in combination and identification of gene expression signatures associated with response. Blood 2014; 124(21): 1782.

Teachey DT., Obzut DA., Cooperman J., Fang J., Carroll M., Choi JK., Houghton PJ., Brown VI., Grupp SA. The mTOR inhibitor CCI-779 induces apoptosis and inhibits growth in preclinical models of primary adult human ALL. Blood 2006; 107(3): 1149-1155.

Thomson AW., Woo J. Immunosuppressive properties of FK-506 and rapamycin. Lancet 1989; 2(8660): 443-444.

Thoreen CC., Kang SA., Chang JW., Liu Q., Zhang J., Gao Y., Reichling LJ., Sim T., Sabatini DM., Gray NS. An ATP-competitive mammalian target of rapamycin inhibitor reveals rapamycin-resistant functions of mTORC1. Journal of Biological Chemistry 2009; 284(12): 8023-8032.

Tsuji T., Sapinoso LM., Tran T., Gaffney B., Wong L., Sankar S., Raymon HK., Mortensen DS., Xu S. CC-115, a dual inhibitor of mTOR kinase and DNA-PK, blocks DNA damage repair pathways and selectively inhibits ATM-deficient cell growth in vitro. Oncotarget 2017; 8(43): 74688.

Udayakumar D., Pandita RK., Horikoshi N., Liu Y., Liu Q., Wong K-K., Hunt CR., Gray NS., Minna JD., Pandita TK. Torin2 suppresses ionizing radiation-induced DNA damage repair. Radiation Research 2016; 185(5): 527-538.

Unni N., Arteaga CL. Is dual mTORC1 and mTORC2 therapeutic blockade clinically feasible in cancer? JAMA Oncology 2019; 5(11): 1564-1565.

Vaughan LS., Barker K., Webber H., Jamin Y., Robinson S., Guichard S., Chesler L. AZD8055, a combined TORC1/TORC2 inhibitor regulates Mycn protein expression and prevents neuroblastoma growth in vitro and in vivo. Cancer Research 2011; 71(8_Supplement): 4345-4345.

Vezina C., Kudelski A., Sehgal SN. Rapamycin (AY-22,989), a new antifungal antibiotic. I. Taxonomy of the producing streptomycete and isolation of the active principle. J Antibiot (Tokyo) 1975; 28(10): 721-726.

Vogel KR., Ainslie GR., Jansen EE., Salomons GS., Gibson KM. Torin 1 partially corrects vigabatrin-induced mitochondrial increase in mouse. Annals of Clinical And Translational Neurology 2015; 2(6): 699-706.

Wallin JJ., Edgar KA., Guan J., Berry M., Prior WW., Lee L., Lesnick JD., Lewis C., Nonomiya J., Pang J. GDC-0980 is a novel class I PI3K/mTOR kinase inhibitor with robust activity in cancer models driven by the PI3K pathway. Molecular Cancer Therapeutics 2011; 10(12): 2426-2436.

Wang L., Qiu Q., Yang D., Cao C., Lu Y., Zeng Y., Jiang W., Shen Y., Ye Y. Clinical research progress of ridaforolimus (AP23573, MK8668) over the past decade: a systemic review. Frontiers in Pharmacology 2024; 15(1173240.

Wang X., Chu Y., Wang W., Yuan W. mTORC signaling in hematopoiesis. Int J Hematol 2016; 103(5): 510-518.

Whiteman EL., Cho H., Birnbaum MJ. Role of Akt/protein kinase B in metabolism. Trends in Endocrinology & Metabolism 2002; 13(10): 444-451.

Willems L., Chapuis N., Puissant A., Maciel T., Green A., Jacque N., Vignon C., Park S., Guichard S., Herault O. The dual mTORC1 and mTORC2 inhibitor AZD8055 has anti-tumor activity in acute myeloid leukemia. Leukemia 2012; 26(6): 1195-1202.

Wu X., Xu Y., Liang Q., Yang X., Huang J., Wang J., Zhang H., Shi J. Recent advances in dual PI3K/mTOR inhibitors for tumour treatment. Frontiers in Pharmacology 2022; 13(875372.

Xie Y., Liu C., Zhang Y., Li A., Sun C., Li R., Xing Y., Shi M., Wang Q. PKI-587 enhances radiosensitization of hepatocellular carcinoma by inhibiting the PI3K/AKT/mTOR pathways and DNA damage repair. PloS one 2021; 16(10): e0258817.

Xing X., Zhang L., Wen X., Wang X., Cheng X., Du H., Hu Y., Li L., Dong B., Li Z. PP242 suppresses cell proliferation, metastasis, and angiogenesis of gastric cancer through inhibition of the PI3K/AKT/mTOR pathway. Anti-Cancer Drugs 2014; 25(10): 1129-1140.

Xu E., Zhu H., Wang F., Miao J., Du S., Zheng C., Wang X., Li Z., Xu F., Xia X. OSI-027 alleviates oxaliplatin chemoresistance in gastric cancer cells by suppressing P-gp induction. Current Molecular Medicine 2021; 21(10): 922-930.

Xu F., Na L., Li Y., Chen L. Retracted Article: Roles of the PI3K/AKT/mTOR signalling pathways in neurodegenerative diseases and tumours. Cell & Bioscience 2020; 10(1): 54.

Xu H., Jiao Y., Qin S., Zhao W., Chu Q., Wu K. Organoid technology in disease modelling, drug development, personalized treatment and regeneration medicine. Experimental Hematology & Oncology 2018; 7: 1-12.

Xu H., Lyu X., Yi M., Zhao W., Song Y., Wu K. Organoid technology and applications in cancer research. Journal of Hematology & Oncology 2018; 11: 1-15.

Xue Q., Hopkins B., Perruzzi C., Udayakumar D., Sherris D., Benjamin LE. Palomid 529, a novel small-molecule drug, is a TORC1/TORC2 inhibitor that reduces tumor growth, tumor angiogenesis, and vascular permeability. Cancer Research 2008; 68(22): 9551-9557.

Yang J., Nie J., Ma X., Wei Y., Peng Y., Wei X. Targeting PI3K in cancer: mechanisms and advances in clinical trials. Molecular Cancer 2019; 18(1): 26.

Yang K., Tang XJ., Xu FF., Liu JH., Tan YQ., Gao L., Sun Q., Ding X., Liu BH., Chen QX. PI3K/mTORC1/2 inhibitor PQR309 inhibits proliferation and induces apoptosis in human glioblastoma cells. Oncology Reports 2020; 43(3): 773-782.

Yongxi T., Haijun H., Jiaping Z., Guoliang S., Hongying P. Autophagy inhibition sensitizes KU-0063794-mediated anti-HepG2 hepatocellular carcinoma cell activity in vitro and in vivo. Biochemical and biophysical Research Communications 2015; 465(3): 494-500.

Yu K., Shi C., Toral-Barza L., Lucas J., Shor B., Kim JE., Zhang WG., Mahoney R., Gaydos C., Tardio L., Kim SK., Conant R., Curran K., Kaplan J., Verheijen J., Ayral-Kaloustian S., Mansour TS., Abraham RT., Zask A., Gibbons JJ. Beyond rapalog therapy: preclinical pharmacology and antitumor activity of WYE-125132, an ATP-competitive and specific inhibitor of mTORC1 and mTORC2. Cancer Res 2010; 70(2): 621-631.

Yu K., Toral-Barza L., Shi C., Zhang WG., Lucas J., Shor B., Kim J., Verheijen J., Curran K., Malwitz DJ., Cole DC., Ellingboe J., Ayral-Kaloustian S., Mansour TS., Gibbons JJ., Abraham RT., Nowak P., Zask A. Biochemical, cellular, and in vivo activity of novel ATP-competitive and selective inhibitors of the mammalian target of rapamycin. Cancer Res 2009; 69(15): 6232-6240.

Zeng Z., Shi YX., Tsao T., Qiu Y., Kornblau SM., Baggerly KA., Liu W., Jessen K., Liu Y., Kantarjian H. Targeting of mTORC1/2 by the mTOR kinase inhibitor PP242 induces apoptosis in AML cells under conditions mimicking the bone marrow microenvironment. Blood, The Journal of the American Society of Hematology 2012; 120(13): 2679-2689.

Zhang Y., Ng PKS., Kucherlapati M., Chen F., Liu Y., Tsang YH., de Velasco G., Jeong KJ., Akbani R., Hadjipanayis A. A pan-cancer proteogenomic atlas of PI3K/AKT/mTOR pathway alterations. Cancer Cell 2017; 31(6): 820-832. e823.

Zhao D., Jiang M., Zhang X., Hou H. The role of RICTOR amplification in targeted therapy and drug resistance. Molecular Medicine 2020; 26: 1-11.

Zhao JL., Antonarakis ES., Cheng HH., George DJ., Aggarwal R., Riedel E., Sumiyoshi T., Schonhoft JD., Anderson A., Mao N., Haywood S., Decker B., Curley T., Abida W., Feng FY., Knudsen K., Carver B., Lacouture ME., Wyatt AW., Rathkopf D. Phase 1b study of enzalutamide plus CC-115, a dual mTORC1/2 and DNA-PK inhibitor, in men with metastatic castration-resistant prostate cancer (mCRPC). Br J Cancer 2024; 130(1): 53-62.

Zhong S., Xue J., Cao JJ., Sun B., Sun QF., Bian LG., Hu LY., Pan SJ. The therapeutic value of XL388 in human glioma cells. Aging (Albany NY) 2020; 12(22): 22550.

Zhu YR., Zhou XZ., Zhu LQ., Yao C., Fang JF., Zhou F., Deng XW., Zhang YQ. The anti-cancer activity of the mTORC1/2 dual inhibitor XL388 in preclinical osteosarcoma models. Oncotarget 2016; 7(31): 49527.

Zou Z., Tao T., Li H., Zhu X. mTOR signaling pathway and mTOR inhibitors in cancer: progress and challenges. Cell & Bioscience 2020; 10(1): 31.